



HAL
open science

Évaluation de l'exposition du cristallin et des extrémités aux rayonnements ionisants chez les médecins interventionnels du CHU de Rouen

Charles Brossard

► **To cite this version:**

Charles Brossard. Évaluation de l'exposition du cristallin et des extrémités aux rayonnements ionisants chez les médecins interventionnels du CHU de Rouen. Médecine humaine et pathologie. 2021. dumas-03253784

HAL Id: dumas-03253784

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03253784>

Submitted on 8 Jun 2021

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

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

UNIVERSITE DE ROUEN NORMANDIE

FACULTE DE MEDECINE DE ROUEN

Année : 2021

THESE POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MEDECINE

DIPLOME D'ETAT

SPECIALITE : MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL

**EVALUATION DE L'EXPOSITION DU CRISTALLIN ET DES EXTREMITES AUX
RAYONNEMENTS IONISANTS CHEZ LES MEDECINS INTERVENTIONNELS DU
CHU DE ROUEN**

Par Charles BROSSARD

Né le 24/06/1992 à Boulogne-sur-Mer

Thèse soutenue publiquement le 08/04/2021 à 18h

Devant le jury composé de :

Président du jury :

Monsieur le Professeur Jean-François GEHANNO

Directrice de thèse :

Madame le Docteur Laetitia ROLLIN

Membres du jury :

Monsieur le Professeur Jean-Nicolas DACHER

Monsieur le Docteur Slim GHOMADI

Monsieur le Docteur Luc LECHEVALLIER

Monsieur Nathaniel IZAMBARD

Année 2020/2021
ENSEIGNANTS A L'UFR DE MEDECINE

U.F.R. SANTÉ DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Benoît VEBER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**
Professeur Agnès LIARD
Professeur Guillaume SAVOYE

I - MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

M. Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle APTER	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
M. Jean-Marc BASTE	HCN	Chirurgie Thoracique
M. Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
M. Ygal BENHAMOU	HCN	Médecine interne
M. Jacques BENICHOU	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
M. Olivier BOYER	UFR	Immunologie
Mme Sophie CANDON	HCN	Immunologie
M. François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
M. Philippe CHASSAGNE	HCN	Médecine interne (gériatrie)

M. Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
M. Jean-Nicolas CORNU	HCN	Urologie
M. Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie
M. Jean-Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
M. Stéfan DARMONI	HCN	Informatique médicale et techniques de communication
M. Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition
M. Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
M. Frédéric DI FIORE	CHB	Cancérologie
M. Fabien DOGUET	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
M. Jean DOUCET	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
M. Bernard DUBRAY	CHB	Radiothérapie
M. Frank DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
M. Fabrice DUPARC	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
M. Eric DURAND	HCN	Cardiologie
M. Bertrand DUREUIL	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
M. Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
M. Thierry FREBOURG	UFR	Génétique
M. Pierre FREGER (<i>surnombre</i>)	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
M. Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
M. Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
M. Dominique GUERROT	HCN	Néphrologie
M. Olivier GUILLIN	HCN	Psychiatrie Adultes
M. Claude HOUDAYER	HCN	Génétique
M. Fabrice JARDIN	CHB	Hématologie
M. Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
M. Pascal JOLY	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra LAMIA	Havre	Pneumologie
Mme Annie LAQUERRIERE	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
M. Vincent LAUDENBACH	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale

M. Joël LECHEVALLIER	HCN	Chirurgie infantile
M. Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
M. Thierry LEQUERRE	HCN	Rhumatologie
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
M. Hervé LEVESQUE	HCN	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie Infantile
M. Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque
M. Bertrand MACE	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
M. Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle MARIE	HCN	Médecine interne
M. Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
M. Loïc MARPEAU	HCN	Gynécologie - Obstétrique
M. Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE	HCN	Epidémiologie
M. Pierre MICHEL	HCN	Hépto-gastro-entérologie
M. Benoit MISSET (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation Médicale
M. Marc MURAINÉ	HCN	Ophtalmologie
M. Christophe PEILLON	HCN	Chirurgie générale
M. Christian PFISTER	HCN	Urologie
M. Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
M. Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
M. Gaëtan PREVOST	HCN	Endocrinologie
M. Jean-Christophe RICHARD	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
M. Horace ROMAN	HCN	Gynécologie - Obstétrique
M. Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie – Pathologie
M. Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
M. Guillaume SAVOYE	HCN	Hépto-gastrologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie

M. Lilian SCHWARZ	HCN	Chirurgie viscérale et digestive
M. Michel SCOTTE	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne TAMION	HCN	Thérapeutique
M. Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
M. Hervé TILLY (<i>urnombre</i>)	CHB	Hématologie et transfusion
M. Gilles TOURNEL	HCN	Médecine légale
M. Olivier TROST	HCN	Anatomie -Chirurgie maxillo-faciale
M. Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive
M. Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
M. Pierre VERA	CHB	Biophysique et traitement de l'image
M. Eric VERIN	Les Herbiers	Médecine physique et de réadaptation
M. Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
M. Olivier VITTECOQ	HC	Rhumatologie
Mme Marie-Laure WELTER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Najate ACHAMRAH	HCN	Nutrition
Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
M. Emmanuel BESNIER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie vasculaire
M. Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie CHASTAN	HCN	Neurophysiologie
M. Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
M. Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
M. Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
M. Jean-Baptiste LATOUCHE	UFR	Biologie cellulaire
M. Florent MARGUET	HCN	Histologie
Mme Chloé MELCHIOR	HCN	Gastroentérologie
M. Thomas MOUREZ (<i>détachement</i>)	HCN	Virologie

M. Gaël NICOLAS	UFR	Génétique
Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia ROLLIN	HCN	Médecine du Travail
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
M. David WALLON	HCN	Neurologie
M. Julien WILS	HCN	Pharmacologie

PROFESSEUR AGREGÉ OU CERTIFIÉ

M. Thierry WABLE	UFR	Communication
Mme Mélanie AUVRAY-HAMEL	UFR	Anglais

II - PHARMACIE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

M. Jérémy BELLIEN (PU-PH)	Pharmacologie
M. Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
M. Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
M. Abdelhakim EL OMRI	Pharmacognosie
M. François ESTOUR	Chimie Organique
M. Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
M. Jean Pierre GOULLE (Professeur émérite)	Toxicologie
M. Michel GUERBET	Toxicologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
M. Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
M. Jean-Marie VAUGEUIS	Pharmacologie
M. Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme Cécile BARBOT	Chimie générale et minérale
M. Frédéric BOUNOURE	Pharmacie galénique
M. Thomas CASTANHEIRO MATIAS	Chimie organique
M. Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Camille CHARBONNIER (LE CLEZIO)	Statistiques
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation pharmaceutique et économie de la santé
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
Mme Nathalie DOURMAP	Pharmacologie

Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
Mme Dominique DUTERTE- BOUCHER	Pharmacologie
M. Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Nejla EL GHARBI-HAMZA	Chimie analytique
Mme Marie-Laure GROULT	Botanique
M. Hervé HUE	Biophysique et mathématiques
Mme Hong LU	Biologie
Mme Marine MALLETER	Toxicologie
M. Jérémie MARTINET (MCU-PH)	Immunologie
Mme Tiphaine ROGEZ-FLORENT	Chimie analytique
M. Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Christine THARASSE	Chimie thérapeutique
M. Frédéric ZIEGLER	Biochimie

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mme Caroline BERTOUX	Pharmacie

PAU-PH

M. Mikaël **DAOUPHARS**

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde **GUERIN** Anglais

ASSISTANTS HOSPITALO-UNIVERSITAIRES

Mme Alice MOISAN	Virologie
M. Henri GONDÉ	Pharmacie

ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

M. Abdel MOUHAJIR	Parasitologie
M. Maxime GRAND	Bactériologie

ATTACHE TEMPORAIRE D'ENSEIGNEMENT

Mme Ramla **SALHI**

Pharmacognosie

<h3>LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES</h3>

Mme Cécile **BARBOT**

Chimie générale et minérale

M. Thierry **BESSON**

Chimie thérapeutique

M. Abdeslam **CHAGRAOUI**

Physiologie

Mme Elisabeth **CHOSSON**

Botanique

Mme Marie-Catherine **CONCE-CHEMTOB**

Législation et économie de la santé

Mme Isabelle **DUBUS**

Biochimie

M. Abdelhakim **EL OMRI**

Pharmacognosie

M. François **ESTOUR**

Chimie organique

M. Loïc **FAVENNEC**

Parasitologie

M. Michel **GUERBET**

Toxicologie

Mme Martine **PESTEL-CARON**

Microbiologie

M. Mohamed **SKIBA**

Pharmacie galénique

M. Rémi **VARIN**

Pharmacie clinique

M. Jean-Marie **VAUGEOIS**

Pharmacologie

M. Philippe **VERITE**

Chimie analytique

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

M. Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

M. Sahil ADRIOUCH (med)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité Inserm 905)
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain FRAINEAU (med)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline GAILDRAT (med)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
M. Nicolas GUEROUT (med)	Chirurgie Expérimentale
Mme Rachel LETELLIER (med)	Physiologie
M. Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
M. Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mme Christine RONDANINO (med)	Physiologie de la reproduction
M. Youssan Var TAN	Immunologie
Mme Isabelle TOURNIER (med)	Biochimie (UMR 1079)

CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS : Mme Véronique DELAFONTAINE

HCN - Hôpital Charles Nicolle

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CB - Centre Henri Becquerel

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

SJ - Saint Julien Rouen

Par délibération en date du 03 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

SERMENT D'HIPPOCRATE

Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

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

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

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

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité. Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

Remerciements

Monsieur le Professeur GEHANNO

Je vous remercie d'avoir accepté de présider mon jury de thèse et pour votre accompagnement tout au long de mon internat. Veuillez trouver l'expression de ma sincère reconnaissance.

Monsieur le Professeur DACHER

Merci de me faire l'honneur de faire partie de ce jury et d'avoir accepté de juger ce travail. Je vous prie de bien vouloir recevoir toute ma gratitude.

Monsieur le Docteur Slim GHOMADI

Merci d'avoir contribué à ce travail et du temps que tu m'as consacré pour la bonne réalisation de cette étude. Sois assuré de toute ma reconnaissance.

Monsieur le Docteur Luc LECHEVALLIER

Je suis personnellement touché que vous ayez accepté d'être membre du jury. Je vous remercie pour vos conseils avisés tout au long de la réalisation de cette thèse. Je suis heureux de vous compter parmi mes proches.

Monsieur Nathaniel IZAMBARD

Merci pour ton aide et tes idées pour la réalisation des mesures de ce travail. Cela a été un plaisir d'échanger avec toi sur la radioprotection.

Madame Le Docteur Laetitia ROLLIN

Je te remercie d'avoir encadré mon travail de thèse, pour ton soutien et ta bienveillance durant toute cette étude. Je serai ravi de travailler à nouveau avec toi pour mon mémoire.

À toute l'équipe du service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen, merci pour votre accueil, vos explications concernant votre activité et au temps que vous avez pu me consacrer. Je souhaite remercier plus particulièrement Frédéric BOUGEROLLE et Jérôme MARIE, manipulateurs référents en radiologie, sans qui cette étude n'aurait pas pu être réalisée.

À Elise, avec qui je partage ma vie depuis le début de nos études de médecine. Merci pour tout l'amour et le soutien que tu m'apportes depuis toutes ces années. Chaque jour passé à tes côtés me comble de bonheur.

À mes parents, qui m'ont apporté amour et bienveillance depuis toujours. Merci pour votre soutien indéfectible dans toutes les étapes de ma vie.

À mon grand frère Alexandre et Lucie.

À mes grands-parents, à mes tantes et oncles, à mes cousines et cousin.

À mes Beaux-parents Claire et Luc. Merci Claire de votre gentillesse en toute circonstance, d'avoir pris le temps de relire ma thèse et pour vos précieux conseils.

À Mathilde, Jeffrey, Cécile, Mathieu, Héloïse et Valentin.

À mes co-internes de médecine du travail et amis :

Clément I pour mon baptême de l'air et les sandwiches partagés au DURAMT,
Clément D pour les épisodes de voyance et les prises de Jiu Jitsu,
Louise pour avoir réalisé ensemble les stages de biologie,
Pauline pour toutes nos parties de jeux de société et notre stage en addictologie,
Romain pour ces années passées depuis la P2 et nos entraînements de course à pied,
Alexis P et Vincent pour avoir partagé ce semestre au CHU dans la bonne humeur,
et Alexis G, Clémence, François, Joffrey, Mathieu et Rémi.

À mes amis :

Hugo mon urgentiste préféré,
Maxime mon notaire adoré,
Camille, Louis, Margault, Hélène, Mathilde H, Mathilde G, Myriam, Thomas H, Thomas A.

Liste des Abréviations

- **AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique**
- **ALARA : As Low As Reasonably Achievable**
- **CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique**
- **EPI : Equipements de Protection Individuelle**
- **EPC : Equipements de Protection Collective**
- **EURALOC : European epidemiological study on Radiation-induced Lens Opacities for Interventional Cardiologists**
- **IBODE : Infirmière de Bloc Opératoire Diplômée d'Etat**
- **INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité**
- **IRSN : Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire**
- **LEPID : Laboratoire d'Epidémiologie de l'IRSN**
- **MAR : Médecin Anesthésiste-Réanimateur**
- **MAV : Malformation Artério Veineuse**
- **O'CLOC : Occupational Cataracts and Lens Opacities in interventionnal Cardiology**
- **ORAMED : Optimisation of Radiation protection of Medical staff**
- **O'RICAMS : Occupational Radiation-Induced Cancer in Medical Staff**
- **PDS : Produit Dose.Surface**
- **PDGF : Platelet Derived Growth Factor**
- **RELID : Retrospective Evaluation of Lens Injuries and Dose study)**
- **RPL : Radio Photoluminescence**
- **SISERI : Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants**
- **TLD : Thermoluminescent Dosimeter**
- **TGF-b : Transforming Growth Factor beta**
- **UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**
- **VLE : Valeurs Limites d'Exposition**

Table des matières

I. ETAT DES CONNAISSANCES	1
A. Radiologie interventionnelle	1
1. Définition	1
2. Historique	2
3. Exemples d'actes fréquents en radiologie interventionnelle	2
a) Neuro-embolisation cérébrale	2
b) Chimio-embolisation d'une tumeur hépatique	3
c) Drainage biliaire	3
d) Vertébroplastie	4
4. Développement de l'activité de radiologie interventionnelle	4
B. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants	5
1. Historique	5
2. Notions de rayonnement direct et rayonnement diffusé	6
3. Exposition de la tête du praticien interventionnel	9
a) Exposition du cristallin et cataractes radio-induites	9
(1) Anatomie du cristallin	9
(2) Cataracte : présentation clinique	10
(3) Physiopathologie de la cataracte radio-induite	11
(a) Altération des capacités de défense antiradicalaire	11
(b) Modifications métaboliques	12
(c) Modifications cellulaires	12
(4) Exposition du cristallin chez le praticien interventionnel	12
b) Exposition cérébrale et lésions radio-induites	17
(1) Tumeurs cérébrales	18
(2) Altérations vasculaires	19
(3) Effets neurologiques	20
4. Exposition des mains et lésions radio-induites	21
a) Radiodermite chronique	21
(1) Présentation clinique	22
(2) Physiopathologie	23
(a) Altérations cellulaires	23
(b) Altérations tissulaires	24
b) Lésions microvasculaires et apport de la capillaroscopie	24
c) Exposition des mains du praticien interventionnel	26
C. Radioprotection	31
1. Définition et grands principes	31
a) Justification	31
b) Optimisation	31
c) Limitation	32
2. Réglementation relative à la radioprotection	32
a) Evaluation du risque	32
b) Classement des travailleurs	33
c) Délimitation du zonage radiologique	34
d) Surveillance individuelle de l'exposition	34
(1) Suivi dosimétrique et radioprotection du cristallin	36
(a) Dosimètre cristallin	36
(b) Valeurs limites d'exposition du cristallin	37
(c) Suivi de l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants	37

(2) Suivi dosimétrique et radioprotection des mains	39
(a) Dosimétrie des extrémités mains	39
(b) Valeurs limites d'exposition des extrémités	39
(c) Suivi de l'exposition des extrémités aux rayonnements ionisants	39
3. Recommandations de radioprotection en radiologie interventionnelle	41
a) Equipements de protection individuelle	41
(1) Radioprotection du cristallin	41
(2) Radioprotection des mains	42
b) Equipements de protection collective	43
II. L'ETUDE	44
A. Contexte	44
B. Objectifs	45
C. Matériels et méthodes	45
1. Population et suivi	45
2. Quantification et détermination de l'activité interventionnelle	45
3. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants	46
a) Dosimétrie cristallin	46
b) Efficacité des lunettes plombées	48
c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit	49
d) Relation dosimétrie cristallin et PDS	50
e) Extrapolation annuelle de la dosimétrie cristallin	51
4. Exposition des mains aux rayonnements ionisants	51
a) Dosimétrie bague	51
b) Relation dosimétrie bague et PDS	52
c) Extrapolation annuelle dosimétrie bague	52
5. Utilisation des équipements de protection individuelle et collective	53
D. Résultats	54
1. Quantification de l'activité interventionnelle	54
2. Typologie de l'activité interventionnelle	55
3. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants	60
a) Dosimétrie cristallin	60
b) Efficacité des lunettes plombées	68
c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit	69
4. Exposition des mains aux rayonnements ionisants	70
5. Utilisation des équipements de protection individuelle et collective	76
E. Discussion	78
1. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants	78
a) Dosimétrie du cristallin	78
b) Efficacité des lunettes plombées	78
c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit	79
d) Relation dosimétrie cristallin et PDS	79
(1) Dosimétrie intérieure gauche aux lunettes plombées	79
(2) Dosimétrie cristallin extérieure gauche	81
e) Extrapolation annuelle cristallin	84
2. Exposition des mains aux rayonnements ionisants	87
a) Dosimétrie bague	87
b) Relation dosimétrie bague et PDS	88
c) Extrapolation annuelle bague	90
3. Utilisation des équipements de protection individuelle	92
4. Dosimétrie passive poitrine	92

5. Suivi médical individuel	93
F. Limites	94
G. Conclusion	95
III. BIBLIOGRAPHIE	96
IV. ANNEXES	103

Résumé

Contexte : Le nombre d'actes réalisés en médecine interventionnelle augmente chaque année en France. L'utilisation des rayons X permet de guider le geste opératoire mais entraîne une exposition secondaire des zones anatomiques non protégées par un équipement plombé chez les praticiens. L'association entre l'exposition professionnelle chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants et de potentiels effets sur la santé du personnel médical a été démontrée : cataractes radio-induites, anomalies microvasculaires sous-unguéales. Le principal objectif de cette étude a été d'évaluer l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants chez les praticiens interventionnels du CHU de Rouen.

Matériels et méthodes : Il s'agit d'une étude observationnelle, prospective et monocentrique. L'ensemble des praticiens intervenant dans le service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen a été inclus dans l'étude du 1^{er} janvier 2020 au 30 juin 2020 : quatre radiologues, quatre chirurgiens vasculaires, deux internes ainsi qu'un des manipulateurs référents en radiologie. La typologie de l'activité interventionnelle exercée a été définie et quantifiée pour chaque médecin en se basant sur le produit dose.surface de l'ensemble des opérations réalisées au cours du suivi. Un recueil dosimétrique cristallin et bague individuel a été mis en place pendant une période de six mois. Afin d'évaluer l'exposition du cristallin et des mains sur douze mois consécutifs, une extrapolation annuelle des dosimétries cristallin et mains a été réalisée.

Résultats : L'extrapolation annuelle de la dosimétrie cristallin a mis en évidence un dépassement de la valeur limite d'exposition (VLE), fixée à partir du 1^{er} juillet 2023 à 20 mSv sur douze mois consécutifs, pour trois radiologues du service de radiologie interventionnelle, respectivement 23,3, 27 et 33 mSv. Concernant l'exposition des mains aux rayonnements ionisants, aucun praticien n'a dépassé la VLE de 500 mSv sur douze mois pour les travailleurs classés en catégorie A. Cependant, un des radiologues a présenté un intervalle de doses bague annuelle au-dessus de la VLE de la catégorie B, définie à 150 mSv.

Conclusion : Les praticiens interventionnels sont exposés à de faibles doses de rayonnements ionisants de façon répétée au cours de leurs carrières professionnelles, pouvant entraîner un dépassement des valeurs limites d'exposition notamment au niveau du cristallin. L'utilisation de l'ensemble des équipements de protection collective et individuelle est nécessaire pour réduire cette exposition. Un suivi dosimétrique adapté du cristallin et des mains est essentiel pour quantifier l'exposition de ces praticiens aux rayonnements ionisants. Le médecin du travail doit mettre en œuvre une surveillance médicale renforcée afin de prévenir et dépister toute affection susceptible d'être en relation avec une exposition aux rayonnements ionisants.

Mots clés : *rayons X, radiologie interventionnelle, cataracte radio-induite, radiodermite chronique, radioprotection, dosimétrie.*

I. ETAT DES CONNAISSANCES

A. Radiologie interventionnelle

1. Définition

La Société française de radiologie et la Fédération de radiologie interventionnelle définissent la radiologie interventionnelle de la façon suivante :

« La radiologie interventionnelle comprend l'ensemble des actes médicaux invasifs ayant pour but le diagnostic ou le traitement d'une pathologie, réalisés sous guidage et sous contrôle d'un moyen d'imagerie (Rayons X, ultrasons, scanner, IRM) ».

La radiologie interventionnelle concerne de nombreux domaines :

- Vasculaire (angioplasties, embolisations),
- Uro-digestif (pose d'endoprothèses urétérales ou des voies biliaires),
- L'évacuation de collections guidée par échographie ou scanner,
- Ostéoarticulaire par voie percutanée (vertébroplasties de lésions osseuses),
- Oncologique : destruction par des ondes de radiofréquence ou la cryothérapie de lésions bénignes ou cancéreuses.

Ainsi, on parle de radiologie interventionnelle lorsque ces interventions sont réalisées par des radiologues, des cardiologues, des chirurgiens et des praticiens de toutes autres spécialités médicales. La radiologie interventionnelle regroupe un grand nombre d'actes différents qui peuvent être à but diagnostique ou thérapeutique. Le guidage radiologique rend possible le repérage et l'accès à l'organe cible par différentes voies anatomiques.

Selon la Société française de radiologie, l'accès à l'organe cible peut se faire selon trois modalités :

- 1) Par le réseau vasculaire après cathétérisme d'un vaisseau périphérique,
- 2) Par voie transcutanée directe (vertébroplasties),
- 3) Par un orifice naturel de l'organisme (tube digestif, voies urinaires, voies génitales).

Du point de vue du patient, la radiologie interventionnelle procure plusieurs avantages : une réduction du risque opératoire, une limitation de la douleur, un délai de récupération plus court et un moindre recours à l'anesthésie générale (1).

2. Historique

La première dilatation d'une artère fémorale superficielle a été réalisée en 1964 par un radiologue américain, Charles Dotter. Il a permis ainsi d'éviter l'amputation de sa patiente et a marqué le début de la médecine interventionnelle. La radiologie interventionnelle s'est d'abord développée dans le domaine vasculaire avec la création, à partir de 1969, des premiers stents et l'utilisation des fibrinolytiques pour désobstruer les artères. A partir des années 1980, les angioplasties ont permis de traiter les vaisseaux obstrués par dilatation. La prise en charge de différentes hémorragies (post traumatiques, digestives, bronchiques, néoplasiques) a été rendue possible grâce à l'apparition de l'embolisation, ayant pour principe l'occlusion d'un vaisseau par l'injection de matériel. De nos jours, le traitement des malformations vasculaires et des anévrysmes intracrâniens ou médullaires, repose essentiellement sur la neuro-embolisation. D'autres actes interventionnels se développent au fil des années et ne concernent pas uniquement le domaine vasculaire.

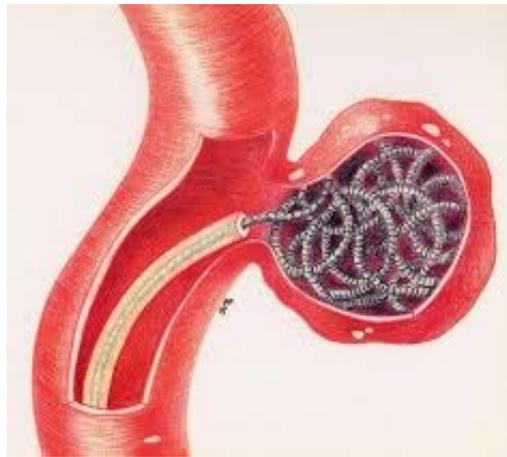
3. Exemples d'actes fréquents en radiologie interventionnelle

a) Neuro-embolisation cérébrale

Les vaisseaux cérébraux peuvent présenter des anomalies telles que la malformation artérioveineuse cérébrale (MAV) et l'anévrysme artériel, qui restent rares mais non exceptionnels. La paroi du vaisseau sanguin est fragilisée et amincie (concerne une artériole dans le cas de l'anévrysme et une veinule dans le cas de la MAV). Il existe un risque que la paroi du vaisseau se rompe lorsqu'elle est distendue sous la haute pression du sang artériel. La rupture d'un vaisseau cérébral engendre ainsi une hémorragie cérébrale, qui peut engager le pronostic vital et fonctionnel du patient.

La technique interventionnelle a pour objectif d'obstruer l'anévrysme ou la MAV, à l'aide de colles acryliques pour les MAV et de « coils » pour les anévrysmes (entraînant la coagulation et la formation d'un thrombus fibreux à la suite du ralentissement du flux sanguin par les

ressorts). Les matériels sont introduits par cathétérisme artériel, le plus souvent par l'artère fémorale.



Représentation schématique : insertion de coils dans le sac anévrysmal.

b) Chimio-embolisation d'une tumeur hépatique

La chimio-embolisation associe à la fois un traitement médicamenteux anticancéreux et une embolisation en bloquant le flux sang alimentant la tumeur. La tumeur va ainsi régresser sous l'effet de la destruction cellulaire, grâce à l'action de la chimiothérapie et à la privation de sang.

Le radiologue va injecter, au niveau de la tumeur hépatique, par cathétérisme artériel, des billes enrobées de chimiothérapie. Le repérage se fait par artériographie fournissant une cartographie détaillée des vaisseaux et permettant de choisir le meilleur trajet pour injecter le produit au plus près de la tumeur hépatique.

c) Drainage biliaire

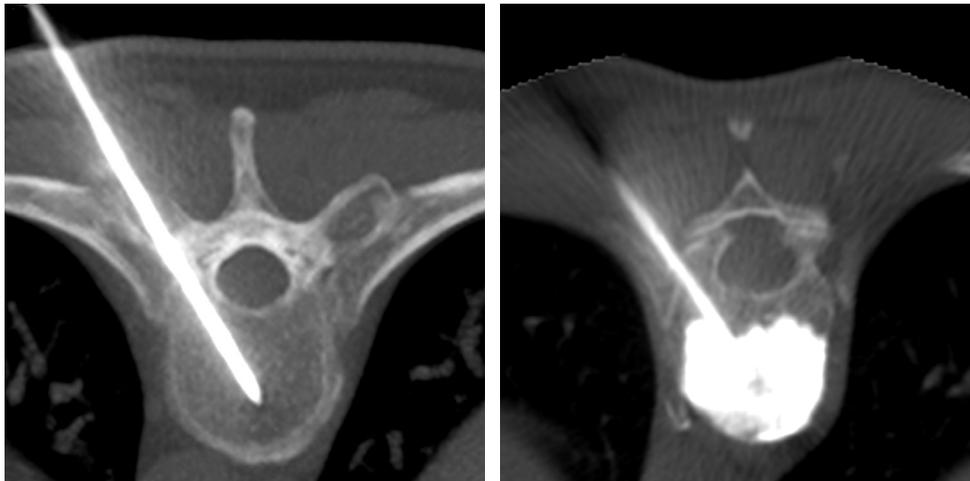
Le principe du drainage biliaire percutané est de rétablir une communication entre les voies biliaires intra-hépatiques et le duodénum. L'obstruction des voies biliaires (par une lithiase ou une tumeur du pancréas) peut se compliquer d'une angiocholite ou d'une insuffisance hépatique aiguë.

Le drainage biliaire se compose d'une ponction percutanée des voies biliaires intra-hépatiques, du franchissement de la sténose biliaire puis de la mise en place d'une prothèse ou d'un drain, permettant l'élimination de la bile vers le tube digestif.

d) Vertébroplastie

Le corps vertébral peut être fragilisé par une pathologie osseuse (métastase, ostéoporose) ou par un traumatisme. Le but de la cimentoplastie vertébrale va être de consolider la vertèbre à l'aide d'un ciment constitué de résine polymère.

L'injection du ciment directement dans le corps vertébral, se fait par voie transcutanée entre les processus interépineux. La scopie per-opératoire permet le contrôle du trajet de l'aiguille et une injection précise du ciment dans le corps vertébral.



Repérage scanographique et injection de ciment dans le corps vertébral à l'aide d'un trocart.

4. Développement de l'activité de radiologie interventionnelle

Les avancées technologiques concernant le matériel utilisé lors des actes interventionnels et l'amélioration des performances des générateurs de rayons X, permettent à de plus en plus de centres médicaux de pouvoir développer et exercer une activité de radiologie interventionnelle. Ces actes radioguidés peuvent être une alternative à certaines opérations chirurgicales complexes en diminuant le risque opératoire, la durée d'hospitalisation pour le patient ainsi que le coût financier de l'intervention.

En 2011, l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) a évalué le nombre d'actes interventionnels, qu'ils soient diagnostiques ou thérapeutiques, à plus d'un million par an en France (2). Dans les pays européens, plus de 400 procédures différentes ont été identifiées avec une croissance de 10 à 20 % du nombre d'actes de radiologie interventionnelle chaque année, selon Le Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) (3).

B. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants

1. Historique

En novembre 1895, le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen découvre les rayons X. Les professionnels de santé, notamment les radiologues, sont les premières populations de travailleurs étudiées en raison de fortes expositions professionnelles de la fin du XIX^{ème} siècle au début du XX^{ème} siècle (4). Dès 1904, un radiologue Antoine Béclère insiste sur la nécessité de mettre en place des moyens de protection pour les médecins et leurs patients, contre l'action nocive des rayonnements ionisants. Thomas Edison se lance rapidement dans la production de tubes à rayons X. L'année 1905 est marquée par la mort de son assistant Clarence Dally, des suites d'une radiodermite. Il s'agit du premier décès imputé à une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants.

Dès 1911, l'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et la leucémie est évoquée dans la communauté scientifique. De 1920 à 1930, de nombreux cas de leucémies sont déclarés chez des radiologues particulièrement exposés. La commission internationale de protection contre les rayons X et du radium, qui deviendra par la suite, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), est créée en 1928 à la suite d'une mobilisation internationale des radiologues, pour une meilleure protection du personnel médical.

Une démarche de radioprotection se développe progressivement, premièrement avec le principe de limitation de la dose d'exposition afin de supprimer les effets déterministes des rayonnements ionisants, puis à partir des années 1940, avec le principe ALARA (as low as reasonably achievable). Grâce à une politique de radioprotection efficace, à l'amélioration des

techniques et à une meilleure connaissance des effets des rayonnements ionisants sur la santé, les niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants du personnel médical ont drastiquement diminué depuis le début du XX^{ème} siècle (5). Cependant, depuis les années 1970, le développement rapide et l'activité croissante de la radiologie interventionnelle entraînent une nouvelle augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants chez certains professionnels de santé.

2. Notions de rayonnement direct et rayonnement diffusé

Certaines procédures de radiologie interventionnelle impliquent l'utilisation de rayons X, entraînant une exposition du patient aux rayonnements ionisants mais aussi du personnel médical. Les praticiens sont susceptibles de recevoir des doses significatives durant les actes de radiologie et de cardiologie interventionnelle. En effet, les opérateurs doivent rester à proximité du patient et sont donc exposés au rayonnement X diffusé. Le corps et le cou du personnel sont efficacement protégés par le tablier plombé et le cache-thyroïde. Cependant, les yeux ne sont pas toujours protégés par des protections plombées et les mains peuvent se trouver directement dans le champ d'irradiation. Au-delà des avantages indéniables pour le patient, les actes interventionnels sont susceptibles d'exposer de façon chronique et répétée les professionnels de santé aux rayonnements ionisants.

Le générateur de rayons X (le plus souvent un arceau mécanisé permettant différentes incidences) est constitué d'un tube émetteur de rayons X et d'un récepteur situé de l'autre côté. Les rayonnements X vont être générés par le tube lorsque l'appareil est en fonctionnement. Quand le tube n'est pas sous tension l'émission de rayonnements X est impossible. Cette exposition aux rayons X a lieu pendant les phases de radioscopie (ou fluoroscopie) et de radiographie lors de l'acquisition des images. La prise en mode pulsé ou continu d'images permet à l'opérateur de guider son geste en direct. Une image en radioscopie est moins irradiante qu'une radiographie mais du fait de leur durée prolongée, les radioscopies sont souvent les actes entraînant les expositions les plus importantes.



Arceau avec amplificateur de brillance en radiologie interventionnelle au CHU de Rouen.

Le rayonnement primaire correspond au faisceau provenant directement du tube à rayons X. Il est environ mille fois plus irradiant que le rayonnement diffusé. Concernant certains types d'actes par voie d'abord percutanée, dits proximaux, le rayonnement primaire est à l'origine de l'exposition des mains de l'opérateur si elles se trouvent directement dans le champ d'irradiation. Le rayonnement diffusé est caractérisé par le faisceau émis indirectement par le patient et le matériel. En radiologie interventionnelle, ce rayonnement diffusé provient essentiellement du patient et est responsable de l'irradiation du corps entier de l'opérateur. Ainsi les parties du corps non protégées de l'opérateur (tête, mains et jambes) sont exposées à ce rayonnement diffusé. Par ailleurs, il existe un rayonnement de fuite à proximité du générateur de rayons X.

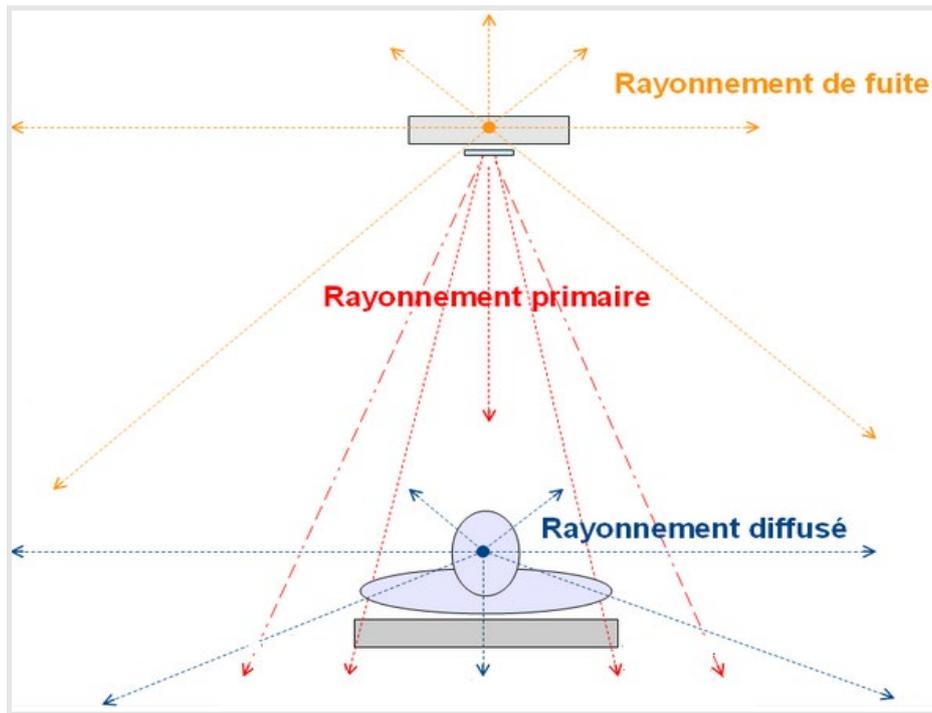
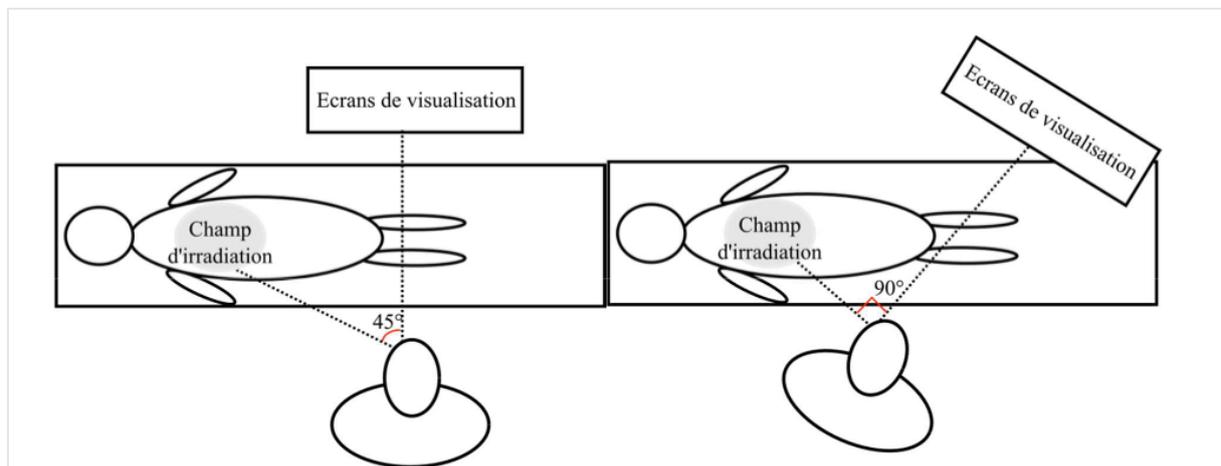


Schéma des différents types de rayonnements émis en radiologie interventionnelle.

Pour une grande partie des procédures interventionnelles, les praticiens doivent tourner la tête entre 45 et 90 degrés à droite pour regarder l'écran de fluoroscopie, entraînant ainsi une exposition plus importante de la tête et de l'œil gauche, au rayonnement diffusé latéralement.



Position de l'opérateur et impact sur l'angle d'incidence des rayonnements ionisants.

Dans une démarche d'optimisation et d'évaluation du risque radiologique pour le patient, des indicateurs tels que le produit dose.surface (PDS) sont mis en place lors de la réalisation des examens radiologiques. Le produit dose.surface (ou produit kerma-surface dans l'air)

représente l'énergie cumulée sur l'ensemble du champ d'irradiation. Il s'agit donc de la quantité d'énergie totale délivrée par le faisceau exprimée en Gy.cm². Le PDS est calculé automatiquement pour chaque opération réalisée en fonction des différents paramètres du générateur de rayons X.

Alors que les patients sont exposés aux rayons X durant une courte période, le personnel médical est exposé aux rayonnements ionisants de manière répétitive durant toute son activité professionnelle. Chaque praticien est amené à réaliser plusieurs centaines d'interventions par an, entraînant une exposition cumulée aux rayonnements X au niveau des mains et des yeux. Le suivi et l'évaluation de l'impact de ces expositions chroniques aux rayonnements ionisants sur la santé du personnel médical sont donc nécessaires.

3. Exposition de la tête du praticien interventionnel

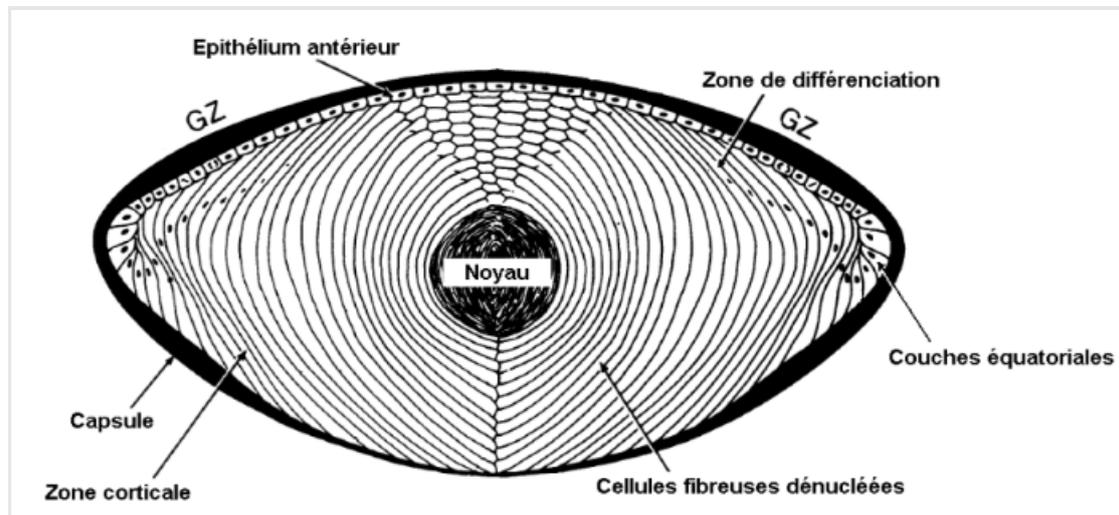
a) Exposition du cristallin et cataractes radio-induites

Si l'association entre le risque de développer une cataracte et l'exposition aux rayonnements ionisants est connue de longue date (6), elle demeure au cœur des questions actuelles de radioprotection. Le domaine de la radiologie interventionnelle est connu comme pouvant conduire dans certaines procédures, à une exposition non négligeable du cristallin aux rayonnements X chez le personnel médical.

(1) Anatomie du cristallin

Le cristallin, organe avasculaire transparent et de forme biconvexe, se situe à l'intérieur du globe oculaire. Il est suspendu par l'intermédiaire de la zonule cristallinienne au corps ciliaire. La partie postérieure du cristallin est en contact avec le corps vitré et sa partie antérieure avec l'humeur aqueuse. Le cristallin est encapsulé dans une membrane conjonctive transparente à travers laquelle s'effectue l'ensemble des échanges par diffusion (7). Il présente une structure composée en couches concentriques, une épaisseur de 4 mm et un diamètre frontal de 9 mm. Ces différentes couches résultent de la prolifération de l'épithélium antérieur : couche unicellulaire directement au contact de la capsule antérieure dont les cellules se multiplient puis migrent, s'étirent au niveau de l'équateur cristallinien et perdent progressivement leur noyau pour former des cellules fibreuses. Le cristallin s'épaissit au cours des années. La zone

germinative active, située à l'avant du cristallin, va permettre la création de nouvelles fibres refoulant les fibres plus anciennes vers le centre.



Représentation schématique des différentes couches du cristallin.

L'élasticité du cristallin lui permet de modifier ses courbures lors de l'accommodation et d'entraîner la divergence ou la convergence de la lumière sur la rétine.

(2) Cataracte : présentation clinique

La cataracte est définie par l'opacification de tout ou d'une partie du cristallin (8), elle est l'une des premières causes d'altération visuelle et de cécité dans le monde (9). Les signes fonctionnels évocateurs de cataracte sont une baisse d'acuité visuelle, une photophobie, une diplopie monoculaire ou une modification de la perception des couleurs.

La répartition des opacités au sein du cristallin, visualisée lors de l'examen à la lampe à fente, va définir les différents types de cataracte :

- La cataracte nucléaire : atteinte du noyau cristallinien avec prédominance d'une baisse de l'acuité visuelle de loin.
- La cataracte sous-capsulaire postérieure : opacification au contact de la capsule postérieure pouvant entraîner une gêne de loin et de près.
- La cataracte corticale : opacification au niveau du cortex cristallinien.
- La cataracte totale : cataracte très évoluée visible à l'œil nu avec l'aire pupillaire blanche.

Différentes étiologies peuvent entraîner le développement d'opacités du cristallin : traumatique, secondaire à une myopie, métabolique, iatrogène etc. La principale étiologie est la cataracte sénile qui est le plus souvent bilatérale et globalement symétrique (8).

L'exposition aux rayonnements ionisants est aussi connue comme un facteur favorisant le développement d'opacités du cristallin. La forme la plus fréquemment décrite dans ce contexte est la cataracte sous-capsulaire postérieure. La cataracte radio-induite peut être reconnue au titre des maladies professionnelles (le tableau n° 6 pour le régime général et le tableau n° 20 du régime agricole).

(3) Physiopathologie de la cataracte radio-induite

Même si le mécanisme de formation de la cataracte radio-induite reste partiellement connu, différentes altérations du fonctionnement cellulaire ont été décrites lors de l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants (10).

(a) Altération des capacités de défense antiradicalaire

Les différents moyens du cristallin pour lutter contre les effets des radicaux libres peuvent être de type enzymatique, antioxydant ou liés à la présence de capteurs de radicaux libres. La catalase est le système enzymatique de protection qui permettrait au cristallin de lutter le plus efficacement contre les radicaux libres (11). La présence de molécules antioxydantes comme le glutathion en concentration très élevée dans le cristallin, est un autre moyen de défense antiradicalaire. Il a deux fonctions majeures : la neutralisation des radicaux libres et la détoxification cellulaire. Il est en faible quantité dans la capsule, le noyau, le cortex alors que la concentration de glutathion est très élevée dans l'épithélium et constitue une réserve. Les lésions induites par le stress oxydant au niveau de la couche cellulaire épithéliale deviennent irréversibles en l'absence de détoxification cellulaire, ce qui peut conduire à une perte de la transparence du cristallin (12).

Lors d'une agression par des agents inducteurs d'une grande quantité de radicaux libres, tels que les rayonnements ionisants, les moyens de défense peuvent être rapidement dépassés, s'accompagnant d'un déficit majeur en glutathion. Ces altérations aboutissent progressivement à une opacification du cristallin. Il en résulte un retentissement sur les fonctions des membranes cellulaires avec des échanges perturbés d'eau, d'électrolytes et d'autres substances.

(b) Modifications métaboliques

De nombreux troubles métaboliques entrent en considération dans l'apparition des cataractes radio-induites. La baisse du glutathion est l'un des événements les plus précoces. Elle induit une augmentation de la perméabilité membranaire aux ions, via l'inactivation de l'enzyme $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATP-ase}$ membranaire, entraînant une perturbation de la synthèse protéique (13). Les métabolismes du calcium et du glucose sont aussi modifiés : plus le tissu est opacifié, plus la concentration en calcium augmente dans le cristallin (14).

(c) Modifications cellulaires

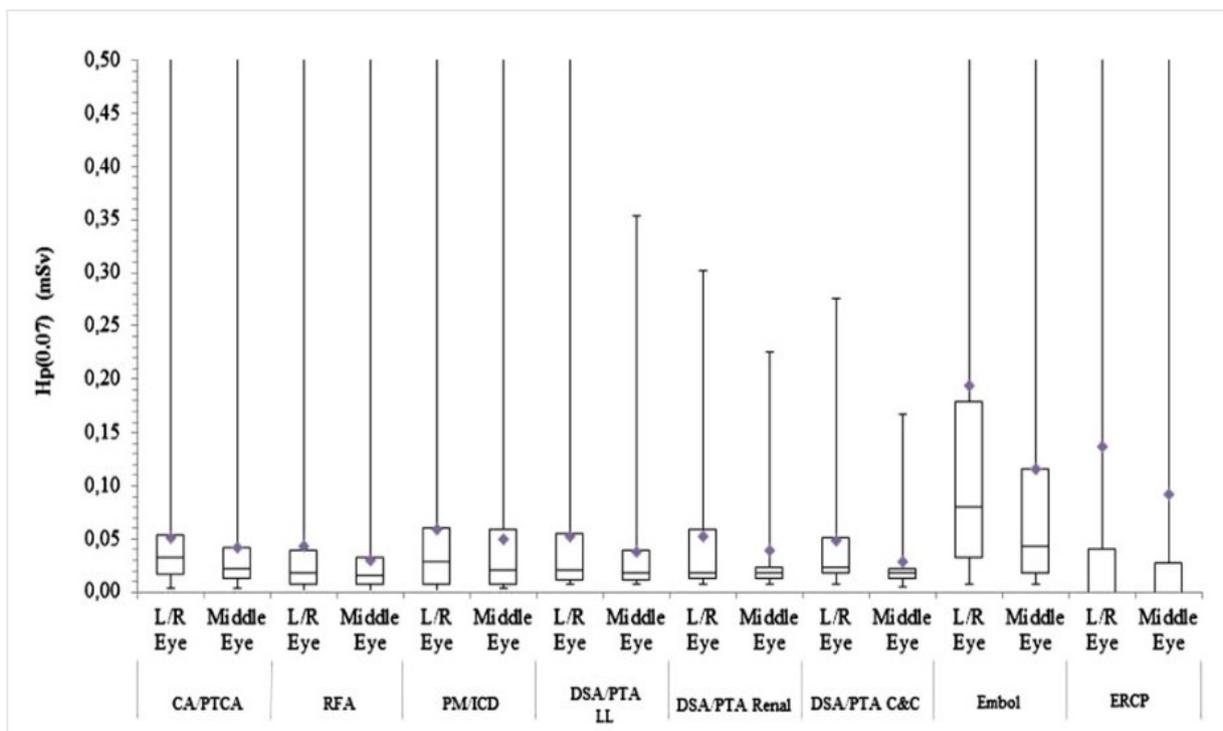
Les cellules épithéliales de la zone germinative, situées sous la capsule antérieure du cristallin, sont les plus sensibles aux rayonnements ionisants (7). L'irradiation engendre en premier une inhibition de l'activité mitotique cellulaire. Plusieurs semaines après l'irradiation, la mitose va reprendre et les cellules filles des cellules irradiées vont migrer vers les couches équatoriales du cristallin. On peut observer dans cette région, une désorganisation de l'agencement des cellules habituellement très régulier. La migration des cellules fibreuses dysmorphiques se poursuit vers la région sous-capsulaire postérieure, où elles vont s'accumuler. Ces cellules de forme arrondie sont appelées cellules de Wedl et présentent de nombreuses anomalies nucléaires. Ces cellules de Wedl vont se rompre, et déverser leurs débris cellulaires parmi les autres cellules intactes. Ces débris cellulaires ne peuvent pas être évacués car le cristallin est avasculaire et totalement enclos dans sa capsule. Les fibres plus internes semblent préserver une morphologie normale, alors que dans le cortex antérieur, des cellules dysmorphiques peuvent aussi commencer à apparaître. Ces altérations cyto-architecturales sont à la base de l'opacification du cristallin (7).

(4) Exposition du cristallin chez le praticien interventionnel

Même en respectant les procédures interventionnelles, les praticiens peuvent exposer leur cristallin à des doses cumulées de rayons X significatives au cours de leurs carrières professionnelles, notamment lorsque aucune mesure de radioprotection n'est mise en place (15,16). L'UNSCEAR déclare en 2000, que l'exposition aux rayonnements ionisants chez les médecins interventionnels est la principale source d'exposition professionnelle dans le domaine médical. Si on étudie l'ensemble des actes interventionnels effectués en radiologie et en cardiologie interventionnelle, les radiologues sont exposés à des doses plus importantes de rayonnements ionisants que les cardiologues (17).

De 2008 à 2011, l'étude ORAMED (optimisation of radiation protection of medical staff) est menée dans 34 centres médicaux et 6 pays européens dont la France (18). Elle permet de rassembler de nombreuses données concernant les doses absorbées par le cristallin chez le personnel médical de radiologie interventionnelle. Cette étude est conçue pour acquérir des données standardisées sur l'exposition du cristallin et des extrémités, pour les procédures de radiologie et de cardiologie interventionnelle (18).

Concernant les procédures radiologiques étudiées, c'est lors des embolisations que le cristallin de l'opérateur est le plus fortement exposé aux rayonnements ionisants, avec une dose moyenne de 0,2 mSv par procédure sans protection plombée (18,19). Les doses maximales enregistrées au cristallin peuvent dépasser le millisievert par acte pour la plupart des procédures interventionnelles (20). Les doses moyennes enregistrées sont très variables selon la localisation étudiée et le type d'intervention réalisée (18).



Notes de lecture : cardiac angiographies/cardiac angioplasties (CA/PTCA), radiofrequency ablations (RFA), pacemaker and defibrillator implantations (PM/ICD), angiographies and angioplasties of lower limbs (DSA/PTA LL), reins (DSA/PTA R), carotids, brain (DSA/PTA C&C), embolisations (embol) and endoscopic retrograde cholangio-pancreatography (ERCP).

Résultats de l'étude ORAMED : dosimétrie du cristallin durant les différentes procédures (18).

De nombreux facteurs vont ainsi pouvoir influencer cette exposition :

- Le patient (poids, complexité de la procédure),
- L'équipement (position et réglages du tube à rayons X, utilisation d'un système biplan),
- Le praticien (utilisation des équipements de protection individuelle (EPI) ou collective (EPC), expérience et rapidité à réaliser le geste opératoire).

Dans cette même étude, une extrapolation annuelle des doses reçues est réalisée pour chaque praticien grâce à l'analyse de la dosimétrie cristallin par procédure et au recueil du nombre d'actes réalisés par an (18). Parmi les radiologues interventionnels réalisant des embolisations et des angiographies, près de la moitié des opérateurs dépassent la nouvelle limite réglementaire de 20 mSv sur douze mois consécutifs, avec une valeur maximale pour le cristallin évaluée à 85 mSv par an (18). D'autant plus que cette extrapolation annuelle de la dose cristallin est potentiellement sous-estimée, du fait de l'absence de données pour certaines procédures. En prenant en compte l'exposition des médecins interventionnels au cours de l'ensemble de leurs carrières professionnelles, la dose cumulée au niveau du cristallin peut atteindre plusieurs grays (Gy).

Un risque accru de développer des opacités du cristallin et des cataractes, notamment sous-capsulaires postérieures, secondaire à une exposition aiguë ou chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants, est décrit dans différentes populations : les survivants des bombardements de Nagasaki et Hiroshima, les enfants vivant dans les territoires contaminés de Tchernobyl et les patients ayant bénéficié d'une radiothérapie dans l'enfance (21). La période de latence entre l'irradiation et la formation de la cataracte est inversement proportionnelle à la dose et peut être de plusieurs années à plusieurs décennies (22).

Initialement, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) s'était basée sur le modèle déterministe avec un seuil d'exposition, en dessous duquel, les opacités ne se formaient pas (21,23). La CIPR estimait la dose nécessaire au développement d'une opacité détectable entre 0,5-2 Gy pour une exposition aiguë et 5 Gy pour des expositions très fractionnées ou prolongées (supérieure à 0,1 Gy par an si l'exposition a lieu sur de nombreuses années). Concernant l'apparition d'une cataracte significative, les doses seuils étaient comprises entre 2 à 10 Gy pour une exposition aiguë et de 8 Gy pour des expositions

fractionnées ou prolongées (supérieure à 0,15 Gy par an si exposition sur de nombreuses années) (24).

Les auteurs de différentes études chez des populations non interventionnistes, ont conclu à des valeurs seuils bien plus basses que celles en vigueur, variant de 0,3 à 1,5 Gy (25). La publication 118 de la CIPR s'est appuyée sur ces nouvelles données pour réviser en 2012 ses dernières recommandations de 2007 (CIPR 103), concernant l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants (24,26). La dose seuil, pour développer une cataracte symptomatique avec une incidence de 1 %, a ainsi été abaissée à 0,5 Gy, que ce soit pour une exposition aiguë, une exposition fractionnée ou une exposition cumulée sur plusieurs années (avec 0,5 Gy divisée par la durée de l'exposition en année) :

« La commission a examiné les preuves épidémiologiques récentes suggérant l'existence de certains effets de réactions tissulaires, en particulier ceux qui se manifestent très tardivement, lorsque les doses seuils sont ou pourraient être inférieures à celles envisagées antérieurement. Pour le cristallin, le seuil de la dose absorbée est maintenant considéré comme égal à 0,5 Gy. »

Ces résultats sont souvent basés sur l'évaluation de petites opacités à l'examen ophtalmologique à la lampe à fente. La CIPR émet l'hypothèse que les petites opacités progressent vers des cataractes et que leur présence prédit le risque de développer une cataracte, même si cette notion n'est pas encore complètement confirmée.

Dans la littérature scientifique, un doute persiste si la cataractogenèse radio-induite est un phénomène stochastique ou déterministe (20). De nouvelles données suggèrent que des cataractes peuvent se former de manière stochastique, sans dose seuil (27). Une lésion primaire radio-induite d'une seule cellule épithéliale donnerait alors naissance à des cellules filles défectueuses entraînant une opacité du cristallin. De plus, la radiosensibilité du cristallin pourrait être influencée par la génétique de chaque individu (26). L'existence d'une dose seuil entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le développement d'opacités du cristallin est toujours débattue.

Le lien entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et le développement d'opacités du cristallin est retrouvé dans différentes populations de travailleurs

étudiées (astronautes, pilotes de ligne, liquidateurs de Tchernobyl, cohorte de manipulateurs radiologistes) (27).

Dès les années 1990, des cas d'opacités et de cataractes sont décrits chez des radiologues interventionnels (28). En 2004, une étude menée dans une population de 59 radiologues interventionnels, met en évidence des opacités du cristallin chez 37 % des radiologues et une cataracte sous-capsulaire postérieure chez 8 % des praticiens. La fréquence et la sévérité des opacités cristalliniennes sous-capsulaires augmentent en fonction de l'âge et de la durée d'activité professionnelle du praticien (29).

En 2008, l'étude RELID (retrospective evaluation of lens injuries and dose study) est lancée par l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour évaluer la prévalence des opacités du cristallin radio-induites. RELID révèle que près de la moitié des 110 cardiologues interventionnels étudiés présentent des opacités sous-capsulaires postérieures détectables, avec dans 50 % des cas une atteinte bilatérale (30).

A partir de 2009, le laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN (LEPID) met en place l'étude O'CLOC (occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology), chez une population d'une centaine de cardiologues interventionnels français. L'objectif est d'estimer le risque de développer des opacités cristalliniennes secondaires à l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants (31). Les cardiologues interventionnels présentent comparativement au groupe témoin, un risque quatre fois plus élevé de développer des opacités sous-capsulaires postérieures s'ils ne portent pas de lunettes plombées et deux fois plus élevé en cas d'utilisation régulière de ces protections. Cependant, l'étude ne permet pas d'établir une relation dose-effet entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le risque de développer une opacité ou une cataracte (32).

C'est pourquoi à l'échelle européenne, l'étude EURALOC (european epidemiological study on radiation-induced lens opacities for interventional cardiologists) incluant une cohorte de 400 cardiologues interventionnels et ayant pour objectif de définir une relation dose-effet pour la cataracte radio-induite, est mise en place de 2014 à 2017 dans onze pays différents (33). Les premiers résultats de l'étude montrent un risque de développer une opacité du cristallin 2,6 fois plus élevé dans cette population exposée aux rayonnements ionisants que le groupe témoin (33). Concernant la relation dose-effet, le risque de développer une cataracte

augmenterait avec la dose de 30 % pour chaque gray reçu à l'œil et il ne semblerait pas exister de dose seuil en dessous de laquelle il n'y aurait aucun risque d'opacification radio-induite.

Une étude plus récente a mis en évidence, chez des radiologues interventionnels et des chirurgiens, une association significative entre la présence d'opacités du cristallin et leur exposition professionnelle, même à des doses très faibles de rayonnements ionisants, dès 10 mSv d'exposition du cristallin cumulée sur leur carrière (34).

La littérature scientifique étudiant le lien entre le risque de développer une cataracte et l'exposition aux rayonnements ionisants est moins bien documentée pour les radiologues que pour les cardiologues interventionnels. Paradoxalement, les radiologues sont exposés au cours de leurs opérations à des doses de rayonnements ionisants similaires, voire plus importantes (17).

b) Exposition cérébrale et lésions radio-induites

Même si l'utilisation des équipements de protection collective diminue efficacement l'exposition de l'opérateur aux rayonnements ionisants, la tête n'est pas complètement protégée et reste exposée à de faibles doses de rayonnements ionisants (35). En raison de la position de l'opérateur par rapport à celle du patient et du générateur de rayons X, le côté gauche de la tête est exposé à des plus fortes doses de rayonnements ionisants que le côté droit (36).

Contrairement aux recommandations de la CIPR de 1990 où le cerveau était catégorisé dans « autres tissus » (23), la publication 103 de la CIPR a pris en considération la radiosensibilité du cerveau en 2007, en lui attribuant un facteur de pondération tissulaire (W_t) distinct des autres organes (24) :

« Le risque de cancer pour le cerveau, tout en n'étant pas spécifiquement quantifiable, est jugé supérieur à celui d'autres tissus dans la fraction des tissus restants et, pour cela, un W_t de 0,01 lui est attribué ».

(1) Tumeurs cérébrales

L'association entre l'exposition à de fortes doses de rayonnements ionisants et le risque de développer une tumeur cérébrale est décrite chez certaines populations : les patients exposés à la radiothérapie, les survivants d'Hiroshima et Nagasaki (37). Cependant, les effets à long terme d'une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants sur le cerveau ne sont pas encore complètement connus. Il existe peu de données scientifiques concernant l'exposition du cerveau aux rayonnements ionisants et les conséquences sur la santé du personnel médical dans le domaine de la radiologie interventionnelle.

En 1998, deux cas de glioblastomes multiformes cérébraux sont décrits chez deux cardiologues interventionnels canadiens, soulevant la question de la causalité entre l'exposition chronique professionnelle aux rayonnements ionisants et le développement de tumeurs cérébrales chez ces praticiens (38).

Une étude plus récente de 2013 recense 31 cas de tumeurs cérébrales chez des médecins interventionnels de plusieurs pays (39).

En 2016, viennent s'ajouter de nouveaux cas de tumeurs cérébrales, avec des données disponibles pour 33 cardiologues interventionnels, 6 radiologues interventionnels, 2 cardiologues électro-physiologistes et 2 infirmières. Les tumeurs cérébrales sont en grande majorité des gliomes multiformes (40). Les données sur la localisation anatomique de la tumeur sont disponibles pour 35 des cas étudiés. Chez ces praticiens, 85 % des tumeurs se situent sur le cerveau gauche, alors que dans la population générale, la répartition des cancers cérébraux est équivalente entre l'hémisphère gauche et le droit (40). Selon les auteurs, cette inégalité de répartition peut s'expliquer par la position du générateur de rayons X à gauche de l'opérateur dans la grande majorité des actes interventionnels, entraînant ainsi une exposition plus importante de l'hémisphère cérébral gauche (40).

Une étude américaine met en évidence un risque de décès de cancer cérébral deux fois plus important parmi les praticiens exerçant des procédures interventionnelles guidées par fluoroscopie que ceux n'exerçant jamais ce type de procédure (41).

De plus, des études moléculaires montrent chez des cardiologues interventionnels un taux de dommage chromosomique deux fois plus élevé dans les lymphocytes circulants que chez les

cardiologues non exposés aux rayonnements ionisants, ce qui constitue un marqueur potentiel de cancer (42).

Même si un lien entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et le cancer cérébral en radiologie interventionnelle est biologiquement plausible, chaque étude présente des biais et il faut rester prudent sur l'interprétation de ces données. Il existe encore de nombreuses incertitudes (petits effectifs de praticiens exposés, incidence faible, utilisation ou non de moyens de radioprotection, doses d'exposition etc.) et il est pour l'instant difficile de conclure à une corrélation directe. La preuve de l'association entre l'exposition professionnelle à des faibles doses de rayonnements ionisants chez les médecins interventionnels et le risque de développer des tumeurs cérébrales reste encore incertaine.

Dans ce contexte, le LEPID met en œuvre l'étude O'RICAMS (occupational radiation-induced cancer in medical staff) sur 220 000 professionnels de santé suivis de 2003 à 2013 dans SISERI (système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements Ionisants). L'objectif est de comparer la mortalité de cette cohorte à celle de la population générale. Le risque de décès par cancer du cerveau sera analysé, avec une quantification de la relation dose-réponse. Les résultats de ce travail ne sont pas publiés à ce jour.

(2) Altérations vasculaires

Précédemment à la publication 118 de la CIPR, les atteintes du système circulatoire secondaires à une exposition aux rayonnements ionisants, n'étaient pas répertoriées (24,26). En effet, l'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le développement de lésions cardiovasculaires ou cérébrovasculaires a été définie récemment.

Les lésions vasculaires secondaires à une exposition aux rayonnements ionisants sont principalement dues à l'athérosclérose (43). L'athérosclérose radio-induite est la conséquence d'une inflammation chronique de l'artère qui peut s'expliquer initialement par un dysfonctionnement endothélial lié aux radicaux libres. L'inflammation chronique va entraîner des dommages cellulaires dans les vaisseaux pouvant conduire à la diminution du flux sanguin (44). Les principales anomalies biologiques ou cliniques constatées chez les patients exposés à des fortes doses de rayonnements ionisants et pouvant en partie expliquer le développement des pathologies vasculaires sont : l'hypercholestérolémie, l'augmentation

sérique des marqueurs de l'inflammation (interleukine 6, protéine C réactive), l'augmentation de la pression artérielle et la calcification des vaisseaux plus importante (44).

Une revue de la littérature a été réalisée sur 39 études considérant les effets d'une irradiation à faibles doses sur le risque cardiovasculaire dans différentes populations (45). Un excès de risque significatif de mortalité et d'incidence de pathologie cardiovasculaire a été mis en évidence chez les travailleurs du nucléaire et les liquidateurs de Tchernobyl dans certaines études. Seulement trois des six études chez les radiologues ou les manipulateurs en radiologie ont retrouvé des excès de pathologies cardiovasculaires. Cependant, pour l'ensemble de ces études, les auteurs ne disposaient d'aucune donnée dosimétrique et les facteurs de risques cardiovasculaires individuels n'étaient généralement pas pris en compte (45).

Une méta-analyse rappelle que les effets cellulaires et tissulaires sur le système circulatoire d'une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, ne sont pas encore suffisamment connus. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour en comprendre tous les mécanismes biologiques (46).

Dans les dernières recommandations de la CIPR 118, l'exposition aux rayonnements ionisants qu'elle soit aiguë, fractionnée ou chronique a été définie par un seuil à 0,5 Gy, correspondant à un risque de 1% de développer des maladies cardiovasculaires ou cérébrovasculaires dans la population exposée (26). Il n'est pas prouvé que le risque de développer des maladies cardiovasculaires secondaires à de faibles doses de rayonnements ionisants, soit plus élevé que celui des pathologies cérébrovasculaires. De même, il n'est pas démontré que le risque soit plus important pour une exposition aiguë que pour une exposition fractionnée ou chronique (26). Cette dose seuil de 0,5 Gy peut être atteinte pour un praticien exerçant une activité interventionnelle régulière, nécessitant un suivi renforcé des règles de radioprotection.

(3) Effets neurologiques

Les neurones, une fois différenciés, ont une prolifération quasi nulle. C'est pourquoi ils sont considérés comme peu radiosensibles. Lors d'une irradiation cérébrale, notamment à de fortes doses, des cellules à renouvellement cellulaire élevé, peuvent présenter des lésions de l'ADN secondaires à une réponse pro-inflammatoire. Ces dommages peuvent concerner les cellules souches oligodendrogiales, les cellules endothéliales, les cellules souches neurales ou encore les cellules microgliales.

Des études réalisées sur le rat montrent que l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants peut conduire à une perturbation de la neurogénèse et une modification de la signalisation cellulaire, notamment dans certaines régions cérébrales comme l'hippocampe (47). Chez l'homme, l'hippocampe est le lieu d'une prolifération neuronale importante, impliquée dans l'apprentissage, la mémoire et la modulation de l'humeur. Des effets neuropsychologiques, d'autant plus importants en cas d'exposition d'un sujet jeune, peuvent être observés en cas d'irradiation cérébrale à de fortes doses.

Certaines études se sont intéressées aux effets d'une exposition chronique à de faibles doses sur le cerveau humain. Des résultats de tests neuropsychologiques (lexique sémantique, mémoire visuelle à court terme) s'avéraient plus faibles chez des médecins interventionnels que le groupe témoin, sans mettre en évidence de relation dose-effet (48). Les auteurs ont émis l'hypothèse que l'exposition professionnelle de l'hémisphère cérébral gauche à de faibles doses de rayonnements ionisants, puisse entraîner une baisse des capacités neurocognitives, liée à une modification de la plasticité neuronale et la neurogénèse hippocampique (48).

Cependant, aucune preuve n'est démontrée concernant l'association entre l'exposition chronique professionnelle à faibles doses de rayonnements ionisants et de potentiels effets neurocognitifs. Même si le sujet reste encore largement débattu, ces données nous rappellent la nécessité d'atténuer, autant que possible, l'exposition de la tête du praticien interventionnel aux rayons X par des moyens efficaces de radioprotection.

4. Exposition des mains et lésions radio-induites

a) Radiodermite chronique

La peau est le premier organe pour lequel des effets biologiques radio-induits ont pu être observés. Dès la découverte des rayonnements X par Röntgen en 1895, les premiers cas de radiodermites sont décrits, ainsi que des cancers cutanés à partir du début des années 1900 chez les pionniers de la radiologie.

(1) Présentation clinique

Définition de la radiodermite : toute lésion cutanée secondaire à une exposition aux rayonnements ionisants. La radiodermite chronique concerne l'ensemble des lésions dues à l'exposition à des doses modérées ou faibles de rayonnements ionisants pendant de nombreuses années. Elle peut également survenir à la suite d'une radiodermite aiguë ou d'une exposition aiguë aux rayonnements ionisants.

Les radiodermites chroniques peuvent être classées de la manière suivante :

- **Radiodermite chronique simple** : la peau va s'amincir, devenir plus sèche et atrophique. Les ongles vont se strier longitudinalement et se fendiller, les empreintes digitales vont peu à peu s'effacer. On peut observer au cours de la progression de la radiodermite des troubles de la pigmentation cutanée (une hypopigmentation ou une hyperpigmentation).
- **Radiodermite chronique évolutive** : Dans les formes plus sévères et tardives peuvent survenir des ulcérations très douloureuses à fond granuleux, des fissures de la pulpe des doigts, des télangiectasies et une hyperkératose à l'aspect verruqueux au pourtour des ongles. Il peut y avoir une onycholyse, une dépilation ou une hypohidrose permanente. Ces lésions vont s'aggraver progressivement, même après l'arrêt de l'exposition aux rayonnements ionisants. L'ensemble de ces lésions et la fibrose dermique vont engendrer une gêne fonctionnelle et des douleurs.
- **Radiodermite chronique cancérisée** : la dégénérescence néoplasique se développe à partir des ulcérations et des cornes cutanées à la phase tardive, plusieurs décennies après l'exposition aux rayonnements ionisants. Sur le plan clinique, elle se présente sous la forme de zones ulcérées qui ne cicatrisent pas, à bords infiltrés et au fond bourgeonnant. Les types histologiques les plus courants sont : la maladie de Bowen, le carcinome épidermoïde et le carcinome basocellulaire.

Le diagnostic de radiodermite chronique est clinique et étiologique, la biopsie cutanée étant peu spécifique. Les radiodermites qu'elles soient aiguës ou chroniques, peuvent faire l'objet d'une déclaration en maladie professionnelle (tableau n°6 pour le régime général et tableau n°20 pour le régime agricole).



Radiodermite chronique du pouce chez un radiologue de 56 ans : atrophie de la peau péri-unguëale squameuse et fragilité unguéale anormale avec sillons longitudinaux parallèles atteignant la partie supérieure de la lame unguéale. La lésion kératosique est une maladie de Bowen (49).

(2) Physiopathologie

Les radiodermites chroniques résultent d'une déplétion tardive et progressive des cellules à renouvellement faible du tissu cutané.

(a) Altérations cellulaires

La peau est un organe à renouvellement permanent. L'exposition aux rayonnements ionisants peut interférer avec la maturation, la formation normale des cellules basales épidermiques et la matrice capillaire. Des lésions peuvent se produire au niveau des fibroblastes, du système vasculaire cutané avec atteinte des cellules endothéliales et sur les cellules de Langerhans pouvant altérer la réponse immunitaire (50). Lors d'une exposition cutanée aux rayonnements ionisants, une combinaison de processus pro-inflammatoires va se mettre en place, initiée en partie par la sécrétion de l'interleukine-1 par la cellule irradiée, transmettant ainsi le signal de l'agression aux cellules souches mésenchymateuses. La formation de radicaux libres va entraîner des lésions de l'ADN et des altérations des constituants du tissu cutané (protéines, lipides, glucides) (50).

(b) Altérations tissulaires

Les dommages radio-induits des cellules endothéliales vont activer les composants du système de coagulation, ce qui va favoriser la production de cytokines inflammatoires. La thrombine va intervenir dans la régulation de la prolifération cellulaire, la synthèse de TGF- β (transforming growth factor beta) et la perméabilité endothéliale vasculaire (50,51).

Le peptide TGF- β joue un rôle fondamental dans le contrôle de la prolifération de différents types de cellules lors de l'irradiation du tissu et est impliqué dans le développement de la radiodermite chronique. Ce peptide stimule la sécrétion de la protéine de la matrice extracellulaire, dans les tissus conjonctifs, via l'activation des fibroblastes et participe à la fibrose tissulaire. De plus, il augmente la prolifération des cellules endothéliales et le chimiotactisme des macrophages, favorisant ainsi le processus de néoangiogenèse. La prolifération des petites artères et artérioles peut évoluer vers une thrombose ou une obstruction des vaisseaux (51).

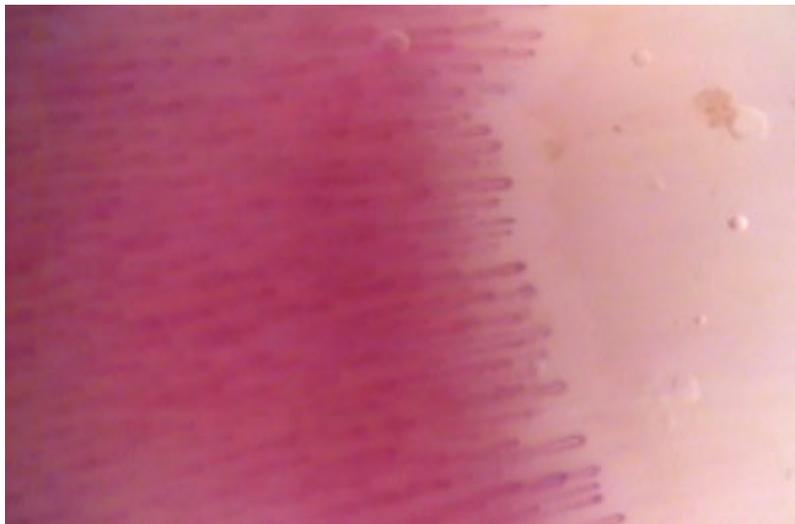
Après une irradiation significative, des perturbations cellulaires peuvent persister dans le tissu conjonctif avec une altération des fibroblastes, entraînant une contraction des tissus et une fibrose cutanée. A long terme il y a une destruction des fibroblastes dermiques et une production insuffisante de collagène, conduisant à un derme atrophique et mince (52). L'infiltration leucocytaire du tissu et les lésions vasculaires induites par l'inflammation participent au développement de l'atrophie parenchymateuse et à la fibrose. Bien que les mélanocytes soient relativement peu radiosensibles, si la dose de rayonnement est suffisante pour détruire ces cellules, elle peut entraîner une hypopigmentation. L'accumulation de matrice extracellulaire, la dysfonction des cellules endothéliales, l'augmentation des cytokines et la fibrose vont ainsi retarder la réparation du tissu cutané lésé (52).

b) Lésions microvasculaires et apport de la capillaroscopie

Comme nous l'avons vu précédemment, les rayonnements ionisants peuvent causer des dommages sur la microcirculation cutanée. La clinique de la radiodermite chronique étant tardive, la capillaroscopie (examen non invasif basé sur l'observation en microscopie optique de la distribution capillaire), permet de déceler des lésions vasculaires au stade le plus précoce. Dès 1920, la capillaroscopie est utilisée pour l'observation des effets in vivo des

rayonnements ionisants sur la peau. Ce n'est qu'à partir des années 1970 que cette technique va réellement se développer avec une sémiologie bien décrite des anomalies radio-induites.

La seule localisation de la microvascularisation, réellement observable in vivo par capillaroscopie, se trouve au niveau sous-unguéal. L'observation des anses capillaires couchées sur le rebord péri-unguéal, permet leur étude quantitative et morphologique (1). Normalement, les capillaires présents dans le lit unguéal forment des anses disposées en épingle à cheveux sur plusieurs rangées de capillaires, dont les trois à quatre premières sont observables. Il existe des variations anatomiques des capillaires en dehors de toute pathologie. La présence de dystrophies mineures est normale si elles ne dépassent pas 10 % de l'ensemble des anses (1).



Aspect normal d'une capillaroscopie sous-unguéale.

On peut caractériser deux types d'anomalies capillaroscopiques (1) :

- Les anomalies qualitatives : supérieures à 10 % de dystrophies mineures ou présence de dystrophies majeures (mégacapillaires, aspect en feuille de fougère etc.),
- Les anomalies quantitatives des capillaires.

Les capillaires du lit sous-unguéal sont formés exclusivement de cellules endothéliales très radiosensibles et constituent des marqueurs de l'exposition aux rayonnements ionisants au niveau des doigts.

Diverses altérations microvasculaires peuvent ainsi être observées (1) :

- Extravasation avec formation d'un œdème,
- Réduction de la lumière du capillaire, voire la disparition complète du vaisseau, se traduisant par une diminution du nombre d'anses,
- Présence de microanévrismes et de télangiectasies.

c) Exposition des mains du praticien interventionnel

Les complications cutanées secondaires à une exposition à de fortes doses de rayonnements ionisants, sont bien documentées. Ainsi, les dermites radio-induites sont des effets fréquemment décrits chez les patients traités par radiothérapie externe ou, plus récemment, par procédure interventionnelle.

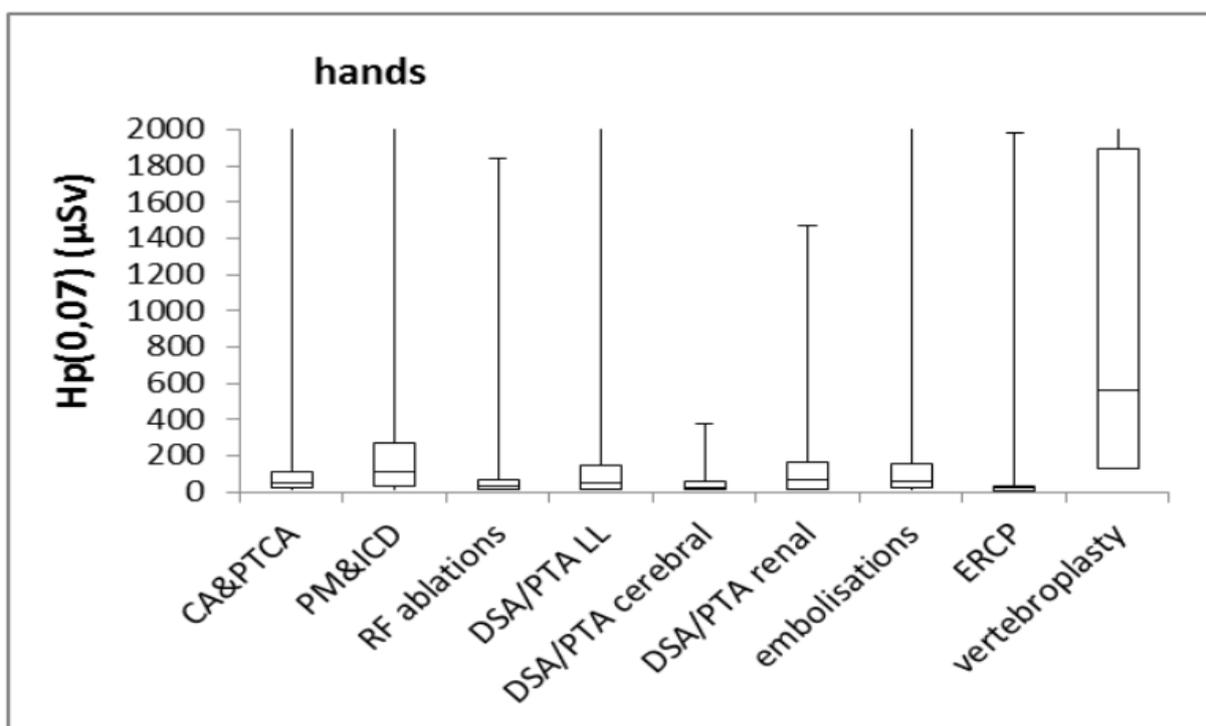
Les mains des praticiens interventionnels sont exposées à de faibles doses de rayonnements ionisants de façon répétée, particulièrement lorsqu'elles sont proches du faisceau primaire du générateur de rayons X. Le développement des techniques d'imagerie interventionnelle et la hausse du nombre d'actes réalisés, entraînent une majoration de l'exposition des mains des opérateurs, pouvant conduire dans de rares cas, à des complications cutanées ou vasculaires.

Les procédures interventionnelles peuvent être classées en trois catégories, selon le type de voie d'abord utilisée et la distance séparant l'opérateur du faisceau direct du générateur de rayons X (53) :

- Les procédures proximales, par voie percutanée, où les mains du praticien sont très proches voire même dans le champ d'irradiation, avec un risque d'exposition directe au faisceau primaire (au cours des drainages biliaires).
- Les procédures distales proches où les extrémités restent à 10-20 cm du milieu diffusant, où le risque d'exposition est dû principalement au rayonnement diffusé (les procédures cardiaques avec abord radial).
- Les procédures distales lointaines, où les mains se situent au moins à 50 cm du milieu diffusant avec un risque d'exposition lié uniquement au rayonnement diffusé (les artériographies cérébrales avec voie d'abord fémorale).

Les doses enregistrées aux mains chez les praticiens interventionnels présentent une grande disparité selon le type de procédure réalisée et la localisation anatomique traitée (54). Les procédures radiologiques, par voie percutanée, exposent de façon plus importante les mains de l'opérateur que celles par voie d'abord vasculaire. La dosimétrie moyenne par acte percutané est de 0,92 mSv pour la main la plus proche du générateur de rayons X (55). Ainsi, elle est considérée comme la plus irradiante, alors que la voie d'abord fémorale est celle présentant la plus faible exposition aux rayonnements ionisants (55).

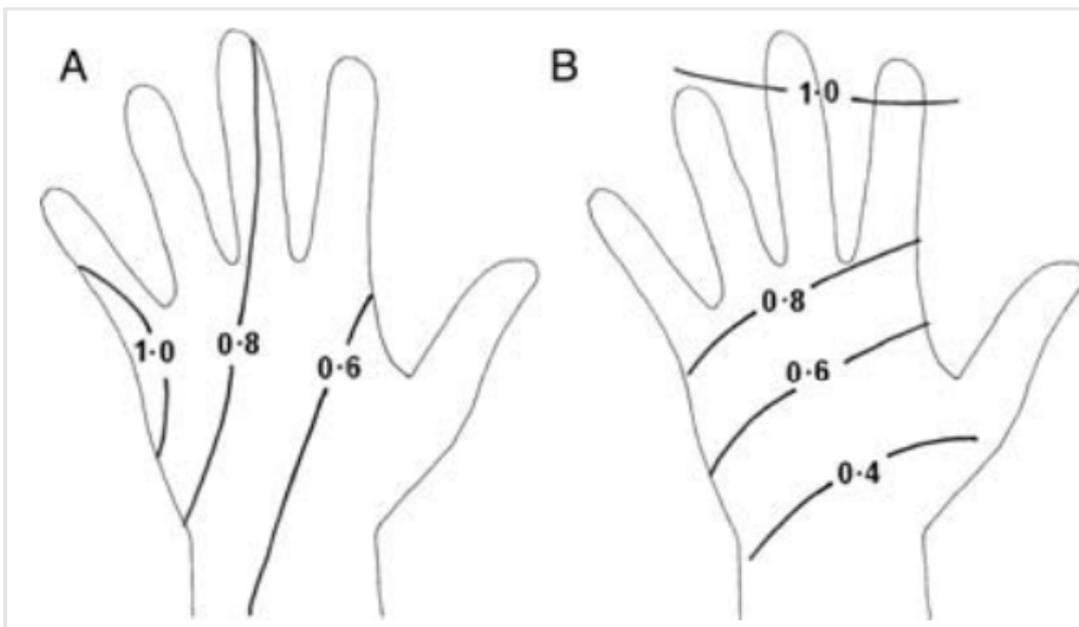
Pour une même procédure, les expositions des mains peuvent être très variables avec de larges intervalles de dose, en fonction de divers paramètres : l'utilisation ou non des moyens de radioprotection, l'expérience et la rapidité de l'opérateur à réaliser le geste (55). L'opérateur est exposé de façon plus importante aux rayons X au niveau des mains, avec une dosimétrie moyenne respectivement de 1,8 mSv pour les vertébroplasties et de 0,77 mSv pour les drainages biliaires (56). En effet, au cours de ces procédures percutanées, le praticien peut être amené à réaliser son geste directement dans le champ d'irradiation. L'étude ORAMED montre des dosimétries des mains pouvant atteindre plusieurs millisieverts (mSv) pour une procédure de vertébroplastie (57).



Notes de lecture : cardiac angiographies/cardiac angioplasties (CA/PTCA), pacemaker and defibrillator implantations (PM/ICD), radiofrequency ablations (RF ablations), , angiographies and angioplasties of lower limbs (DSA/PTA LL), cerebral (DSA PTA cerebral), reins (DSA/PTA renal), endoscopic retrograde cholangio-pancreatography (ERCP).

Dosimétrie des mains par type de procédure : résultats de l'étude ORAMED (57).

Comme l'opérateur utilise sa main dominante pour monter le guide, c'est sa main non dominante, le plus souvent la main gauche, qui est la plus proche du faisceau et donc la plus exposée. Concernant les procédures par voie d'abord fémorale, c'est le bord interne de la main, l'auriculaire et l'annulaire, qui reçoivent les plus fortes doses. Un dosimètre bague, porté sur l'index, peut ainsi sous-estimer la dose maximale de 10 à 30 % (54). Pour les procédures percutanées, lorsque la main de l'opérateur est dans le faisceau primaire des rayonnements, l'extrémité distale de l'index et du majeur est la plus exposée (54).



Notes de lecture : le chiffre représente la distribution de la dose selon les différentes régions anatomiques des mains.

Distribution de dose à la main gauche : pour les procédures interventionnelles utilisant l'accès fémoral en A et pour les procédures percutanées en B (54).

Au sein d'un même service de radiologie interventionnelle, des dosimétries des mains très différentes peuvent s'observer chez les praticiens. En 2010, une étude de l'IRSN rapporte des estimations annuelles des doses enregistrées à l'index gauche variant de 45 à 185 mSv chez six neuroradiologues (1).

Une première étude réalisée chez 145 médecins, dont une majorité de radiologues exposés professionnellement aux rayonnements ionisants, a permis de conclure à une augmentation des anomalies observées à la capillaroscopie par rapport au groupe non exposé. L'atteinte du lit unguéal était d'autant plus importante que le nombre d'années d'exercice était élevé (58).

De 2001 à 2003, une seconde étude menée chez 39 médecins effectuant des actes de radiologie interventionnelle, a permis de préciser les types de radiolésions microvasculaires les plus fréquemment retrouvés à la suite d'une exposition chronique : une raréfaction des capillaires, une dystrophie, une hétérogénéité et une irrégularité de la distribution des anses, un œdème et une néovascularisation typique en bouquets (59).

Enfin une étude plus récente a confirmé ces résultats préliminaires et précisé les différents facteurs d'exposition influençant l'apparition des anomalies capillaires. Une cohorte regroupant 187 professionnels exposés (56 cardiologues, 66 chirurgiens, 64 radiologues) et 35 professionnels témoins, a été suivie afin d'étudier les altérations capillaires (indice morphologique et d'extravasation) (60). Les anomalies morphologiques des capillaires (néogenèse, dystrophies mineures et majeures, distribution anormale et trajet irrégulier) étaient, de manière significative, plus fréquentes chez les radiologues et les chirurgiens que chez les praticiens non exposés, ce qui n'était pas le cas chez les cardiologues. Pour les radiologues et les chirurgiens, ces altérations morphologiques des capillaires étaient manifestement associées au nombre d'années d'exposition professionnelle, à la quantité d'actes réalisés et à la dosimétrie extrémités (60).

Grâce à la mise en place d'une démarche de radioprotection efficace, les cas de radiodermite chronique déclarés chez le personnel médical exposé aux rayonnements ionisants, ont quasiment disparu au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Depuis le développement des techniques de radiologie interventionnelle, à partir des années 1970, on observe une augmentation de l'exposition des mains aux rayonnements ionisants chez les médecins exerçant ces actes.

Un premier cas de radiodermite chronique des mains a ainsi été déclaré en France en 1998, chez un radiologue ayant pratiqué des actes interventionnels du rachis de 1978 à 1998, avec une dose cumulée aux mains de 10 Gy, correspondant à une dose annuelle moyenne de 500 mSv (61). Le réseau national des centres de pathologie professionnelle a alors été interrogé sur la réapparition d'affections cutanées dues aux rayonnements ionisants chez le personnel médical. Quatre signalements supplémentaires de cas de radiodermite chronique ont été signalés (deux chirurgiens et deux médecins généralistes ayant réalisé des scopies par rayons X) (62). Plus récemment, un cas de radionécrose de l'index gauche chez un chirurgien

orthopédiste coréen, pratiquant des actes interventionnels, a été déclaré en 2014, dans un contexte de radiodermite chronique bilatérale des mains (63).



Lésion ulcéraive du deuxième doigt dans un contexte de radiodermite bilatérale chez un chirurgien orthopédiste (63).



Radionécrose de l'index gauche dans un contexte de radiodermite bilatérale chez un chirurgien orthopédiste (63).

Concernant les radiodermites chroniques observées, les doses cumulées sont importantes, dépassant généralement les 10 Gy, avec des expositions répétées aux rayonnements ionisants de plusieurs millisieverts par jour sur plusieurs années.

Même si les cas de radiodermites chroniques déclarés restent exceptionnels, ils constituent une préoccupation importante pour le suivi des travailleurs exposés. Le lien entre l'augmentation des radiodermites chroniques professionnelles et le développement de l'activité de radiologie interventionnelle, est possible et nécessite une évaluation spécifique de l'exposition des mains aux rayonnements ionisants.

C. Radioprotection

1. Définition et grands principes

Selon l'article L591-1 du code de l'environnement, la radioprotection est l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement.

Grâce à l'amélioration des connaissances scientifiques et à l'évolution des recommandations en matière de radioprotection, trois grands principes sont actés : la justification, l'optimisation et la limitation de l'exposition aux rayonnements ionisants.

a) Justification

Toute activité susceptible de soumettre des personnes à une exposition aux rayonnements ionisants, doit être justifiée au regard des avantages en matière sanitaire, sociale, ou scientifique qu'elle procure, comparativement aux risques associés à cette exposition.

b) Optimisation

Lorsqu'une exposition aux rayonnements ionisants ne peut être évitée, il est nécessaire de maintenir le niveau d'exposition le plus bas possible en tenant compte des techniques utilisées et des connaissances scientifiques. Il s'agit du principe ALARA (as low as reasonably achievable).

Afin d'optimiser et de réduire l'exposition, on peut agir sur différents facteurs :

- La source (réduction de l'intensité, paramétrage du générateur de rayons X),
- Utilisation d'écrans de protection afin d'atténuer le rayonnement,
- Réduction du temps d'exposition au strict nécessaire,
- Augmentation de la distance par rapport à la source (l'exposition étant inversement proportionnelle au carré de la distance).

c) Limitation

Le principe de limitation s'applique essentiellement pour le public et les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, mais pas pour les patients. En France, la réglementation nationale de la santé publique et du travail, détermine des limites de doses individuelles cumulées à ne pas dépasser. Des valeurs limites réglementaires sont ainsi définies par les articles R. 4451-6 à R. 4451-8 du Code du travail pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Ces limites réglementaires sont fixées de façon que les effets déterministes ne se produisent pas et que l'apparition des effets stochastiques soit limitée.

2. Réglementation relative à la radioprotection

a) Evaluation du risque

Les dispositions du code du travail, résultant de la transposition de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013, s'appliquent dès lors que les travailleurs sont susceptibles d'être exposés aux rayonnements ionisants d'origine naturelle ou artificielle. L'employeur a pour obligation de prendre des mesures de prévention afin de supprimer ou de réduire le risque lié aux rayonnements ionisants. Si l'exposition ne peut être évitée après la mise en place d'équipements de protection collective (EPC), l'employeur doit mettre à disposition de ses salariés, des équipements de protection individuelle (EPI) appropriés et adaptés aux conditions de travail.

Une évaluation individuelle de l'exposition aux rayonnements ionisants doit être réalisée avant l'affectation. Une estimation de la dose efficace et des doses équivalentes que le travailleur est susceptible de recevoir sur les douze mois consécutifs à venir, est nécessaire. L'employeur, en s'appuyant sur cette évaluation, sur les avis du médecin du travail et de la

personne compétente en radioprotection (PCR), classe les travailleurs en fonction des expositions potentielles et prévisibles du poste de travail.

b) Classement des travailleurs

Sur la base de l'évaluation individuelle préalable, les travailleurs sont classés en deux catégories : catégorie A ou B.

Selon l'article R. 4451-57 du Code du travail :

- Sont classés en catégorie A, les travailleurs susceptibles de recevoir sur douze mois consécutifs :
 - Une dose efficace supérieure à 6 mSv,
 - Et/ou une dose équivalente supérieure à 150 mSv pour la peau et/ou les extrémités.
- Sont classés en catégorie B, tous les autres travailleurs susceptibles de recevoir sur douze mois consécutifs :
 - Une dose efficace supérieure à 1 mSv,
 - Et/ou une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin et/ou à 50 mSv pour la peau et/ou les extrémités.

Il n'existe pas de classement en catégorie A au titre de l'exposition du cristallin. Les travailleurs de moins de 18 ans et les femmes enceintes ne peuvent être classés en catégorie A. Une information sur les risques liés à l'exposition des rayonnements ionisants et une formation spécifique renouvelée tous les trois ans, doivent être mises en place par l'employeur pour les travailleurs classés.

c) Délimitation du zonage radiologique

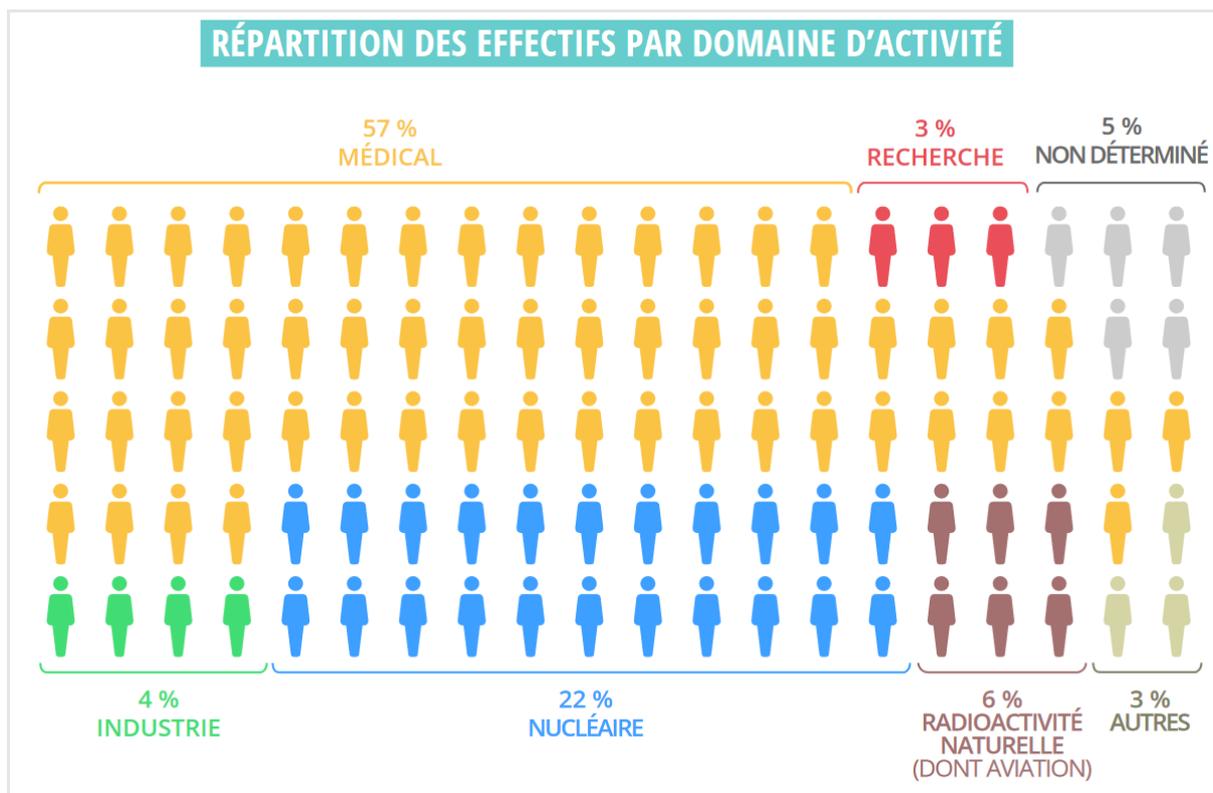
Il convient d'identifier les sources de rayonnements ionisants et les lieux de travail où l'exposition des travailleurs est susceptible de dépasser certains niveaux réglementaires. Si les niveaux d'exposition sont dépassés, alors l'employeur délimite un zonage. En salle de radiologie interventionnelle, l'émission de rayonnements ionisants par les générateurs de rayons X n'est pas continue. C'est pourquoi, on peut parler de zone contrôlée intermittente en déterminant un zonage spécifique quand l'appareil est en fonctionnement et un autre zonage quand le générateur est à l'arrêt. Les limites de zone doivent être signalisées et matérialisées par un affichage.

Concernant le risque d'exposition des extrémités et de la peau (64) : *une seule zone, dénommée « zone d'extrémités », est désormais retenue pour matérialiser ce risque en lieu et place des zones surveillées ou contrôlées. Par ailleurs, cette zone n'est mise en place que lorsque la zone délimitée au titre de la dose efficace ne permet pas de garantir le respect des valeurs limites d'exposition professionnelle pour les extrémités et la peau.*

Pour le risque d'exposition du cristallin (64) : *Aucune zone n'est délimitée au titre de l'exposition du cristallin. Néanmoins, une signalisation adaptée est mise en place lorsque la délimitation réalisée au titre de la dose efficace ne permet pas de garantir le respect des valeurs limites d'exposition professionnelle pour le cristallin (art. R.4451-24). Elle permet au travailleur d'identifier le danger et d'être informé des éventuels équipements de protection individuelle nécessaires.*

d) Surveillance individuelle de l'exposition

Chaque année, l'IRSN analyse les données dosimétriques recueillies et établit un bilan de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France. Concernant le bilan de 2018, 390 363 travailleurs ont été suivis. 57 % de ces travailleurs appartiennent au domaine médical, avec une augmentation de 6 % de l'effectif par rapport à 2017. Les activités de radiologie (radiodiagnostic et radiologie interventionnelle) regroupent l'effectif le plus important (40 %).



Répartition des effectifs de travailleurs suivis pour une exposition aux rayonnements ionisants en France (bilan de l'IRSN de 2018).

La surveillance de l'exposition individuelle des travailleurs mise en œuvre par l'employeur répond à deux objectifs :

- Réduire l'exposition du travailleur aussi basse que possible,
- S'assurer du respect des valeurs limites réglementaires fixées.

Tout travailleur classé en catégorie A ou B ou tout travailleur dont la dose efficace liée à son exposition au radon est susceptible de dépasser 6 mSv, fait l'objet d'une surveillance dosimétrique (art. R.4451-64 et R.4451-65). Cette surveillance est individuelle, nominative et adaptée aux modes d'exposition et aux types de rayonnements. La surveillance dosimétrique individuelle doit être confiée à des organismes accrédités (art. R.4451-65), afin de garantir la qualité et l'indépendance des mesures et des analyses effectuées. Cette surveillance dosimétrique individuelle peut également être confiée à l'IRSN, en application de l'article R.4451-134.

Lorsque l'exposition est externe, la surveillance dosimétrique individuelle est réalisée au moyen de dosimètres à lecture différée, adaptés à la nature des rayonnements ionisants, au

contexte et aux parties du corps exposées. En cas d'exposition inhomogène, lorsque l'exposition du corps entier n'est pas représentative de l'exposition des extrémités, de la peau ou du cristallin, le dosimètre poitrine doit être complété par des dosimètres permettant de mesurer les expositions localisées. Le dosimètre est renouvelé et analysé au minimum tous les mois pour les travailleurs en catégorie A et tous les trois mois pour ceux en catégorie B.

Le principe de fonctionnement des dosimètres passifs, repose sur l'intégration d'une dose par modification d'une caractéristique physique ou chimique du matériau détecteur. La dosimétrie passive est assurée au moyen de dosimètres faisant appel à différentes techniques de détection des rayonnements telles que :

- Le dosimètre thermoluminescent (TLD) : des électrons présents dans la structure du détecteur sont arrachés par les rayonnements ionisants, et sont ensuite piégés par les impuretés contenues dans le matériau. La luminescence créée par le chauffage du détecteur TLD, est proportionnelle au nombre d'électrons piégés et donc à la dose reçue par le dosimètre.
- La radio photoluminescence (RPL) utilisée notamment pour la dosimétrie poitrine.

(1) Suivi dosimétrique et radioprotection du cristallin

(a) Dosimètre cristallin

Pour surveiller et mesurer l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants, il faut utiliser un dosimètre spécifique ayant certaines propriétés :

- Le dosimètre doit permettre la mesure de la dose équivalente du cristallin Hp (3), avec une profondeur de référence de 3 mm qui simule l'épaisseur de l'œil.
- Un seuil de détection réglementaire de 100 μ Sv.

C'est dans ce contexte, que l'IRSN a développé un dosimètre cristallin DOSIRIS, afin de mesurer l'équivalent de dose Hp (3). Le détecteur est constitué de fluorure de lithium et utilise la technologie TLD. Il doit être placé au plus près de l'œil le plus exposé, sous les équipements de protection individuelle.



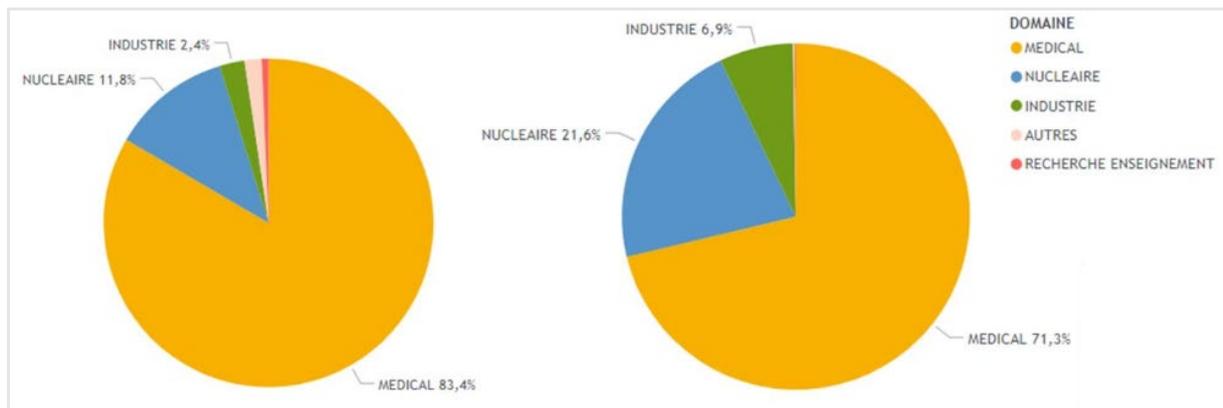
Exemple de port du dosimètre DOSIRIS.

(b) Valeurs limites d'exposition du cristallin

La directive EURATOM 2013/59, basée sur l'avis de la CIPR datant de 2011 et sur les normes de radioprotection de l'AIEA, est reprise dans le code du travail par le décret du 4 juin 2018. Les valeurs limites d'exposition (VLE) du cristallin sont ainsi modifiées : l'article R.4451-6 du code du travail fixe cette VLE à 20 mSv sur douze mois consécutifs à partir du 1^{er} juillet 2023, alors qu'auparavant cette VLE était de 150 mSv. La période du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2023 est une période transitoire, pendant laquelle la VLE cumulée du cristallin est fixée à 100 mSv, sans dépasser 50 mSv par année. L'article R.4451-8 fixe maintenant la VLE du cristallin pour les jeunes travailleurs à 15 mSv par an. La VLE du cristallin pour le public est maintenue à 15 mSv.

(c) Suivi de l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants

L'étude des données de dosimétrie du cristallin, enregistrées dans SISERI, montre une augmentation de l'effectif suivi : 3 492 travailleurs en 2018 contre 2 505 en 2017, 1 798 en 2016 et 200 en 2015. En 2018, 83 % de l'effectif provient du domaine des activités médicales et vétérinaires et 12 % du domaine du nucléaire. Concernant les doses reçues, 71 % de la dose totale (1,9 Sv) est liée au domaine des activités médicales et vétérinaires et 22 % au domaine du nucléaire (65).



Répartition des effectifs suivis (à gauche) et des doses enregistrées au cristallin (à droite) en 2018 (65).

La dosimétrie du cristallin, dans le domaine des activités médicales et vétérinaires, a vu son effectif passer de 186 travailleurs en 2015 à 2 914 en 2018 :

- 70 % des travailleurs suivis pour le cristallin ont reçu une dose inférieure au seuil d'enregistrement,
- 27 % des travailleurs ont eu une exposition du cristallin entre le seuil d'enregistrement et 5 mSv,
- 3 % d'entre eux ont reçu entre 5 et 20 mSv.

L'analyse des résultats par secteur montre que 54 % de l'effectif suivi exerce dans le secteur de la radiologie interventionnelle, secteur qui contribue à 52 % de la dose totale. En 2018, c'est en radiologie (radiodiagnostic et radiologie interventionnelle) que sont enregistrées trois des quatre doses au cristallin supérieures à 20 mSv. La dose individuelle maximale enregistrée au cristallin est de 53,4 mSv (contre 44,1 mSv en 2017, 21,8 mSv en 2016 et 5,05 mSv en 2015) et concerne un radiologue interventionnel (65).

Les doses reçues à la main gauche sont les plus élevées de l'ensemble du corps. Cependant, il faut pondérer ces valeurs en fonction de la limite annuelle réglementaire. Elle est de 500 mSv pour les extrémités et de 20 mSv pour le cristallin. En tenant compte de ces données, l'œil est la partie du corps la plus exposée lors des actes interventionnels (66).

(2) Suivi dosimétrique et radioprotection des mains

(a) Dosimétrie des extrémités mains

La surveillance dosimétrique de l'exposition des mains aux rayonnements ionisants, se fait à l'aide de dosimètres bagues. En effet, les dosimètres poignets peuvent sous-estimer la dose jusqu'à un facteur 3. Le dosimètre bague doit mesurer la dose équivalente $H_p(0,07)$, représentant la profondeur de référence de 0,07 mm de la peau. La bague dosimètre de l'IRSN utilise aussi le fluorure de lithium comme matériau détecteur et est analysé par thermoluminescence (TLD).

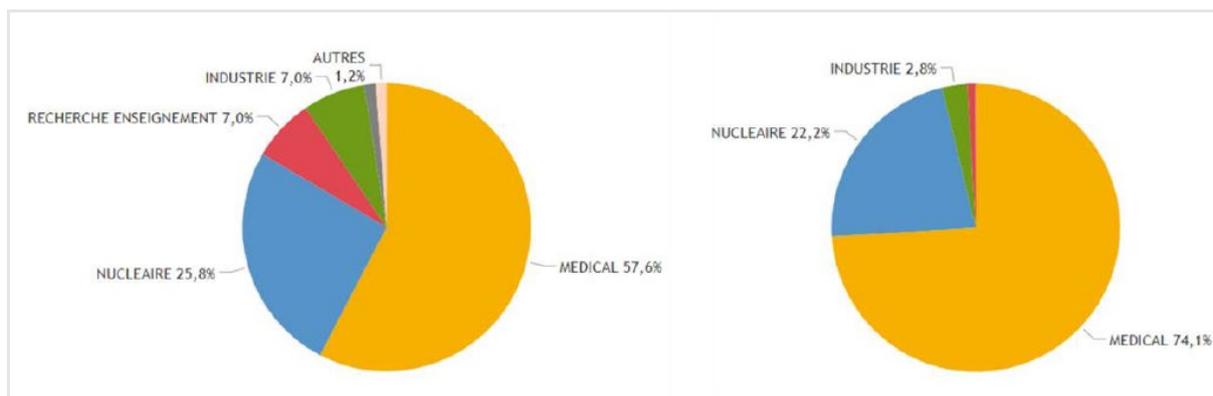
Nous avons vu précédemment que l'exposition des mains de l'opérateur varie selon le type de procédure interventionnelle. Bien que l'exposition de l'index soit la plus forte lorsque l'opérateur a les mains dans le faisceau primaire, cette situation est relativement rare dans l'activité du radiologue. C'est pourquoi, en dehors d'une activité quasi exclusive d'actes percutanés, il est recommandé de porter le dosimètre bague sur l'auriculaire gauche qui est le doigt le plus proche du tube à rayons X.

(b) Valeurs limites d'exposition des extrémités

Selon l'article R. 4451-13 du code du travail, les limites de doses équivalentes pour les différentes parties du corps exposées sont les suivantes : pour les mains, les avant-bras, les pieds et les chevilles, l'exposition au cours de douze mois consécutifs ne doit pas dépasser 500 mSv. Pour la peau également, l'exposition ne doit pas dépasser 500 mSv mais s'applique à la dose moyenne sur toute surface de 1 cm², quelle que soit la surface exposée.

(c) Suivi de l'exposition des extrémités aux rayonnements ionisants

En 2018, 27 627 travailleurs bénéficient d'un suivi pour une exposition des extrémités (65). Les 88 % des travailleurs portant des bagues, représentent la quasi-totalité de la dose totale reçue aux extrémités (65).



Répartition des effectifs suivis (à gauche) et des doses enregistrées (à droite) aux extrémités en 2018 (65).

Le domaine des activités médicales et vétérinaires représente 57 % de l'effectif total des travailleurs suivis et 74 % de la dose totale enregistrée. Le secteur de la radiologie comprend 54 % de l'effectif total suivi aux extrémités (35 % pour le radiodiagnostic et 19 % pour la radiologie interventionnelle). Cependant, c'est la médecine nucléaire qui contribue pour plus de la moitié (54 %) à la dose totale enregistrée dans le domaine médical. La radiologie interventionnelle représente quant à elle, 15 % de la dose totale. 59 % des travailleurs du domaine médical et vétérinaire enregistrent une dose en dessous du seuil, 40 % une dose comprise entre le seuil d'enregistrement et 150 mSv, le reste une dose comprise entre 150 et 500 mSv (65).

Activités médicales et vétérinaires	Effectif suivi	Dose totale (H.mSv)	Répartition des effectifs par classes de dose				
			< seuil	≥ seuil et < 50 mSv	≥ 50 et < 150 mSv	≥ 150 et < 500 mSv	≥ 500 mSv
Radiologie interventionnelle	4 941	15,18	3 404	1 467	62	6	2

Surveillance de l'exposition des extrémités par bague en radiologie interventionnelle en 2018 (65).

En radiologie interventionnelle, 4 941 personnes sont suivies. Parmi elles, on retrouve deux des trois dépassements de la limite réglementaire de la dose équivalente aux extrémités, avec des valeurs de 569,7 mSv et 754,4 mSv. Cette dernière valeur étant la plus forte dose enregistrée en 2018 (65). Le risque de dépassement de la dose seuil des extrémités, fixée à 500 mSv sur douze mois consécutifs, reste relativement rare chez les radiologues interventionnels (67).

Cependant, 69 % des travailleurs suivis en radiologie interventionnelle, présentent une dosimétrie en dessous du seuil de détection. En analysant les résultats des bilans 2017 et 2018, l'IRSN constate que la répartition de la dosimétrie bague présente des incohérences, avec des variations importantes entre les différentes classes de dose. En effet, ce secteur regroupe la majorité des doses maximales enregistrées et un taux élevé de travailleurs avec des dosimétries inférieures au seuil d'enregistrement. Ces observations interrogent sur le port effectif du dosimètre bague dans le secteur de la radiologie interventionnelle (65).

SOUS- SECTEUR	Effectifs	Dose moyenne (mSv)	% < seuil	Valeur indiv. Maximale (mSv)
Radiologie interventionnelle (sous-secteur non précisé)	3 104	2,5	73	754,4
Radiologie interventionnelle - Cardiologie	1 004	5,2	52	154,4
Radiologie interventionnelle - Vasculaire	213	6,0	56	252,3
Radiologie interventionnelle - Neurologie	53	3,3	66	119,7
Radiologie interventionnelle - Autre	567	1,6	80	267,1
Total	4 941	3,1	69	754,4

Résultats de dosimétrie bague pour les sous-secteurs de la radiologie interventionnelle en 2018 (65).

Compte tenu de l'exposition en radiologie interventionnelle, le pourcentage de médecins ayant une dose aux mains inférieure au seuil d'enregistrement devrait être quasi nul. On peut ainsi en conclure que la majorité des dosimètres en dessous du seuil de détection ne sont pas portés, ce qui correspond à 69 % des dosimètres. Le port insuffisant du dosimètre bague empêche la détection des situations anormales d'exposition des mains aux rayonnements ionisants (65).

3. Recommandations de radioprotection en radiologie interventionnelle

a) Equipements de protection individuelle

(1) Radioprotection du cristallin

Il existe différents types de protection oculaire contre les rayonnements ionisants : lunettes, sur-lunettes et visières plombées. Bien que l'atténuation théorique des lunettes plombées avec une équivalence de 0,5 mm d'épaisseur de plomb soit de 97 % (68), l'efficacité des lunettes plombées ne peut pas être déterminée uniquement par ce marqueur. Selon le modèle de lunettes testé, l'atténuation varie d'un facteur 3 à 7 (69). La forme de la protection et

l'orientation de l'exposition aux rayons X sont à prendre en compte (70). Des verres de 0,5 mm offrent une protection suffisante et les lunettes larges ajustées au visage ou dotées de protections latérales sont plus efficaces. C'est pourquoi, il est recommandé aux praticiens interventionnels, de porter des lunettes de protection fournissant un blindage latéral ou une protection qui couvre l'ensemble du visage telle qu'une visière plombée (69,70).

Malgré l'exposition significative des yeux aux rayonnements ionisants et les recommandations internationales, l'utilisation des équipements de protection individuelle reste insuffisante chez les radiologues interventionnels (66). La majorité des opérateurs portent un tablier de protection et un protège-thyroïde. Cependant, seulement 25 % des opérateurs utilisent des lunettes plombées (66). L'inconfort ressenti lors du port de lunettes plombées peut constituer un frein à leur utilisation. Il faut trouver l'équilibre entre la protection plombée et son ergonomie.

(2) Radioprotection des mains

Comme nous l'avons vu précédemment, lors des actes interventionnels les mains de l'opérateur peuvent être exposées à la fois par le rayonnement diffusé du patient et par le rayonnement du faisceau direct. Des équipements de protection individuelle spécifiques ont été développés, notamment des gants plombés « radio-atténuateurs ». Cependant, lors de la production de l'image par le générateur de rayons X, il y a une automatisation du réglage des paramètres avec une augmentation de la tension et de l'intensité lorsqu'une structure dense, telle que des gants plombés, est détectée dans le champ d'irradiation.

C'est dans ce contexte, qu'une étude française a évalué l'efficacité des gants radio-atténuateurs plombés en radiologie vasculaire. Les auteurs mettent en évidence une augmentation de la dose enregistrée aux mains avec l'utilisation des gants radio-atténuateurs, pouvant aller jusqu'à 42 %. En effet, les gants modifient le paramétrage automatique du matériel radiologique quand la main se trouve dans le faisceau direct (71). Non seulement les gants plombés augmentent la dose aux mains de l'opérateur mais aussi la dose délivrée au patient. L'opérateur, se pensant protégé, peut être incité à laisser plus longtemps ses mains dans le champ primaire (71). L'utilisation des gants plombés n'est donc pas recommandée en pratique. Ainsi, afin de limiter l'exposition des mains en radiologie interventionnelle, il est essentiel d'éviter au maximum de les positionner dans le faisceau direct d'irradiation.

b) Equipements de protection collective

En salle de radiologie interventionnelle, différents équipements de protection collective plombés (suspension plafonnière, bas volet, cabine ou écran mobile) peuvent être utilisés afin de réduire l'exposition des opérateurs aux rayonnements ionisants. L'étude ORAMED met en évidence, une utilisation encore insuffisante des équipements de protection collective en salle interventionnelle. Dans les années 2010, près d'un quart des radiologues interventionnels exerçaient sans aucun équipement de protection (66).

Une suspension plafonnière bien positionnée, permet de réduire efficacement l'exposition de l'opérateur lors des différentes interventions réalisées, notamment au cours des embolisations avec une dose à l'œil divisée par 7,4 (18). De plus, la position du tube à rayons X influence fortement la dose reçue aux yeux. Lorsque le tube se situe au-dessus de la table d'opération, la dose reçue à l'œil est de 2 à 27 fois plus élevée que lorsque le tube est présent sous la table (18).

Concernant l'exposition des mains de l'opérateur, l'utilisation d'une suspension plafonnière plombée, peut réduire d'un facteur 3 les doses reçues (66). L'atténuation dépend fortement du bon positionnement de l'écran. Plus l'écart entre le bas de la suspension plafonnière et le patient est faible, meilleure est son efficacité. Comme pour l'exposition des yeux, en disposant le tube à rayons X en dessous de la table d'opération on peut réduire l'exposition des mains jusqu'à un facteur 2 à 50 selon le type d'acte réalisé (69). L'utilisation d'un bas-volet permet de réduire l'exposition des jambes de l'opérateur jusqu'à un facteur 5 selon le type d'intervention (69).

A la suite de l'analyse de l'ensemble des résultats de l'étude ORAMED, des recommandations ont été émises afin de réduire les doses au cristallin et aux extrémités chez le personnel médical, lors des actes interventionnels.

II. L'ETUDE

A. Contexte

L'activité de radiologie interventionnelle se développe et entraîne une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants chez le personnel médical, notamment au niveau du cristallin et des extrémités. Cette exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants répétée durant l'ensemble de leur carrière professionnelle, peut avoir des effets sur la santé des praticiens. C'est dans ce contexte que la valeur limite d'exposition du cristallin est passée de 150 mSv à 20 mSv sur douze mois consécutifs. Malgré les recommandations en matière de radioprotection de l'étude ORAMED, le port des dosimètres cristallin et bague, d'une part, et l'utilisation des équipements de protection individuelle et collective d'autre part, restent encore de nos jours insuffisamment appliqués dans certains services de radiologie interventionnelle.

Au CHU de Rouen, l'activité de radiologie interventionnelle est réalisée principalement dans deux salles. La plus ancienne, ouverte en 2004, est équipée d'un générateur de rayons X monoplan. L'augmentation progressive de l'activité a nécessité l'ouverture d'une seconde salle opératoire biplan en 2015, permettant la prise en charge des actes de neuroradiologie à visée diagnostique et thérapeutique. Des médecins de différentes spécialités exercent des actes radioguidés variés. Pour la grande majorité il s'agit de radiologues et de chirurgiens vasculaires.

Un suivi dosimétrique de l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants est instauré à partir de 2017 chez les radiologues interventionnels. Chez ces praticiens, aucun n'a eu de suivi dosimétrique annuel complet pour le cristallin de 2017 à 2019. Les quelques doses enregistrées étaient significatives mais semblaient respecter les valeurs limites d'exposition. Durant la même période, l'adhésion au suivi dosimétrique bague était partielle chez la plupart des praticiens étudiés, voire inexistante pour deux radiologues du service. Jusqu'alors, aucun suivi du cristallin ou des extrémités mains n'a été mis en place chez les chirurgiens vasculaires. Le manque de données dosimétriques et le suivi discontinu ne permettent pas d'évaluer correctement l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants chez les médecins interventionnels.

B. Objectifs

Les objectifs de ce travail sont de :

1. Définir et quantifier l'activité de chaque praticien interventionnel,
2. Evaluer l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants, chez l'ensemble des opérateurs, intervenant dans le service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen.

C. Matériels et méthodes

1. Population et suivi

Il s'agit d'une étude observationnelle prospective monocentrique. Nous avons inclus dans l'étude du 1^{er} janvier au 30 juin 2020 : l'ensemble des médecins interventionnels (quatre radiologues et quatre chirurgiens vasculaires), l'interne de radiologie, l'interne de chirurgie vasculaire et un des manipulateurs référents du service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen.

2. Quantification et détermination de l'activité interventionnelle

L'activité opératoire est quantifiée pour l'ensemble des radiologues et des chirurgiens vasculaires à l'aide de deux marqueurs :

- Par le produit dose.surface (PDS) exprimé en Gy.cm², enregistré pour l'ensemble des opérations réalisées par chaque praticien,
- Par le nombre de demi-journées de vacation effectuées par chaque praticien.

À chaque opération nécessitant un guidage radiologique, le produit dose.surface correspondant, est calculé et enregistré automatiquement selon les paramètres du générateur de rayons X. Ainsi, le PDS cumulé pour l'ensemble des actes radioguidés, sur une période définie et pour un opérateur donné, peut être déterminé. Aucune donnée n'est disponible concernant le PDS des actes interventionnels réalisés par les internes (annexe 1).

De plus l'activité opératoire est caractérisée pour chaque praticien interventionnel à l'aide du recueil du nombre d'opérations et de leurs PDS respectifs. Ce recueil permet de déterminer la

proportion du PDS enregistré pour une activité spécifique par rapport au PDS total de l'ensemble des actes réalisés pour chaque opérateur.

Selon la localisation et l'objectif du geste réalisé, les interventions sont classées en différentes catégories d'activité interventionnelle :

- Activité diagnostique crâne (artériographies diagnostiques cérébrales),
- Activité thérapeutique crâne (angioplasties ou embolisations cérébrales),
- Activité diagnostique périphérique (artériographies périphériques),
- Activité thérapeutique périphérique (angioplasties ou embolisations périphériques),
- Activité diagnostique digestive (artériographies digestives),
- Activité thérapeutique digestive (angioplasties ou embolisations digestives ou rénales, chimio-embolisations hépatiques, drainages biliaires),
- Divers (autres drainages, contrôles chambre implantable, extractions de cathéter au lasso etc.).

D'autre part, le niveau d'exposition aux rayons X est caractérisé à l'aide du PDS moyen en Gy.cm² par acte, pour les interventions les plus fréquemment réalisées :

- Les embolisations ou les chimiothérapies digestives,
- Les embolisations rénales,
- Les embolisations vasculaires périphériques,
- Les embolisations cérébrales,
- Les drainages biliaires,
- Les angiographies ou les angioplasties uro-digestives,
- Les angiographies ou les angioplasties cérébrales,
- Les angiographies ou les angioplasties des membres inférieurs.

3. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants

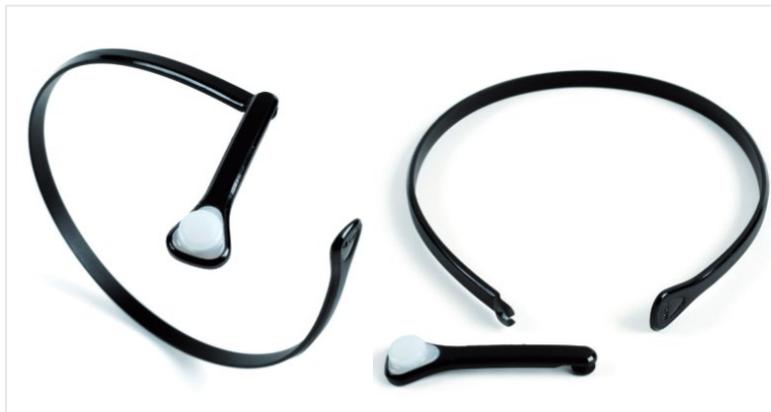
a) Dosimétrie cristallin

L'évaluation de l'exposition du cristallin est possible grâce à la mise en place d'un suivi dosimétrique nominatif mensuel pour chaque médecin interventionnel, les deux internes et un des manipulateurs référents en radiologie, de janvier à juin 2020. De plus, une évaluation de l'exposition du cristallin est réalisée au poste de médecin anesthésiste-réanimateur (MAR) et

d'infirmière de bloc opératoire (IBODE), à l'aide d'un dosimètre non nominatif, porté par l'ensemble des différents intervenants de chaque profession.

Les dosimètres cristallin et bague sont portés et renouvelés mensuellement sur les périodes de janvier, février, mai et juin. Mais, en raison de difficultés de livraison rencontrées par l'IRSN, suite au contexte sanitaire, les dosimètres du mois de mars ont été portés sur la période de mars-avril 2020.

Le dosimètre cristallin utilisé au cours de cette étude est le dosimètre DOSIRIS. Il est développé par le laboratoire de dosimétrie de l'IRSN et permet la mesure de l'équivalent de dose Hp (3). Le détecteur, encapsulé dans 3 mm de polypropylène, est constitué de fluorure de lithium et utilise la technologie TLD. L'identification du porteur est assurée par une étiquette présente sur la face interne du dosimètre et par un code-barres sur chaque détecteur garantissant la bonne traçabilité. Le seuil minimal de détection des rayonnements ionisants du DOSIRIS est de 100 μ Sv.



DOSIRIS fixé sur le serre-tête à gauche, détaché à droite.

Les DOSIRIS doivent être positionnés au plus près de l'œil gauche à l'aide d'un serre-tête, chez les praticiens ne portant pas de lunettes plombées (les radiologues 1 et 4, le chirurgien vasculaire 4, les deux internes, le manipulateur référent en radiologie, le poste de MAR et le poste d'IBODE). Pour le radiologue 3, le dosimètre est fixé directement sur le calot de bloc opératoire.



Port du DOSIRIS à l'aide du serre-tête.

Concernant les praticiens utilisant des lunettes plombées (le radiologue 2 et les chirurgiens vasculaires 1, 2 et 3), l'évaluation de l'exposition du cristallin aux rayonnements X est possible en fixant un DOSIRIS directement à l'intérieur de la branche gauche des lunettes plombées.

b) Efficacité des lunettes plombées

De janvier à avril 2020, un deuxième DOSIRIS est disposé à l'extérieur de la branche gauche de la protection, en face du dosimètre cristallin intérieur. Ainsi, pour l'ensemble des praticiens porteurs de lunettes plombées (radiologue 2, chirurgiens vasculaires 1, 2 et 3), nous avons recueilli une dosimétrie cristallin intérieure gauche et extérieure gauche.



Lunettes plombées avec deux dosimètres DOSIRIS fixés : un intérieur et un extérieur sur la branche gauche.

Pour chaque protection plombée utilisée, le facteur d'atténuation aux rayonnements ionisants, au niveau de la branche gauche, est déterminé de la façon suivante :

$$\text{Pourcentage d'atténuation} = \frac{\text{Dosimétrie cristallin extérieure} - \text{dosimétrie cristallin intérieure}}{\text{Dosimétrie cristallin extérieure}} \times 100$$

c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit

Sur la période de mai à juin 2020, le deuxième dosimètre cristallin est fixé à l'intérieur de la branche droite de la protection, de façon à évaluer la différence d'exposition aux rayonnements ionisants entre l'œil droit et l'œil gauche (le 1^{er} dosimètre étant toujours fixé à l'intérieur de la branche gauche de la lunette plombée).



Lunettes plombées avec deux dosimètres fixés : un à l'intérieur de la branche gauche et un autre à l'intérieur de la branche droite.

Le rapport d'exposition entre la dosimétrie cristallin intérieure gauche et la dosimétrie cristallin intérieure droite est ainsi déterminé respectivement chez les radiologues interventionnels et les chirurgiens vasculaires porteurs de lunettes plombées.

d) Relation dosimétrie cristallin et PDS

Nous avons étudié l'association entre la dosimétrie cristallin et l'activité opératoire exprimée en PDS au cours du suivi :

1. La relation entre la dosimétrie cristallin intérieure gauche et le PDS, chez l'ensemble des praticiens porteurs de lunettes plombées (radiologue 2, chirurgiens vasculaires 1, 2 et 3) puis uniquement chez les chirurgiens vasculaires, sur la période de janvier à juin 2020.
2. La relation entre la dosimétrie cristallin extérieure gauche et le PDS, pour l'ensemble des médecins interventionnels d'une part, puis en distinguant respectivement les chirurgiens vasculaires et les radiologues d'autre part.

La dosimétrie cristallin extérieure gauche regroupe :

- Les dosimétries cristallin mesurées de janvier à juin à l'aide du serre-tête pour les opérateurs n'utilisant pas de lunettes plombées (les radiologues 1, 3 et 4, le chirurgien vasculaire 4).
- Et les dosimétries cristallin enregistrées de janvier à avril à l'extérieur gauche des lunettes plombées pour le radiologue 2 et les chirurgiens vasculaires 1, 2, 3.

La dosimétrie cristallin des internes et du reste de l'équipe médicale n'est pas prise en compte dans cette analyse car nous ne disposons pas du PDS correspondant à leur activité.

Le logiciel Stata v11.1 est utilisé pour l'ensemble de ces analyses, avec un modèle de régression linéaire simple. Le coefficient de corrélation multiple R^2 est défini comme étant le pourcentage de variance de la dosimétrie cristallin expliquée par la variable introduite dans le modèle, c'est-à-dire le PDS. Plus le R^2 est proche de 1, meilleure est l'adéquation du modèle aux données. Pour l'ensemble de ces analyses, l'association est statistiquement significative lorsque la valeur-p observée est inférieure au risque alpha défini à 5 %. De plus, le nombre de données disponibles est exprimé par n.

e) Extrapolation annuelle de la dosimétrie cristallin

Afin de quantifier l'exposition du cristallin et des mains sur douze mois consécutifs et ainsi vérifier le respect des valeurs limites d'exposition chez les différents praticiens, une extrapolation annuelle est réalisée :

1. Suivi dosimétrique cristallin complet de janvier à juin 2020 :

- l'extrapolation annuelle est déterminée en multipliant par 2 la dosimétrie enregistrée au cours des six mois.

2. Suivi dosimétrique cristallin incomplet de janvier à juin 2020 :

- Si une association statistique est démontrée entre la dosimétrie cristallin et le PDS, l'estimation de la dosimétrie annuelle est basée sur l'activité annuelle exprimée en PDS (PDS enregistré sur six mois multiplié par 2).
- Dans le cas où il n'y a pas de corrélation entre la dosimétrie cristallin et le PDS, un intervalle de doses d'exposition annuelle du cristallin est défini par :
 - Une dosimétrie annuelle minimale : déterminée par la dose cristallin enregistrée sur la période du suivi, multipliée par le rapport $12/n$ (avec n = nombre de mois de suivi dosimétrique).
 - Une dosimétrie annuelle maximale : déterminée par la dosimétrie cristallin mensuelle maximale, enregistrée au cours du suivi, multipliée par 12 (exposition la plus péjorative).

4. Exposition des mains aux rayonnements ionisants

a) Dosimétrie bague

L'évaluation de l'exposition des mains de l'opérateur est réalisée avec la mise en place d'une dosimétrie bague nominative mensuelle, chez les huit médecins interventionnels et les deux internes. Aucun suivi dosimétrique pour les mains n'est proposé pour le manipulateur référent en radiologie ni pour le poste de MAR ou le poste d'IBODE.

Les dosimètres bagues TLD développés par l'IRSN sont portés sur un des quatre derniers doigts de la main gauche, de préférence sur l'auriculaire ou l'annulaire. La dose seuil minimale d'enregistrement du dosimètre bague est de 100 μ Sv.



Exemples de dosimètres bagues fournis par l'IRSN.

b) Relation dosimétrie bague et PDS

L'association statistique entre la variable dosimétrie bague et l'activité opératoire exprimée en PDS, est étudiée au cours du suivi :

- Dans un premier temps, chez l'ensemble des médecins interventionnels (quatre radiologues et quatre chirurgiens vasculaires),
- Puis, dans un second temps, en distinguant les radiologues et les chirurgiens vasculaires.

La dosimétrie bague des internes n'est prise en compte du fait de l'absence de données pour le PDS. Ces analyses statistiques sont basées sur le même modèle de régression linéaire simple que celui réalisé pour la dosimétrie cristallin, avec l'utilisation du logiciel Stata v11.1.

c) Extrapolation annuelle dosimétrie bague

Une extrapolation annuelle de l'exposition des mains aux rayonnements ionisants, est réalisée de la même manière que celle effectuée pour l'exposition du cristallin.

1. Suivi dosimétrique bague complet de janvier à juin 2020 :

- l'extrapolation annuelle est déterminée en multipliant par 2 la dosimétrie enregistrée au cours des six mois.

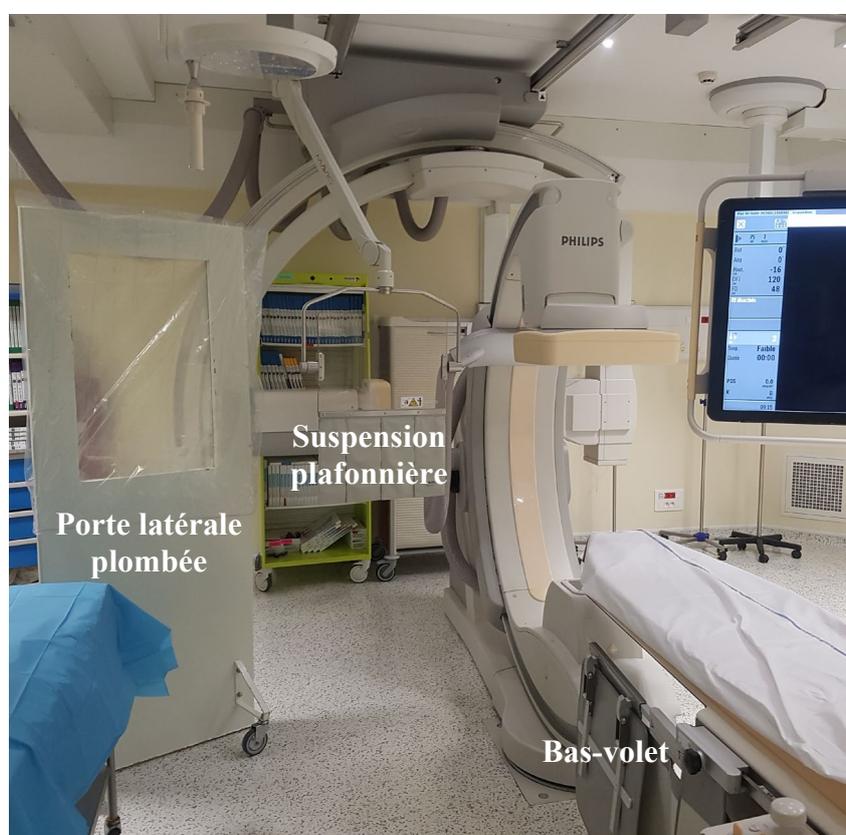
2. Suivi dosimétrique bague incomplet de janvier à juin 2020 :

- Si une association statistique est démontrée entre la dosimétrie bague et le PDS, l'estimation de la dosimétrie annuelle bague est basée sur l'activité annuelle exprimée en PDS (PDS enregistré sur six mois multiplié par 2).
- Dans le cas où il n'y a pas de corrélation prouvée entre la dosimétrie bague et le PDS, un intervalle de doses d'exposition annuelle des mains est défini par :

- Une dosimétrie annuelle minimale : déterminée par la dose bague enregistrée sur la période du suivi, multipliée par le rapport 12/n (avec n = nombre de mois de suivi dosimétrique).
- Une dosimétrie annuelle maximale : déterminée par la dosimétrie bague mensuelle maximale enregistrée au cours du suivi, multipliée par 12 (exposition la plus péjorative).

5. Utilisation des équipements de protection individuelle et collective

Des tabliers plombés et des caches-thyroïdes sont mis à la disposition de l'ensemble du personnel médical, ainsi que différents modèles de lunettes plombées pour les praticiens interventionnels qui souhaitent en porter. Divers équipements de protection collective sont présents dans les deux salles de radiologie interventionnelle (suspension plafonnrière plombée, bas-volet plombé, porte latérale plombée). Une analyse de l'utilisation des équipements de protection individuelle et collective a eu lieu au cours de plusieurs interventions, en salle de radiologie vasculaire, de janvier à juin 2020.



EPC disponibles dans la salle de radiologie interventionnelle biplan du CHU de Rouen.

D. Résultats

1. Quantification de l'activité interventionnelle

Le PDS, enregistré pour chaque intervention, est défini comme un indicateur de l'exposition des opérateurs aux rayonnements ionisants (annexe 1). Les quatre praticiens qui présentent la plus forte exposition aux rayonnements X au cours de leur activité sur six mois, sont les quatre radiologues interventionnels (respectivement 22 684 Gy.cm² pour le radiologue 1, 16 645 Gy.cm² pour le radiologue 2, 20 191 Gy.cm² pour le radiologue 3 et 18 610 Gy.cm² pour le radiologue 4) (Figure 1).

Le PDS total sur cette période, est en moyenne de 19 535 Gy.cm² chez les radiologues interventionnels, contre 2 572 Gy.cm² chez les chirurgiens vasculaires. On constate que le PDS total des interventions réalisées est 7,6 fois plus élevé chez les radiologues interventionnels que chez les chirurgiens vasculaires (Figure 1).

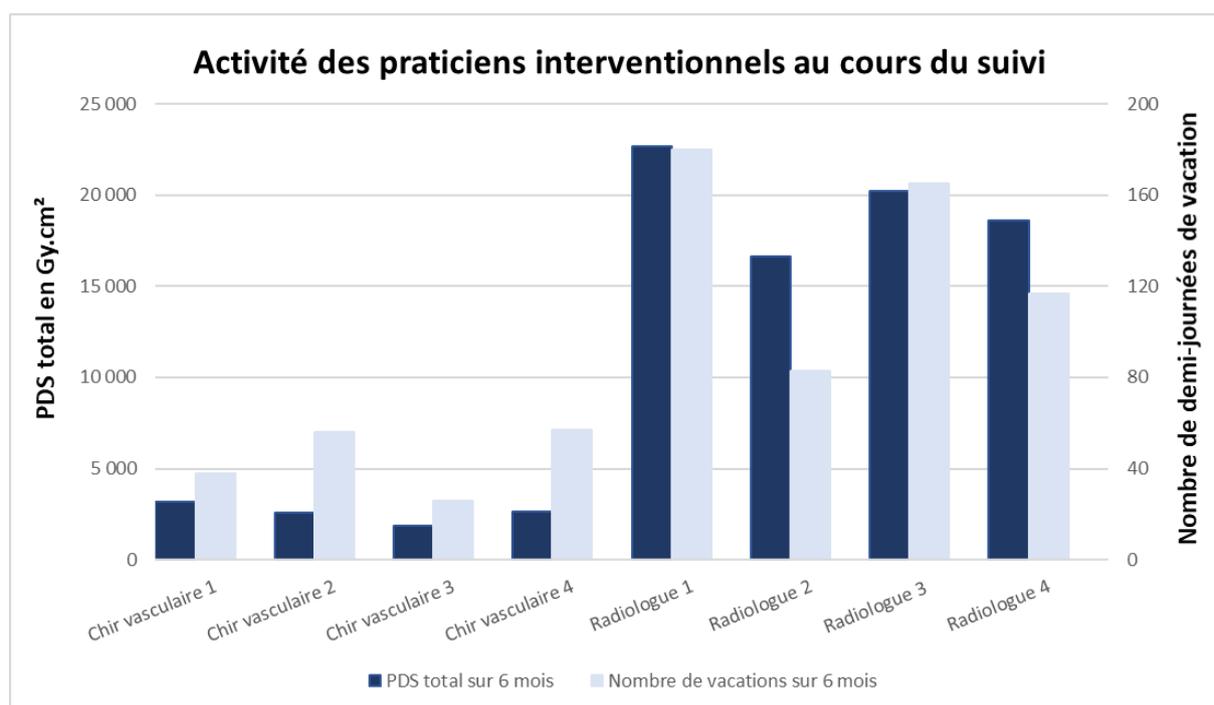
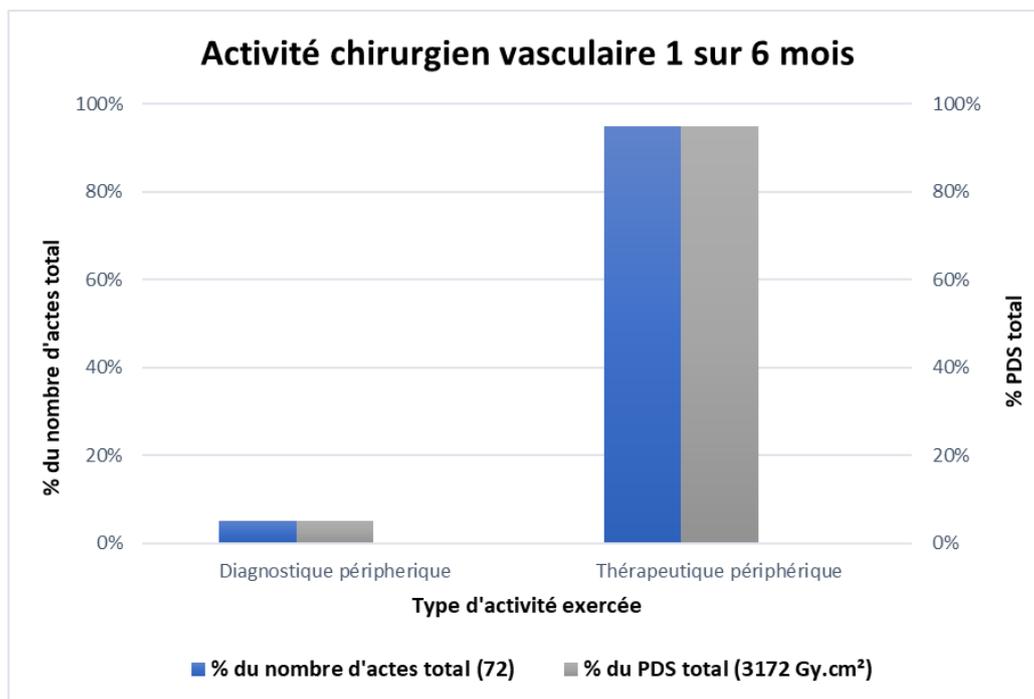


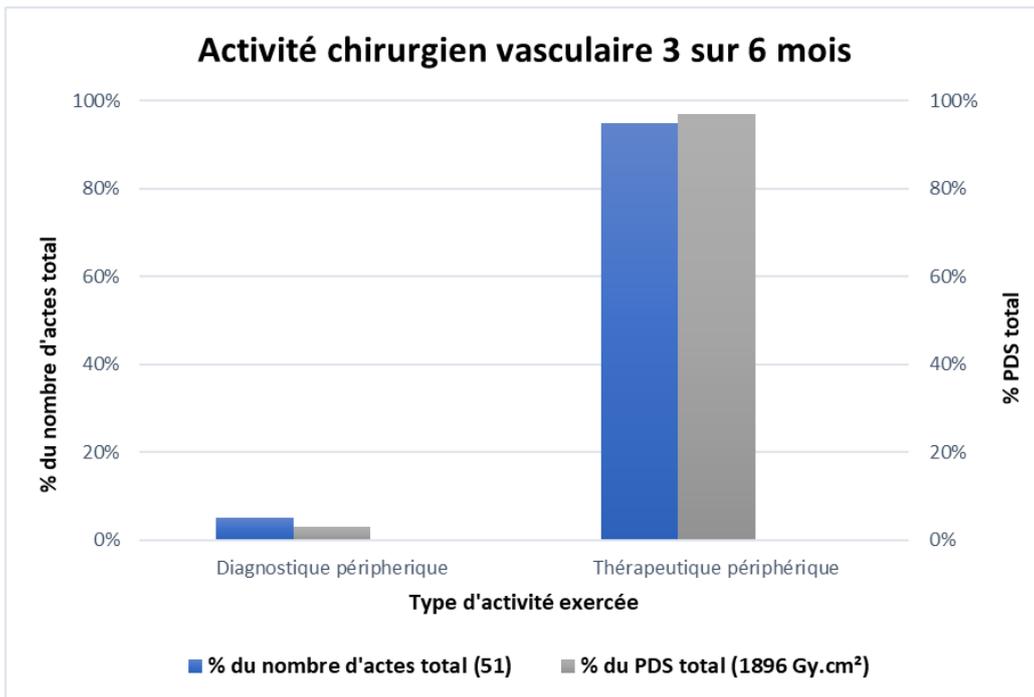
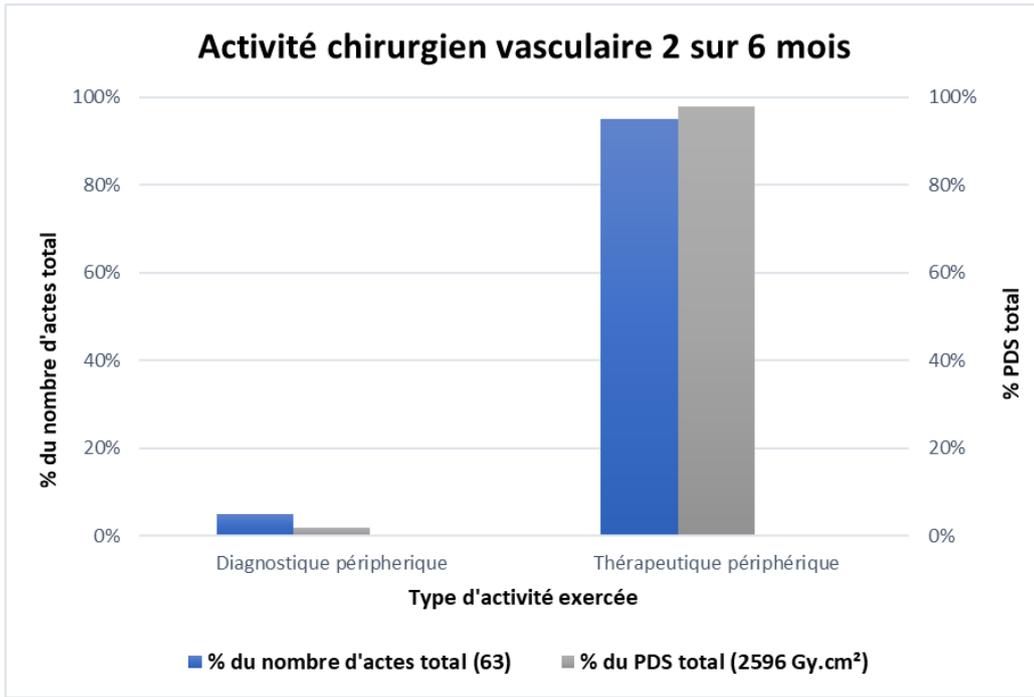
Figure 1

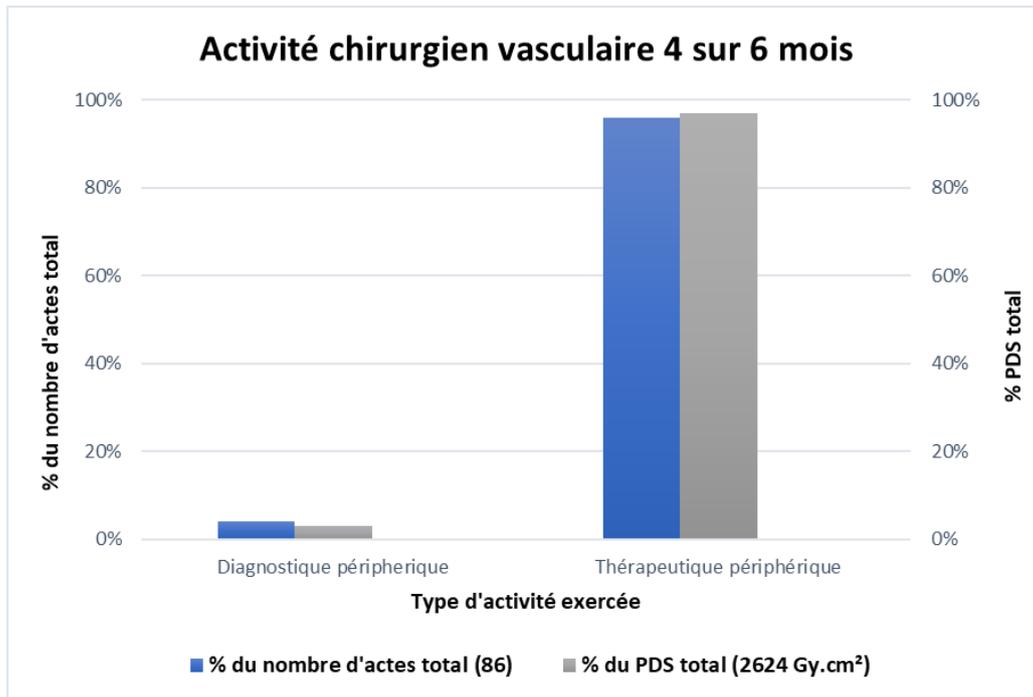
De plus, les radiologues présentent le plus grand nombre de demi-journées de vacation dans le service de radiologie interventionnelle, avec respectivement 180 demi-journées pour le radiologue 1, 83 pour le radiologue 2, 165 pour le radiologue 3 et 117 pour le radiologue 4. Les radiologues font en moyenne 3 fois plus de demi-journées de vacation que les chirurgiens vasculaires (136 contre 44) (Figure 1).

2. Typologie de l'activité interventionnelle

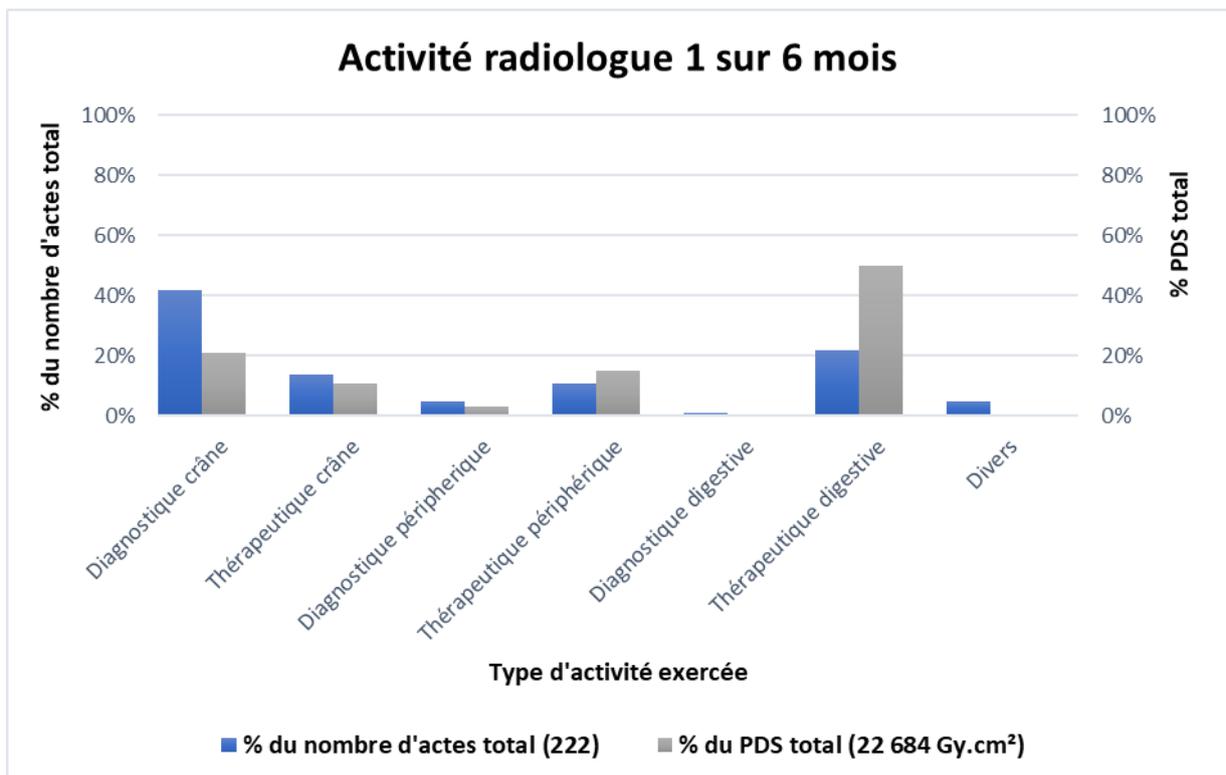
Chez les chirurgiens vasculaires, les actes interventionnels vasculaires périphériques, à but thérapeutique (fibrinolyse, angioplasties d'artères des membres inférieurs), représentent près de 95 % des actes réalisés et 95 % du PDS total de l'ensemble de l'activité opératoire.

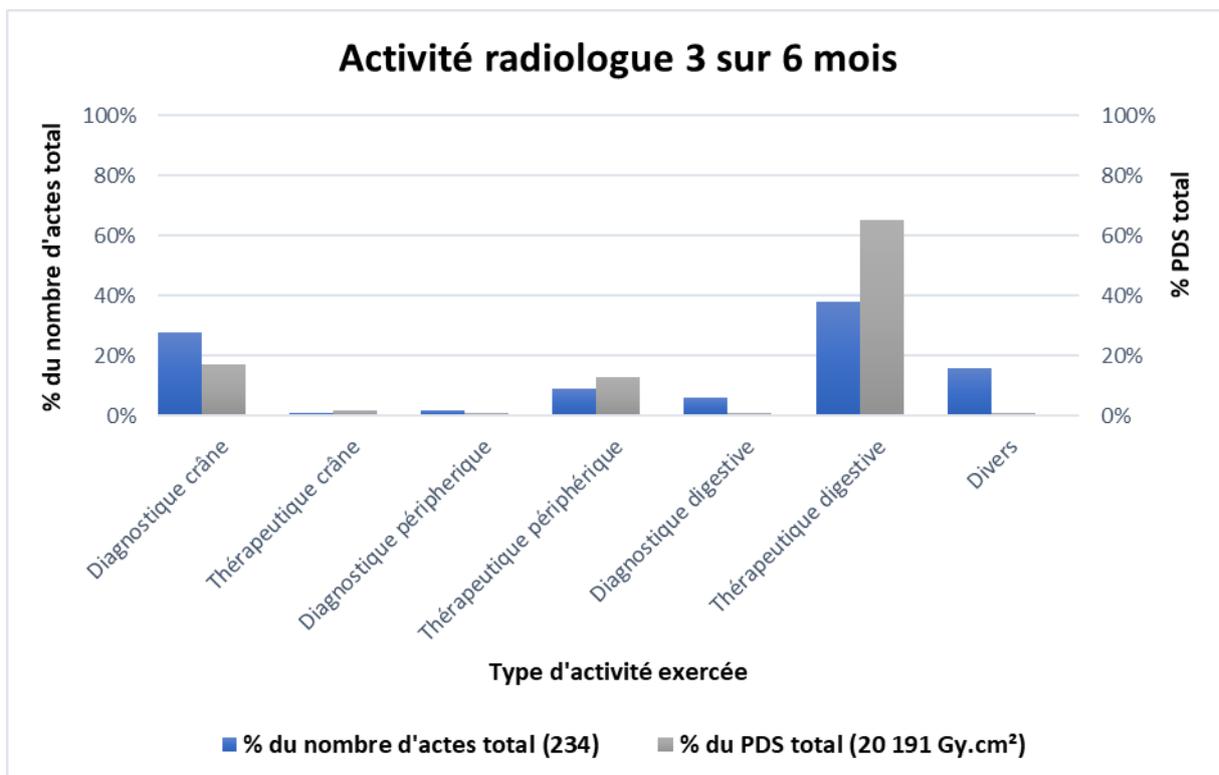
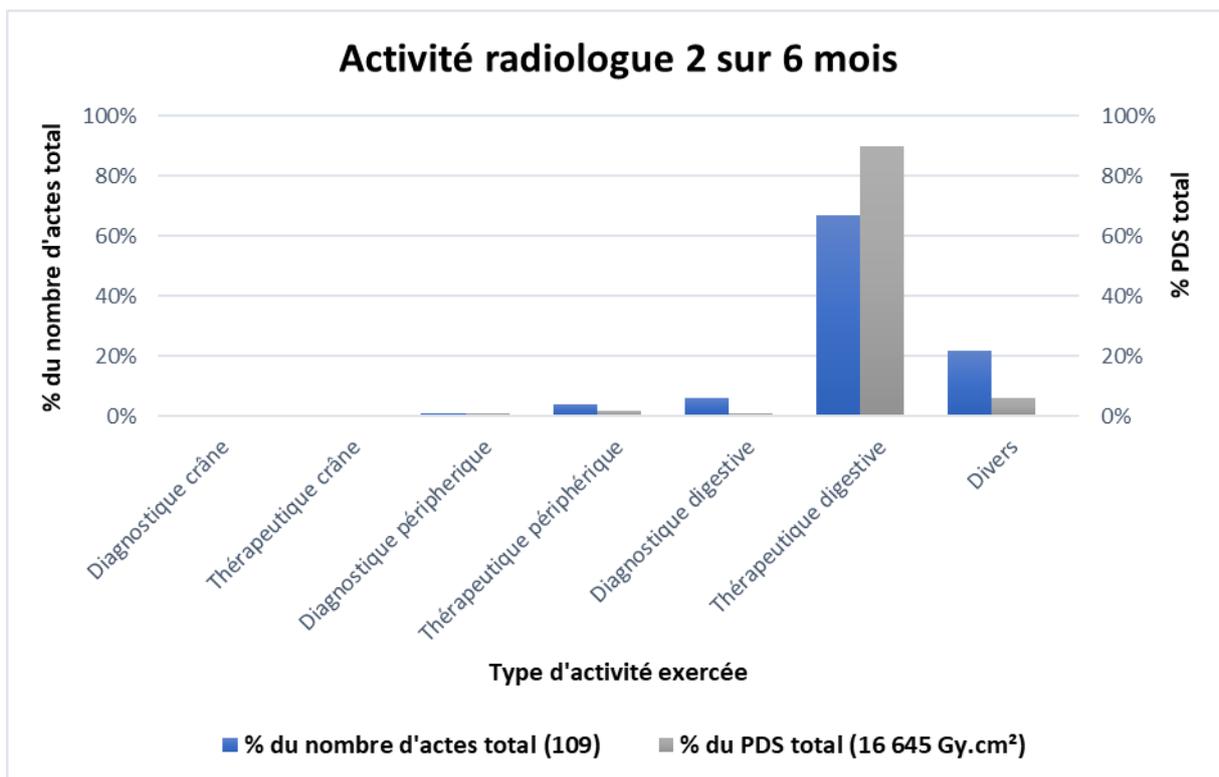


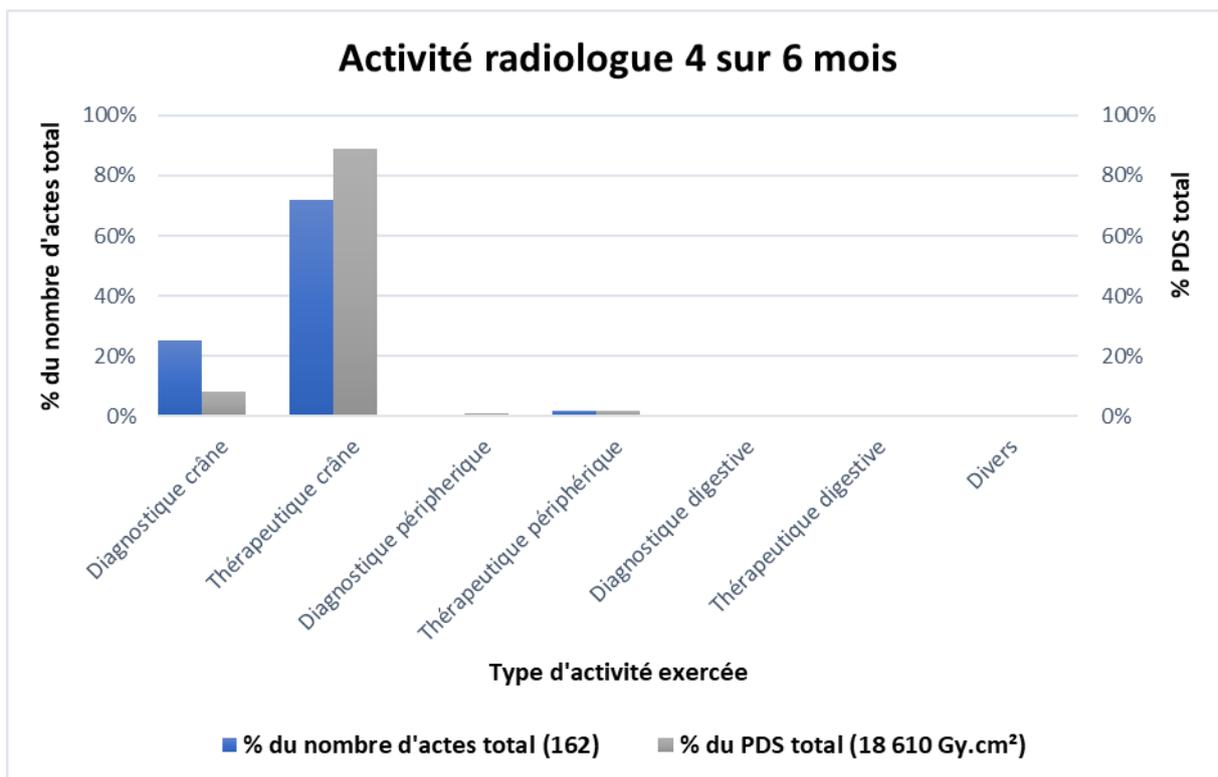




Concernant les radiologues, l'activité est plus diversifiée. Certains radiologues exercent une activité mixte avec différents types d'actes réalisés (radiologues 1 et 3). D'autres réalisent une activité interventionnelle plus spécifique : le radiologue 2 a une activité interventionnelle digestive prédominante et le radiologue 4 une activité crâne.







Ces données soulignent l'intérêt de prendre en compte le domaine d'exercice de chaque praticien interventionnel. En effet, l'exposition de l'opérateur aux rayonnements ionisants peut varier selon la typologie des actes radioguidés réalisés.

Les actes thérapeutiques exposent le patient aux rayonnements ionisants entre deux et cinq fois plus que les actes diagnostiques, notamment l'activité thérapeutique digestive qui présente le PDS moyen le plus élevé (183 Gy.cm² par acte) (Figure 2).

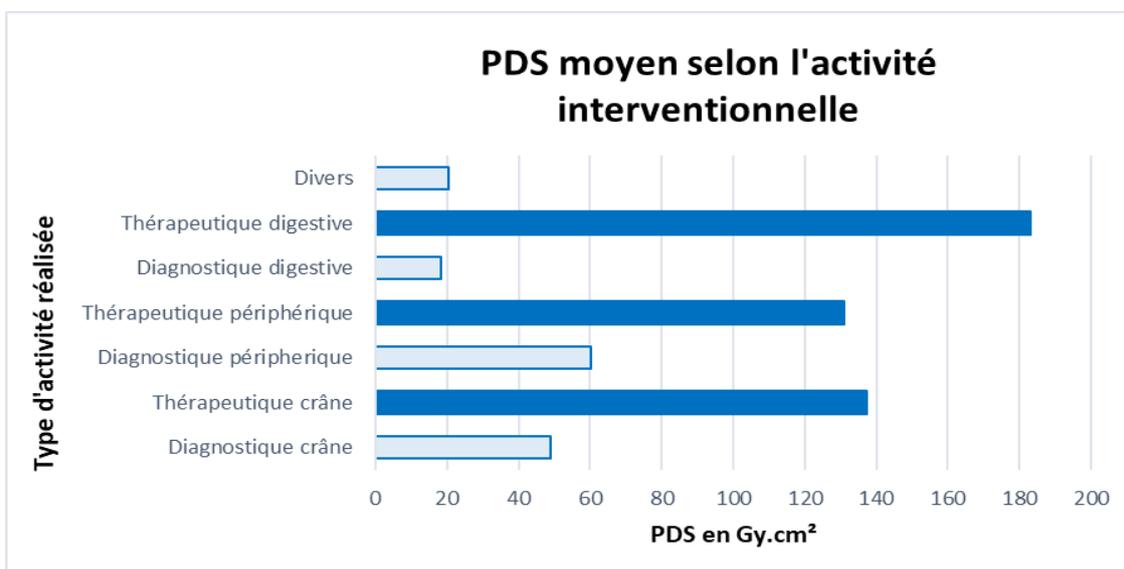


Figure 2

Lorsqu'on étudie les actes interventionnels les plus fréquemment réalisés, les embolisations toutes confondues sont les actes les plus irradiants pour le patient, avec un PDS moyen de 200 Gy.cm² par embolisation. Ainsi, ce type d'intervention présente potentiellement un risque d'exposition plus important pour le personnel médical (Figure 3).

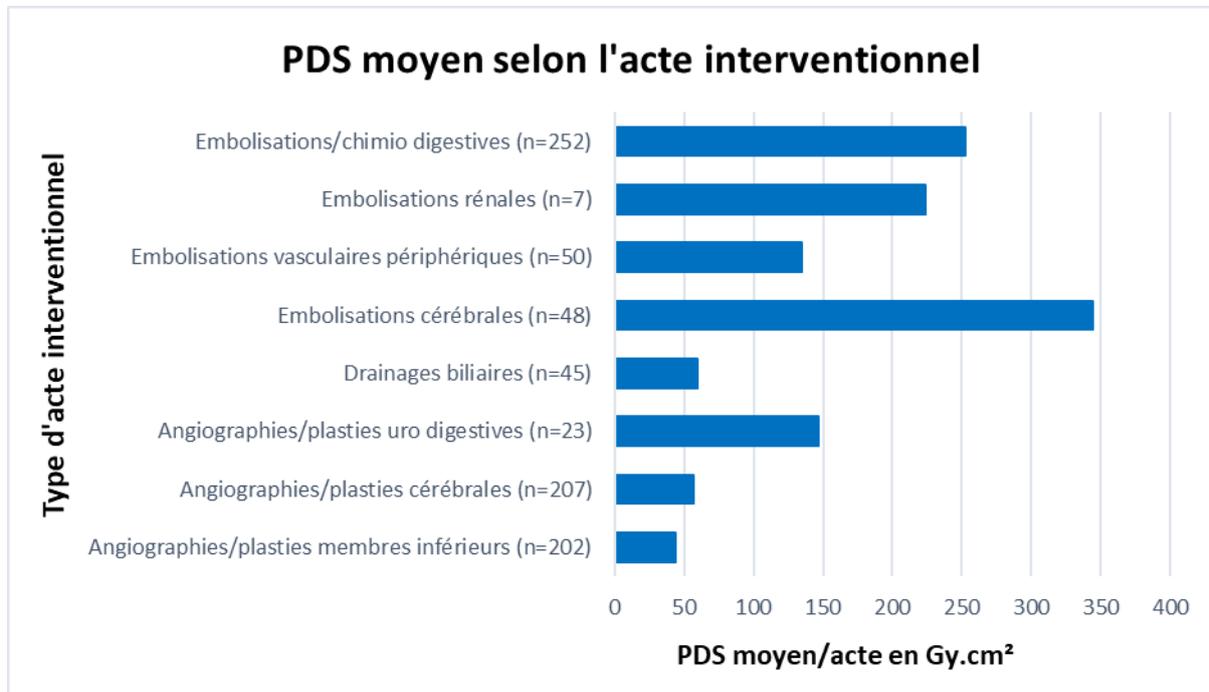


Figure 3

3. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants

a) Dosimétrie cristallin

Concernant le suivi dosimétrique cristallin (Figure 4) :

- Les radiologues 2 et 3, l'interne en radiologie, les chirurgiens vasculaires 1 et 2 ainsi que le manipulateur en radiologie présentent un suivi dosimétrique cristallin complet sur les six mois de l'étude.
- Deux praticiens ont un suivi cristallin partiel : le radiologue 1 sur la période de janvier à avril et le chirurgien vasculaire 3 sur le mois de janvier.
- Le suivi dosimétrique du cristallin et des mains de l'interne de chirurgie vasculaire est considéré comme complet de janvier à mai, n'étant plus en stage dans le service en juin.
- L'évaluation cristallin est complète pour les postes de MAR et d'IBODE.

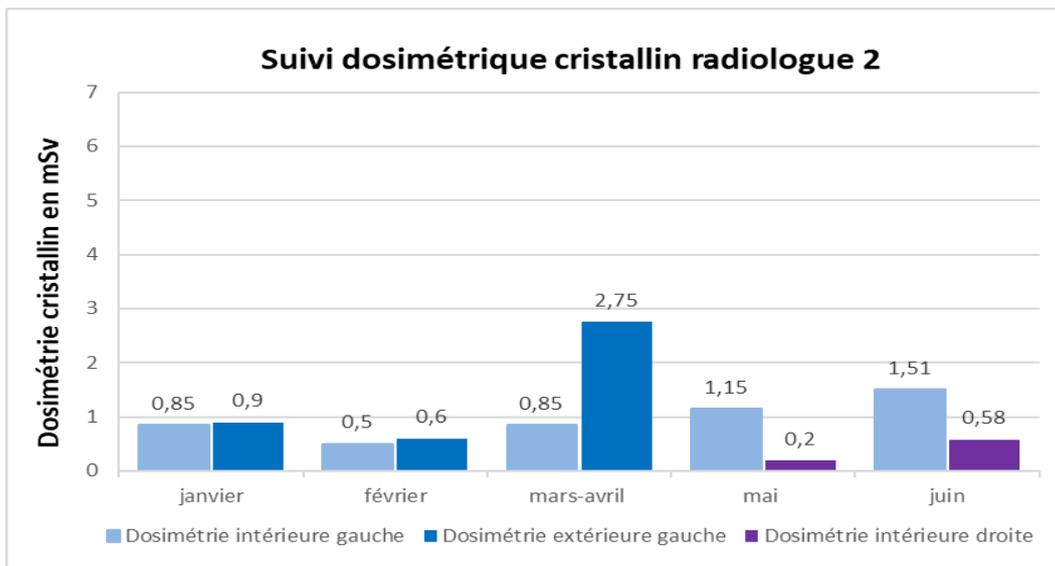
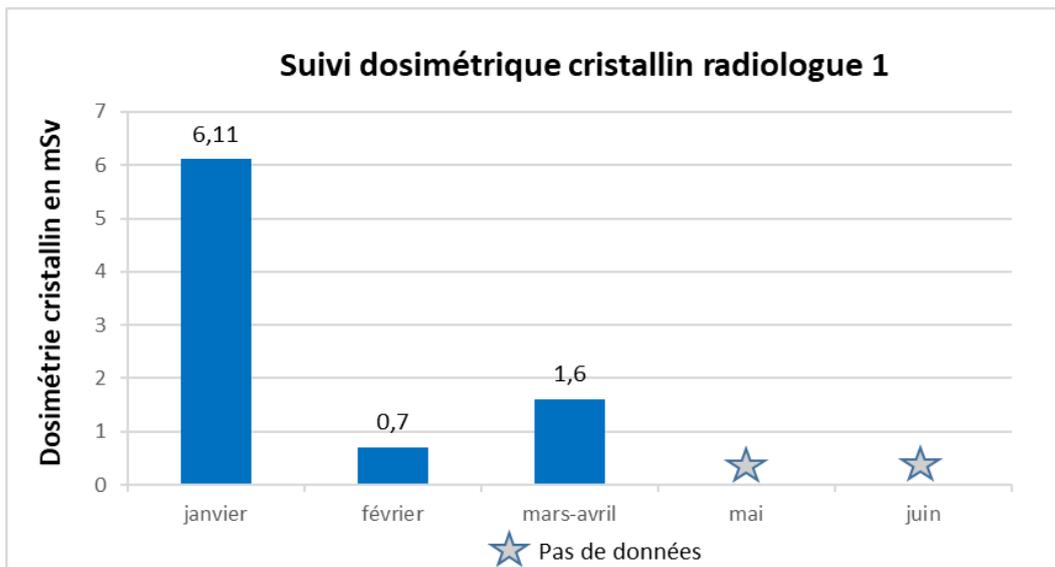
- Le radiologue 4 et le chirurgien vasculaire 4 n'ont pas adhéré au suivi dosimétrique du cristallin. Par conséquent, nous ne disposons d'aucune donnée pour ces deux praticiens.

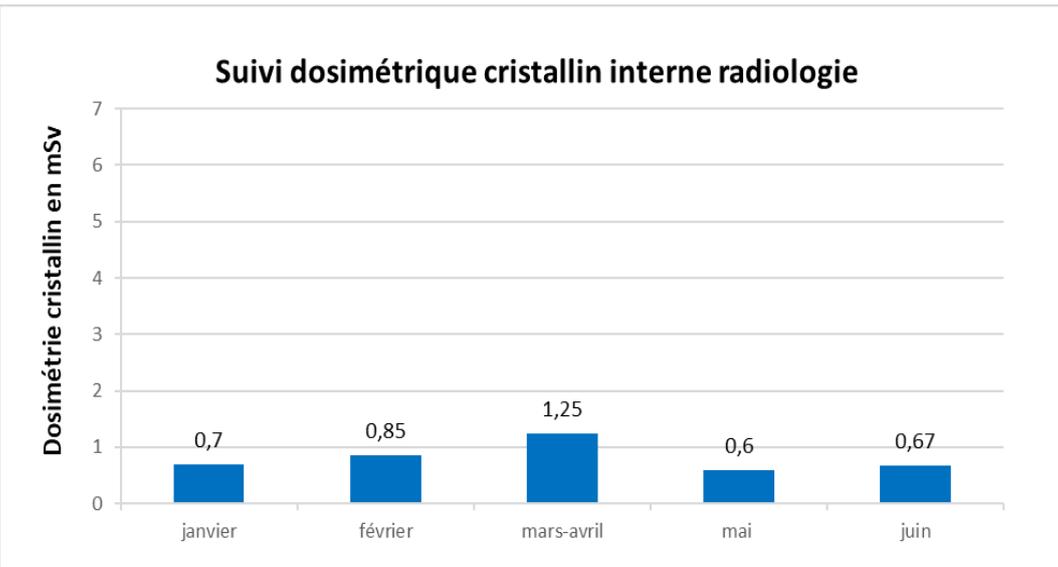
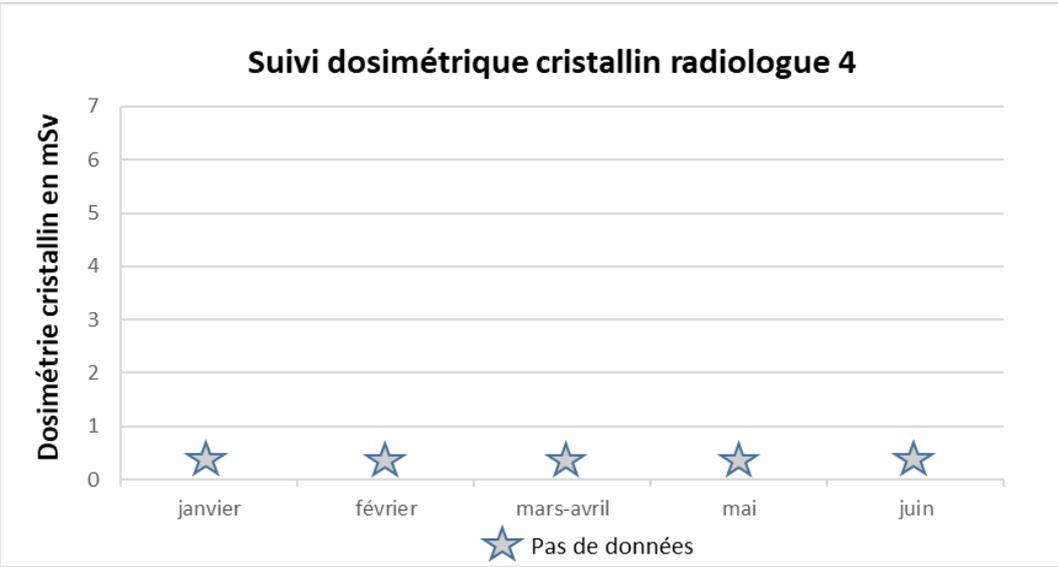
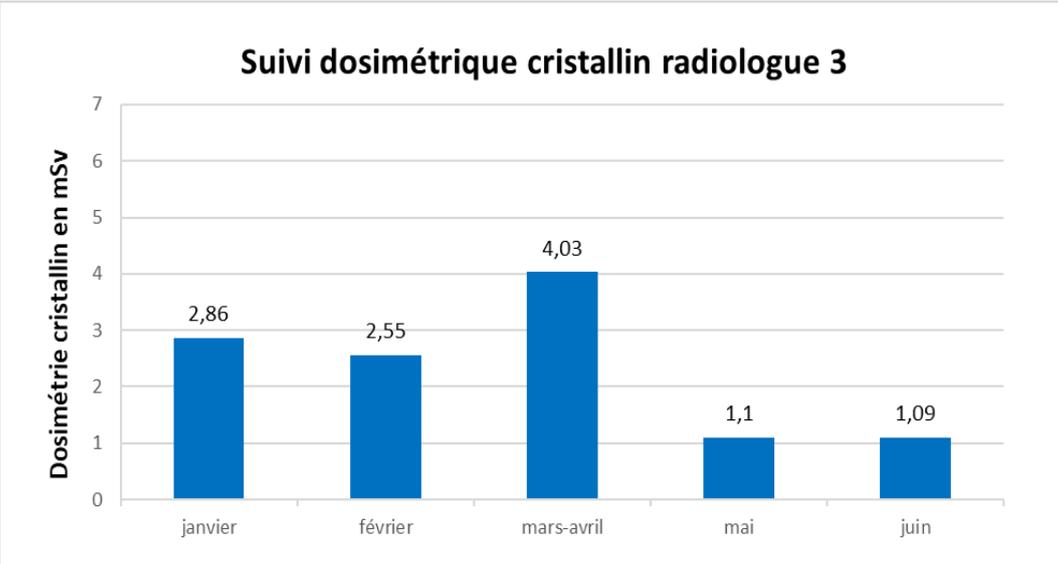
Suivi cristallin	janvier	février	mars-avril	mai	juin
Radiologue 1	←-----→			☆	
Radiologue 2	←-----→				
Radiologue 3	←-----→				
Radiologue 4	☆				
Interne de radiologie	←-----→				
Chirurgien vasculaire 1	←-----→				
Chirurgien vasculaire 2	←-----→				
Chirurgien vasculaire 3	←→	☆			
Chirurgien vasculaire 4	☆				
Interne de chirurgie vasculaire	←-----→				☆
Manipulateur en radiologie	←-----→				
MAR	←-----→				
IBODE	←-----→				
☆ Données manquantes	janvier	février	mars-avril	mai	juin

Figure 4 : Suivi dosimétrique cristallin.

Dosimétrie cristallin chez les radiologues

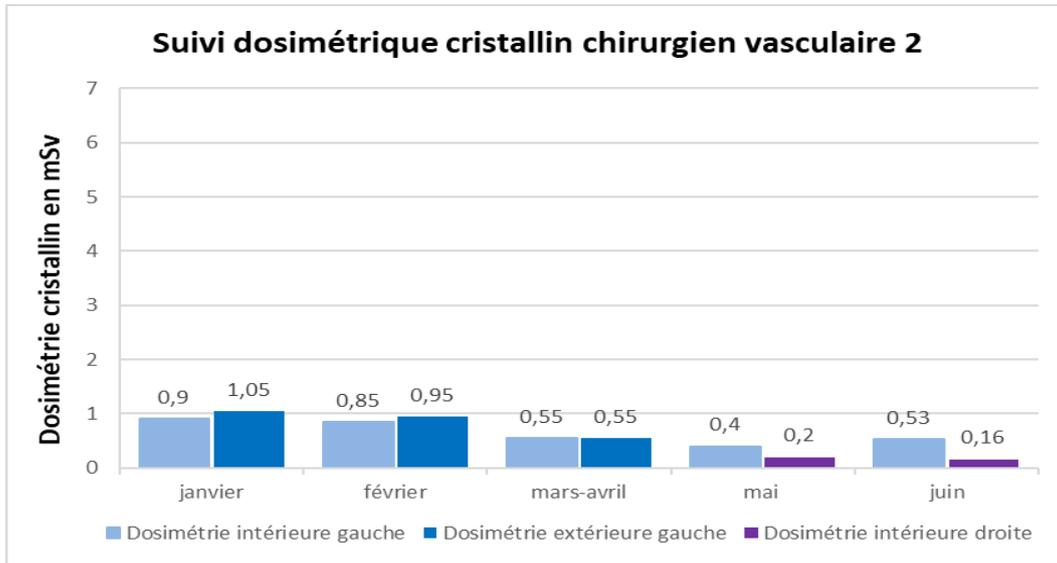
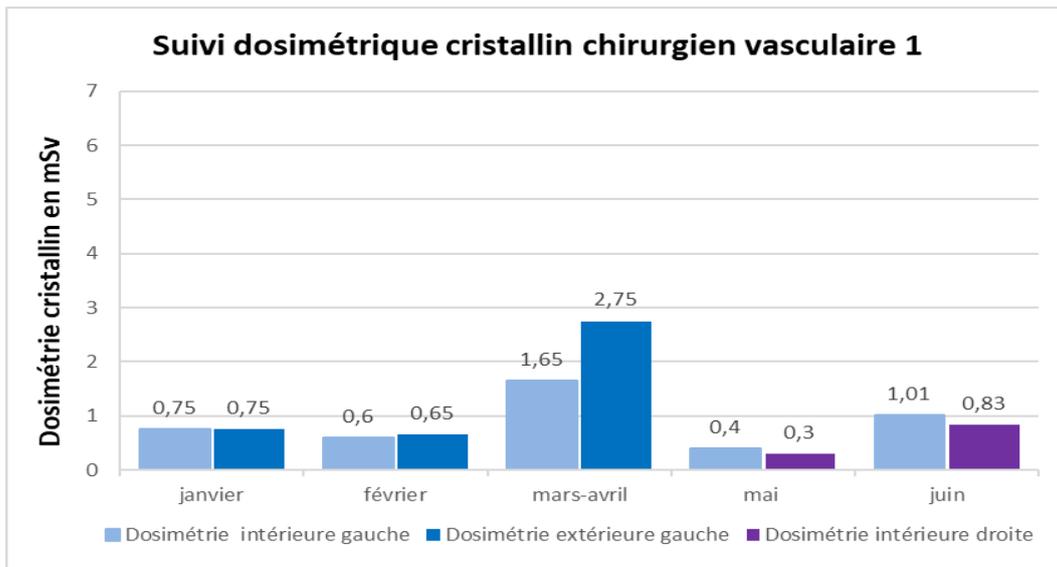
La plus forte exposition sans protection enregistrée au cours du suivi, concerne le radiologue 1 avec une dosimétrie cristallin de 6,11 mSv pour le mois de janvier. La dose cristallin sans protection est en moyenne de 1,42 mSv par mois et par radiologue, avec un écart-type de 1,29 mSv. La dose moyenne avec protection est de 0,81 mSv par mois et l'écart-type de 0,4 mSv (annexes 3 et 4).

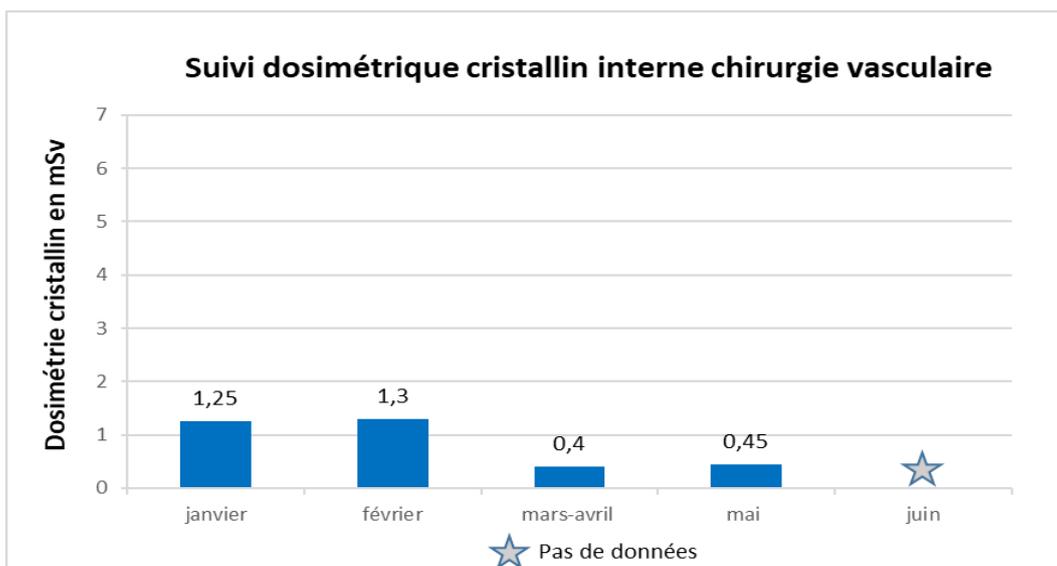
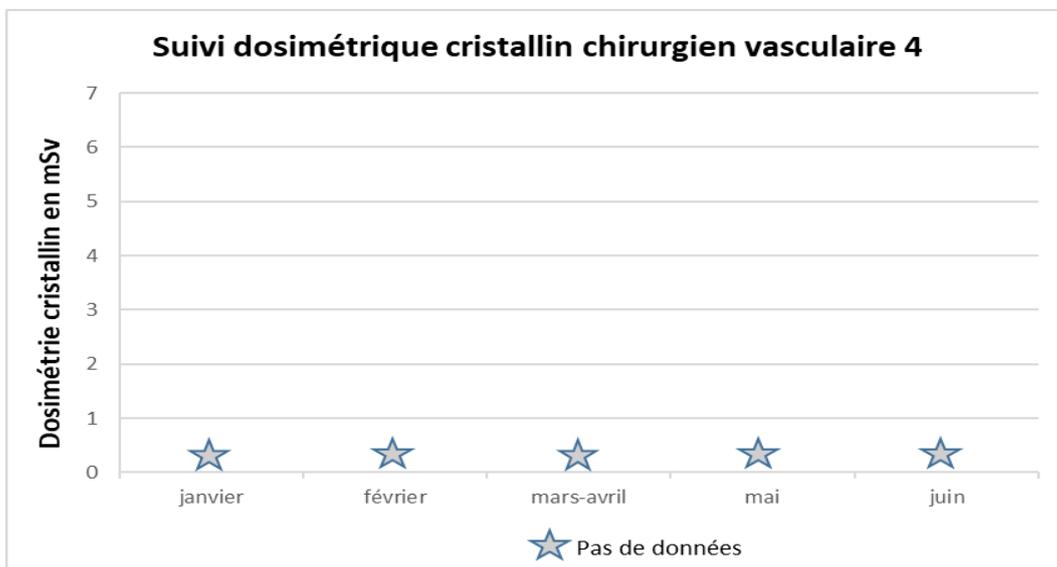
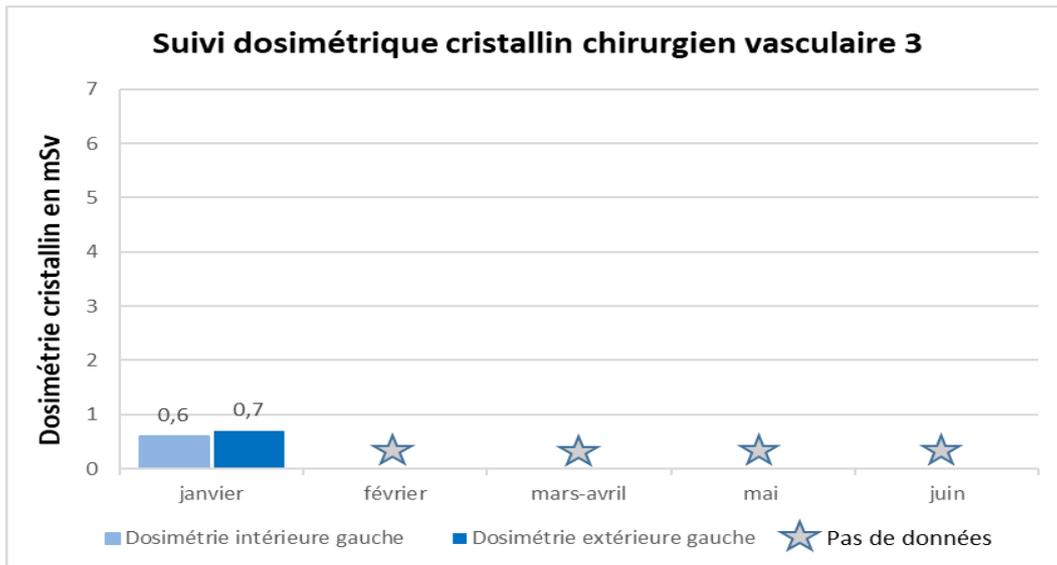




Dosimétrie cristallin chez les chirurgiens vasculaires

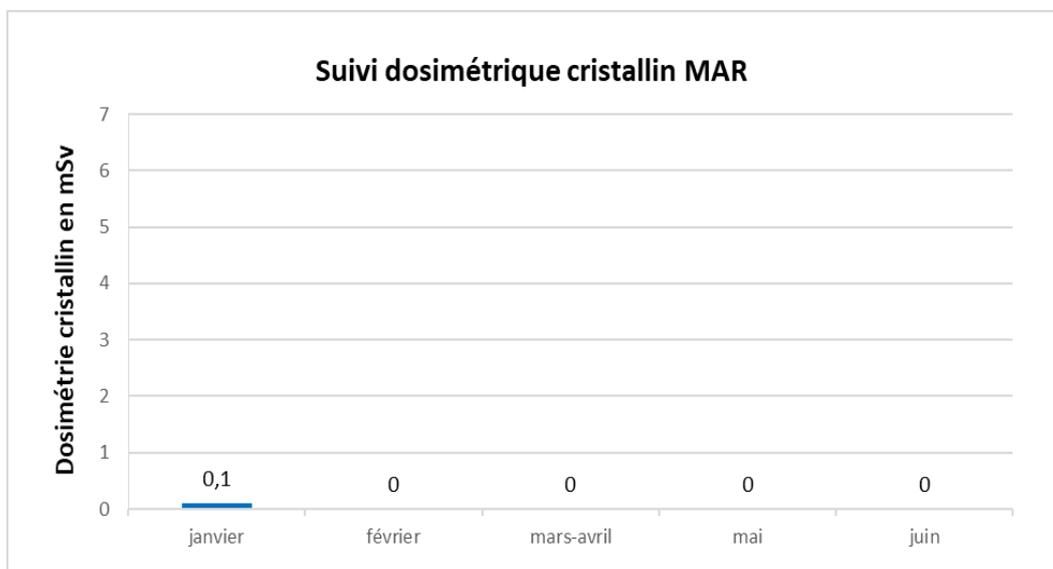
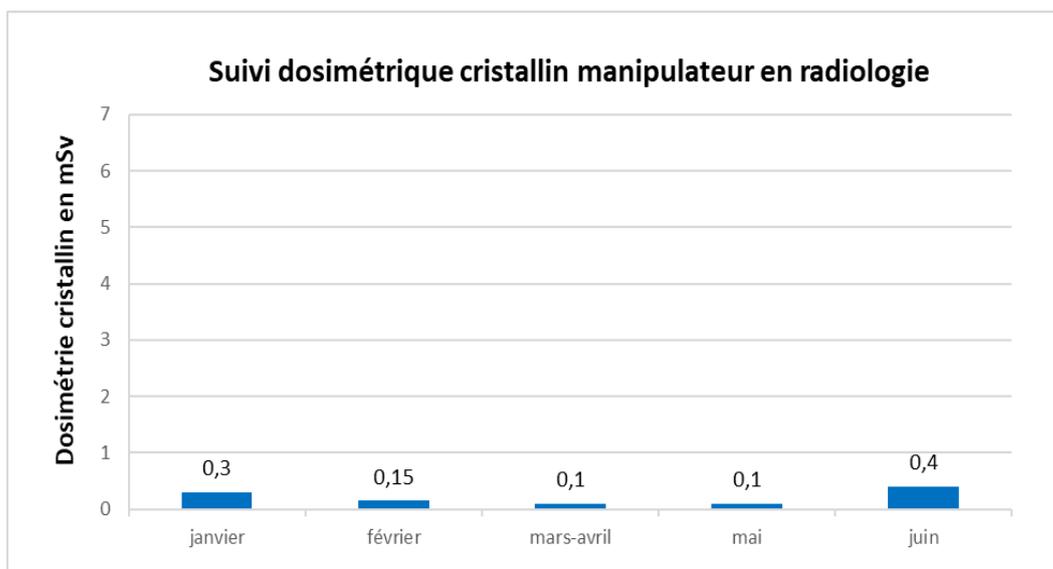
Pour l'ensemble des chirurgiens vasculaires, la dose cristallin moyenne sans protection est de 0,83 mSv par mois avec un écart-type de 0,42 mSv. La dose moyenne avec protection est de 0,63 mSv par mois et l'écart-type de 0,24 mSv (annexes 3 et 4).

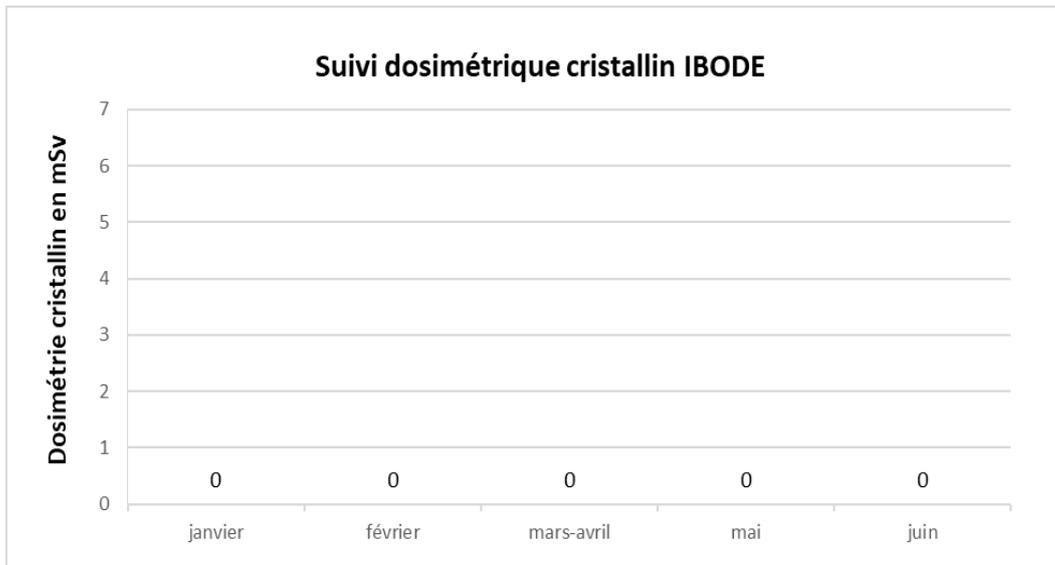




Dosimétrie cristallin manipulateur en radiologie, MAR et IBODE

Le manipulateur référent en radiologie présente une dosimétrie cristallin moyenne de 0,175 mSv par mois. Concernant l'évaluation aux postes des MAR et d'IBODE, aucune valeur dosimétrique supérieure à la limite de détection de 100 μ Sv n'est enregistrée (annexe 3).





Sur les onze praticiens et les deux postes étudiés, le suivi dosimétrique cristallin est considéré comme complet pour neuf d'entre eux. Deux praticiens ont bénéficié d'un suivi partiel. Aucune donnée n'est disponible pour le radiologue 4 et le chirurgien vasculaire 4 (Figure 5).

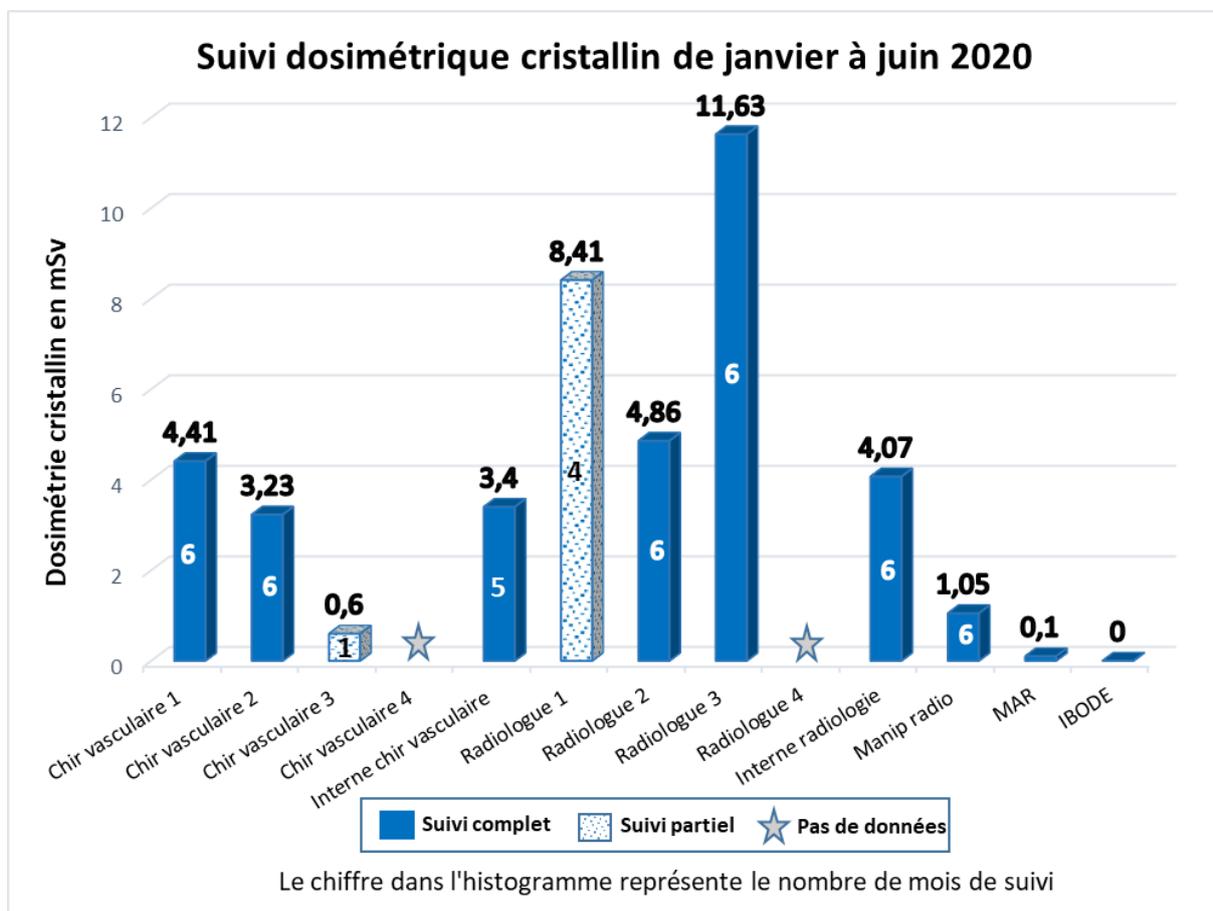


Figure 5

Les trois doses cristallin les plus élevées sont retrouvées chez trois radiologues interventionnels : 8,41 mSv sur quatre mois pour le radiologue 1, 4,86 mSv chez le radiologue 2 sur six mois et 11,63 mSv sur six mois pour le radiologue 3. Les chirurgiens vasculaires 1, 2, 3 et les deux internes du service présentent une exposition du cristallin aux rayons X inférieure à 5 mSv. Pour le reste de l'équipe médicale (manipulateur référent en radiologie, postes de MAR et d'IBODE), l'exposition se situe entre 0 et 1,05 mSv sur six mois (Figure 5).

b) Efficacité des lunettes plombées

L'étude de la dosimétrie cristallin à l'intérieure et à l'extérieure des lunettes plombées, durant la période de janvier à avril, a permis de déterminer l'atténuation moyenne aux rayonnements ionisants pour chaque lunette utilisée par les différents praticiens (Figure 6). Sur l'ensemble des protections étudiées, l'atténuation moyenne est de 16 % au niveau de la branche gauche (annexe 5).

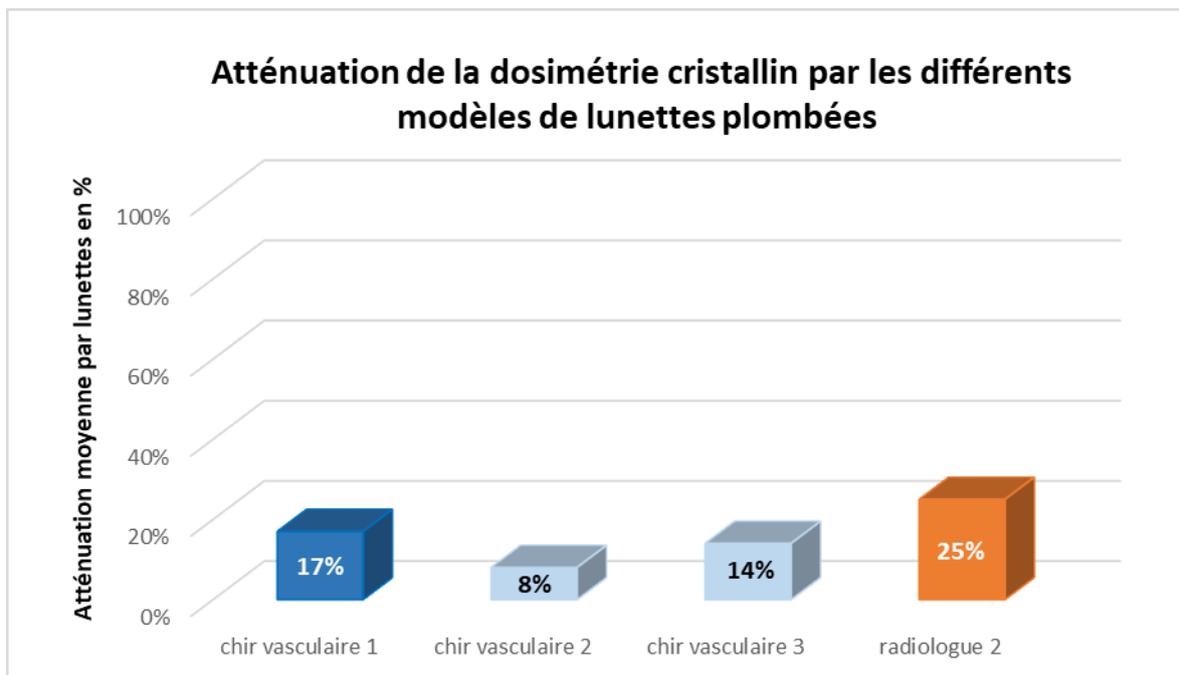


Figure 6

c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit

Les données dosimétriques enregistrées de mai à juin, concernent le radiologue 2 et les chirurgiens vasculaires 1 et 2. Aucune donnée de dosimétrie cristallin n'est enregistrée sur cette période pour le chirurgien vasculaire 3 (annexe 6).

Au cours des actes interventionnels, l'œil de l'opérateur le plus exposé est le gauche. La dosimétrie cristallin gauche est 2 fois plus élevée qu'à l'œil droit chez les chirurgiens vasculaires, alors qu'elle est 4,2 fois plus élevée chez les radiologues (Figure 7) (annexe 6).

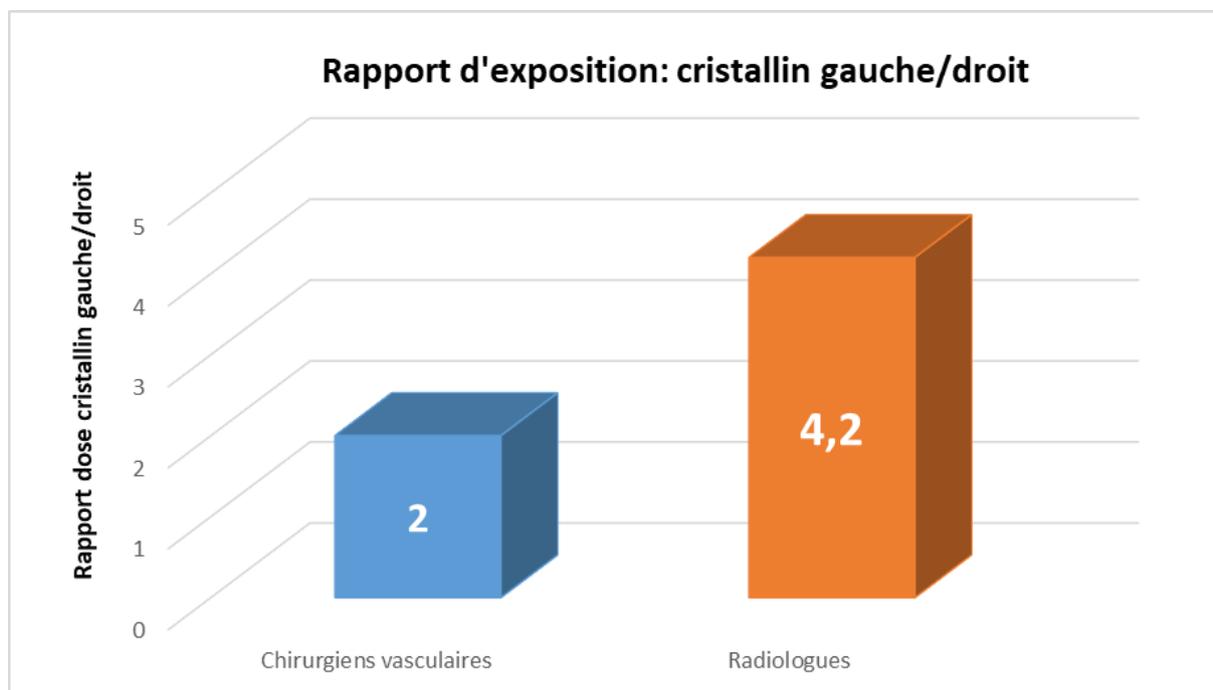


Figure 7

4. Exposition des mains aux rayonnements ionisants

En ce qui concerne le suivi dosimétrique bague (Figure 8) :

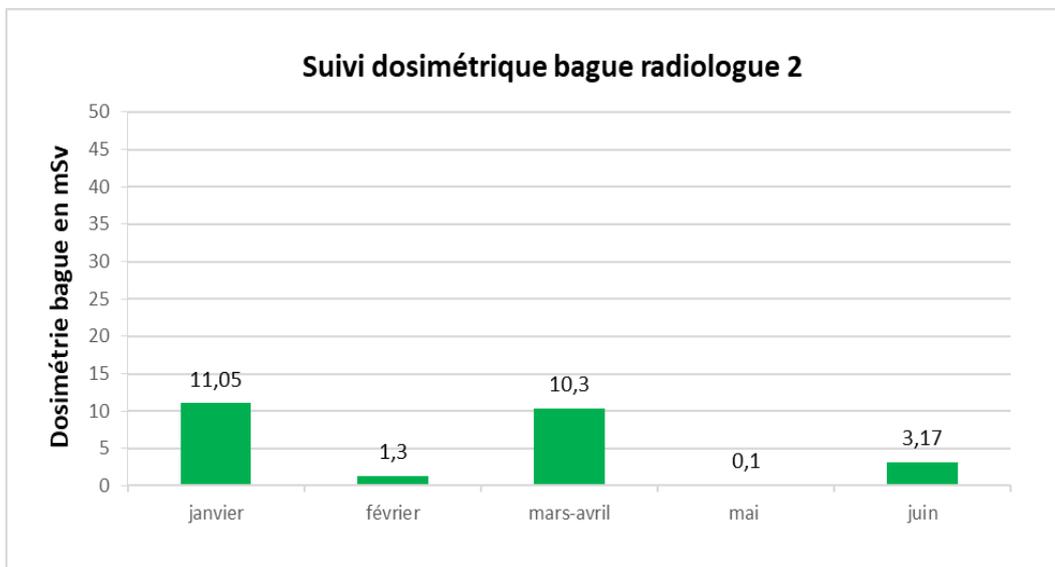
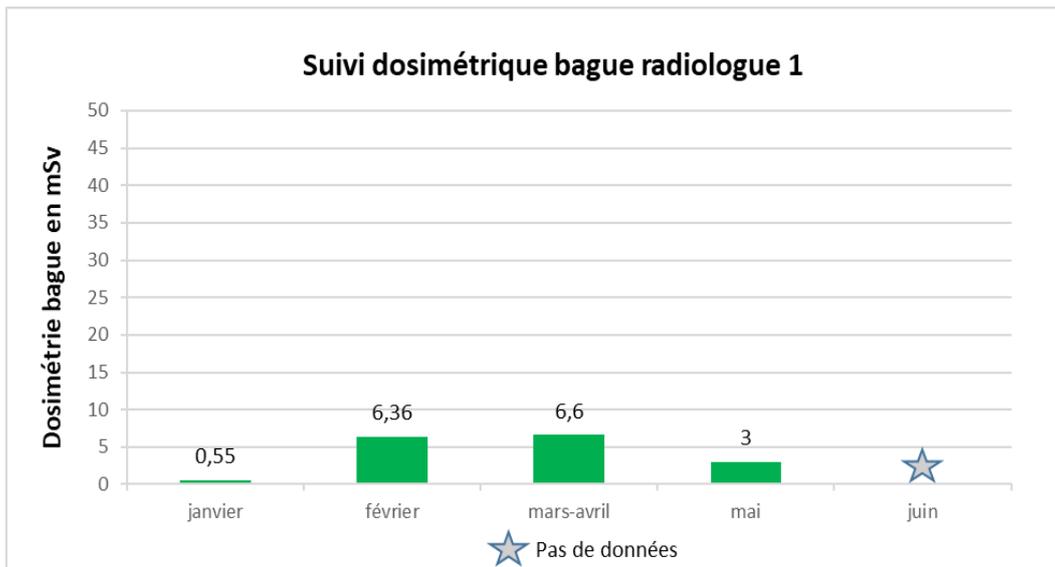
- Le radiologue 2, l'interne de radiologie et l'interne de chirurgie vasculaire présentent un suivi complet.
- Le radiologue 1 a porté le dosimètre bague de janvier à avril, le radiologue 3 de janvier à mai et le chirurgien vasculaire 3 aux mois de janvier, mars, avril.
- Le chirurgien vasculaire 1 n'a pas porté le dosimètre bague pour des raisons d'asepsie opératoire.
- Le radiologue 4 et le chirurgien vasculaire 4 n'ont pas adhéré au suivi dosimétrique bague.

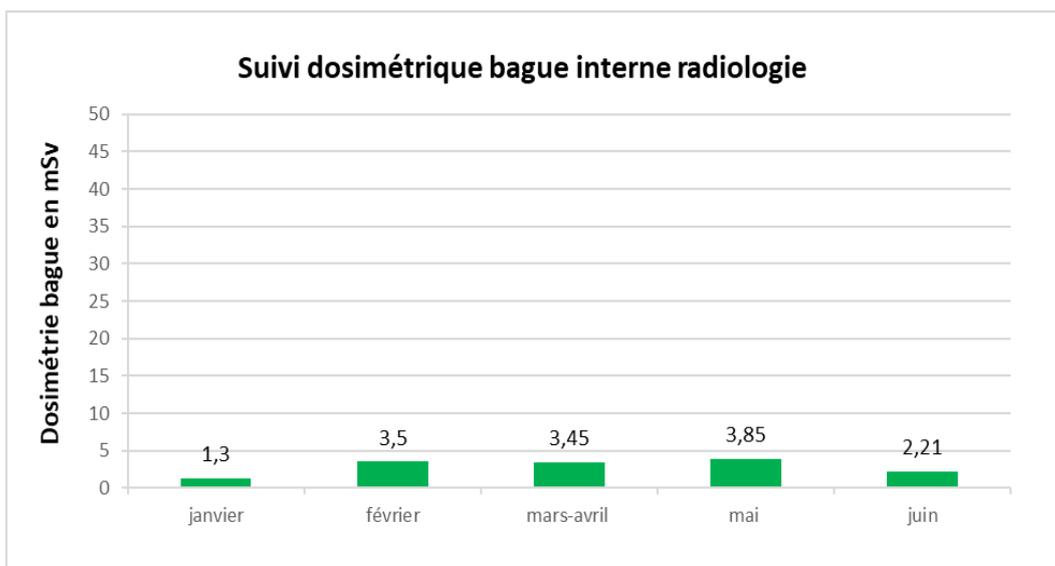
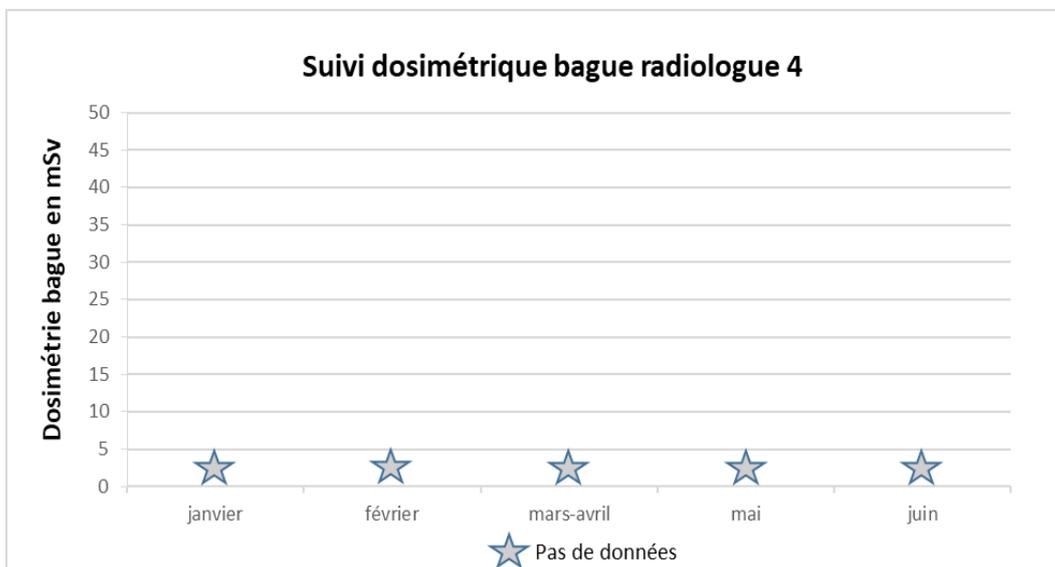
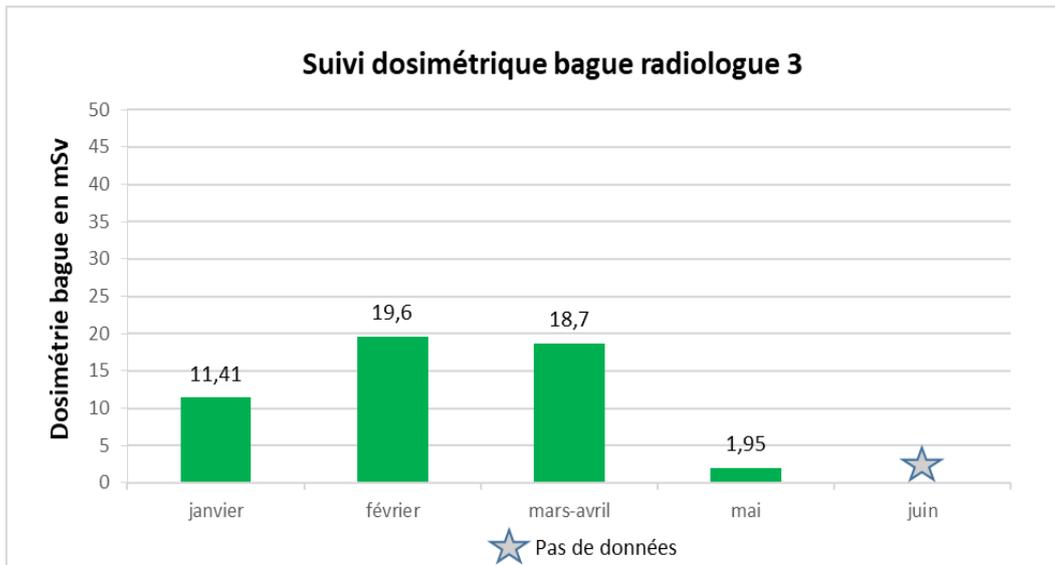
Suivi Bague	janvier	février	mars-avril	mai	juin
Radiologue 1	←—————→				☆
Radiologue 2	←—————→				
Radiologue 3	←—————→				☆
Radiologue 4	☆				
Interne de radiologie	←—————→				
Chirurgien vasculaire 1	☆				
Chirurgien vasculaire 2	←————→	☆	←————→	←————→	
Chirurgien vasculaire 3	←——→	☆	←————→	☆	
Chirurgien vasculaire 4	☆				
Interne de chirurgie vasculaire	←————→				☆
☆ Données manquantes	janvier	février	mars-avril	mai	juin

Figure 8 : Suivi dosimétrique bague.

Dosimétrie bague chez les radiologues

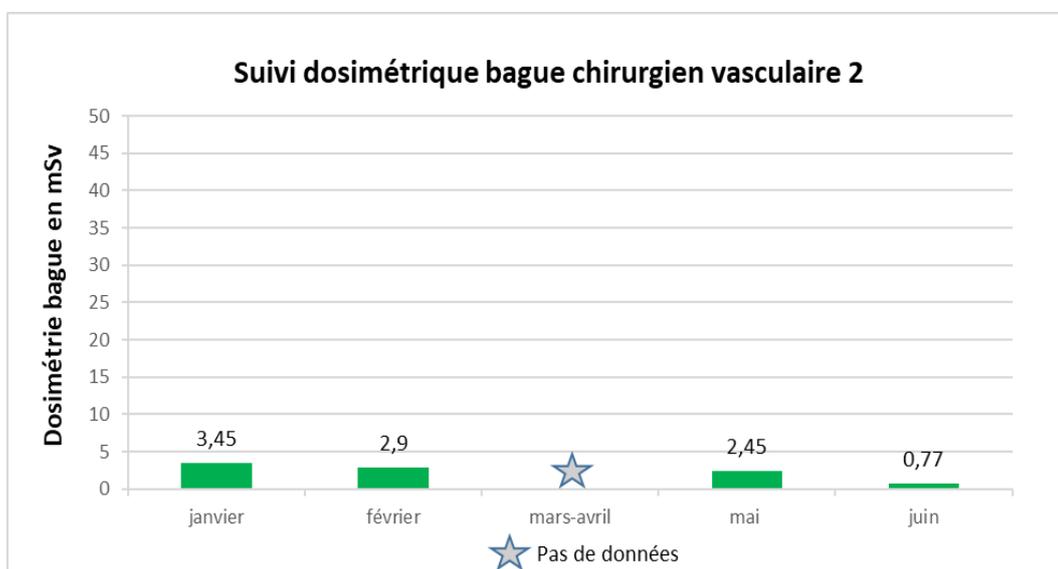
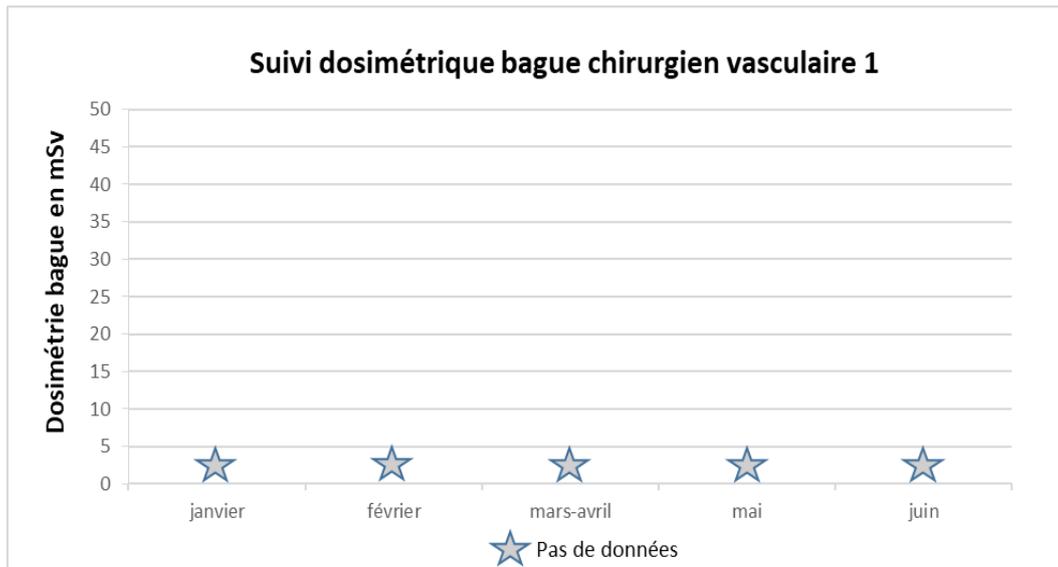
Chez les radiologues, la dose bague maximale enregistrée est de 19,6 mSv par mois et concerne le radiologue 3. La dosimétrie bague moyenne pour les radiologues est de 4,93 mSv par mois, avec un écart-type de 4,74 mSv (annexe 7).

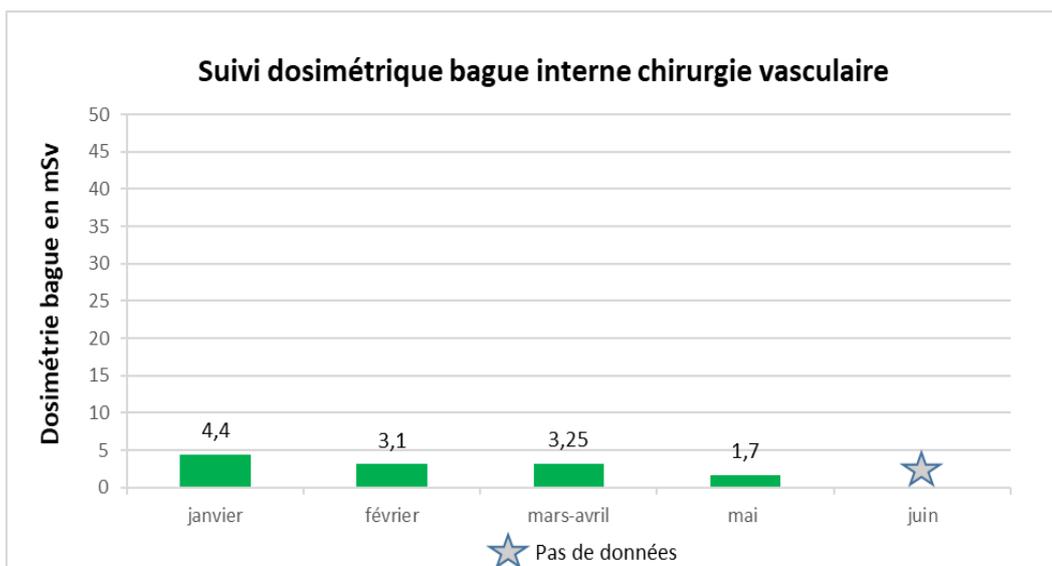
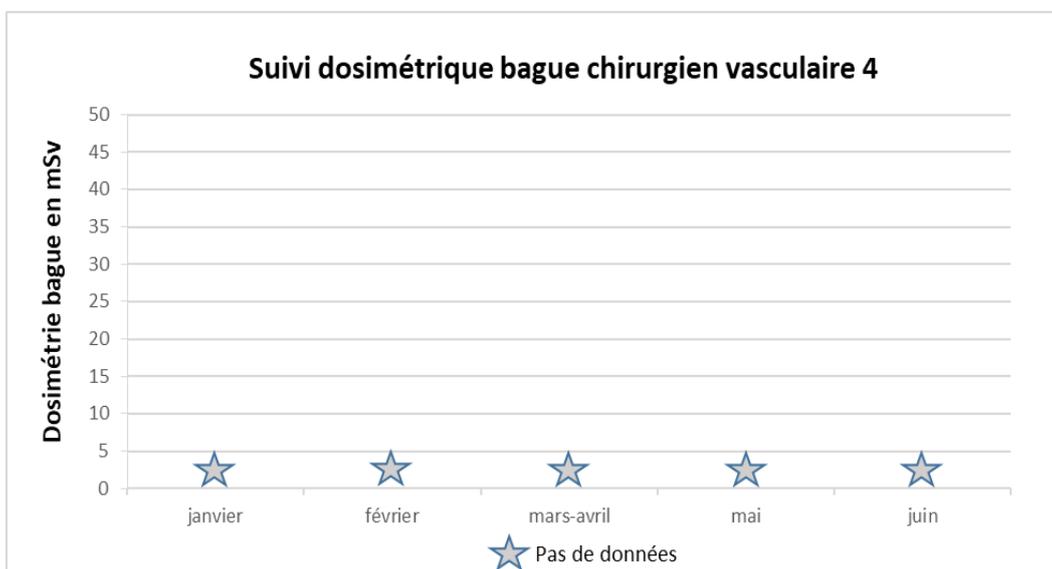
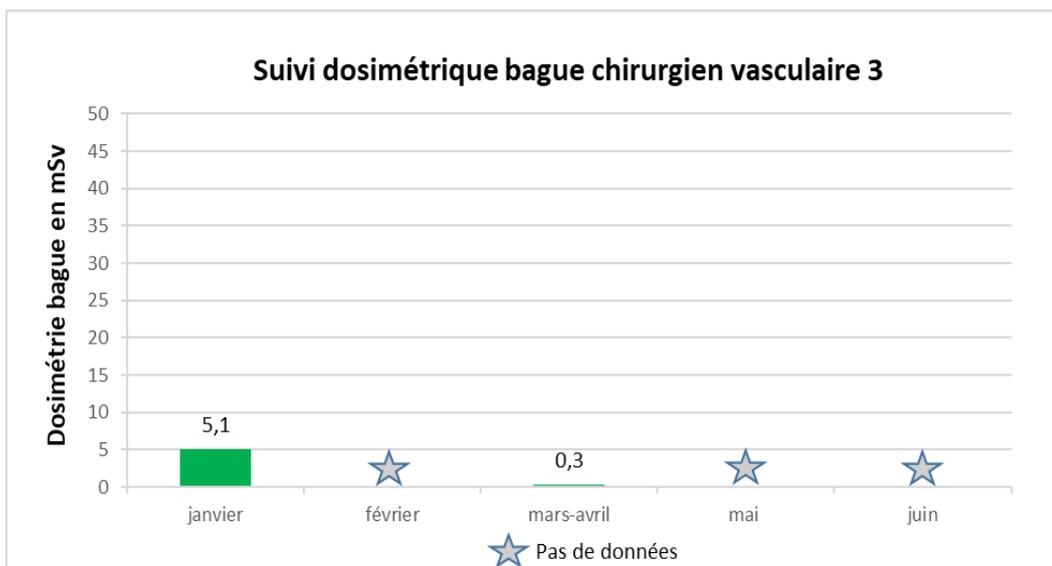




Dosimétrie bague chez les chirurgiens vasculaires

La plus forte dose bague enregistrée pour un chirurgien vasculaire est de 5,1 mSv par mois. La dose bague moyenne est de 2,3 mSv par mois, avec un écart-type de 1,58 mSv. Nous n'avons pas de données durant la période mars-avril pour le chirurgien vasculaire 2, le dosimètre ayant été perdu lors de sa réception à l'IRSN (annexe 7).





Seulement trois des dix praticiens de l'étude, dont les deux internes, ont bénéficié d'un suivi dosimétrique bague complet. Quatre autres praticiens ont eu un suivi partiel. Les chirurgiens vasculaires 1 et 4, ainsi que le radiologue 4 n'ont pas participé au suivi (Figure 9).

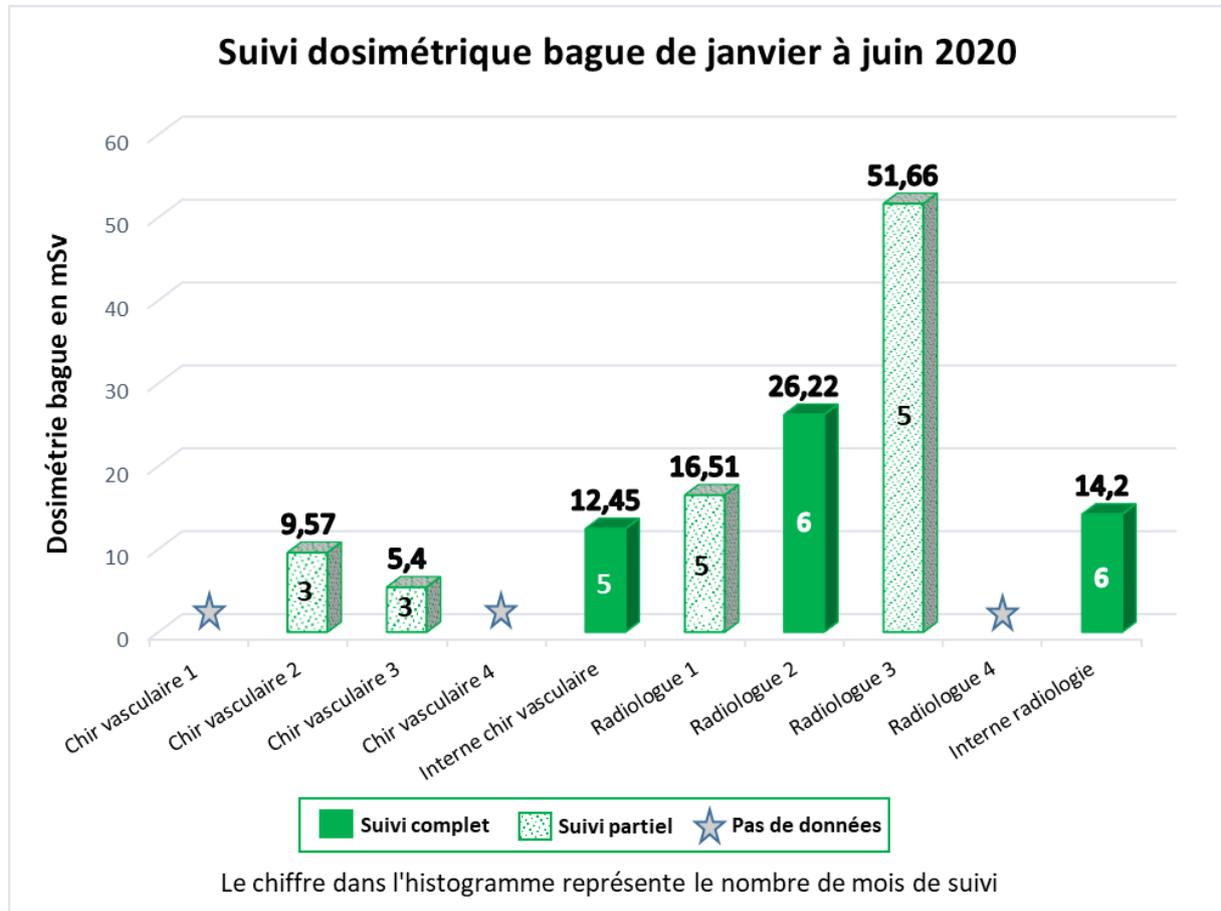


Figure 9

Les dosimétries bague les plus fortes sont retrouvées chez les trois radiologues interventionnelles ayant participé : 16,51 mSv sur quatre mois pour le radiologue 1, 26,22 mSv pour le radiologue 2 sur six mois et 51,66 mSv sur cinq mois pour le radiologue 3. Parmi les chirurgiens vasculaires, l'interne présente la dosimétrie bague la plus importante avec 12,45 mSv sur ses cinq mois de stage (Figure 9).

5. Utilisation des équipements de protection individuelle et collective

Sur les 48 actes interventionnels auxquels nous avons assistés, 20 se sont déroulés en salle monoplan et 28 en salle biplan. Concernant l'utilisation des équipements de protection individuelle, le tablier plombé est porté systématiquement par l'ensemble de l'équipe médicale. Cependant, les lunettes plombées mises à disposition sont encore insuffisamment utilisées, notamment par les radiologues. Parmi les radiologues interventionnels, seul le radiologue 2 porte la totalité des équipements de protection individuelle recommandés (tablier, cache-thyroïde et lunettes plombées), alors que trois des cinq chirurgiens vasculaires portent l'ensemble des équipements (Figures 10 et 11).

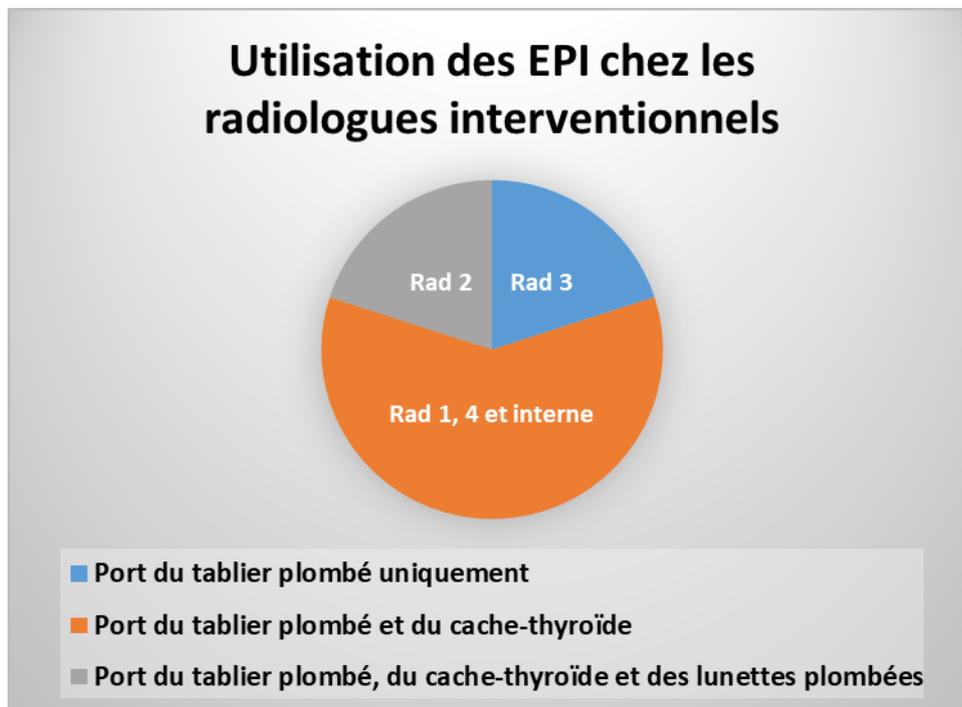


Figure 10

Utilisation des EPI chez les chirurgiens vasculaires

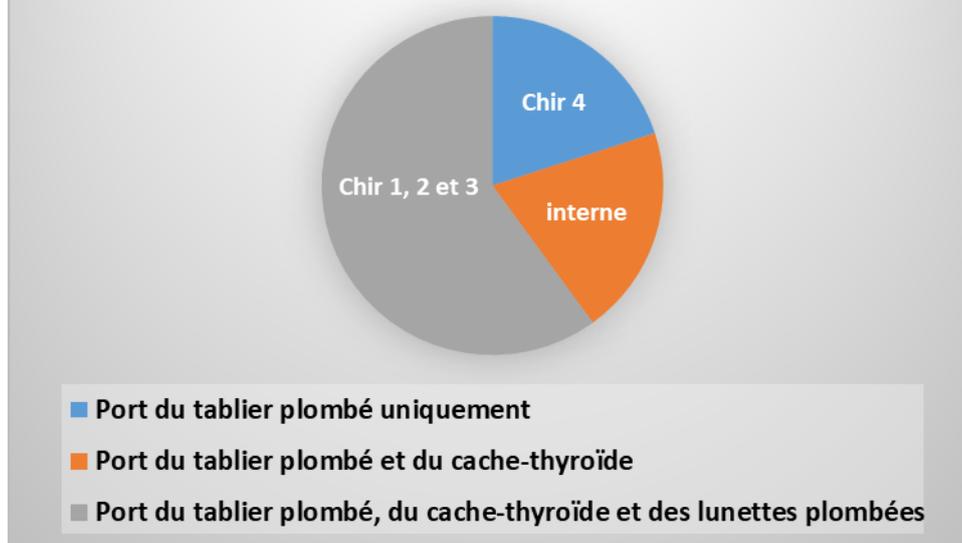


Figure 11

Au cours des observations en salle de radiologie interventionnelle, nous avons pu constater que les équipements de radioprotection collective mis à disposition (suspension plafonnrière, bas-volet et porte latérale plombée) sont utilisés par l'équipe médicale, dès lors que la configuration de l'opération le permet (Figure 12).



Figure 12 : Utilisation des EPC au cours d'une artériographie cérébrale en salle biplan.

E. Discussion

1. Exposition du cristallin aux rayonnements ionisants

a) Dosimétrie du cristallin

L'adhésion au suivi dosimétrique cristallin a été dans l'ensemble meilleure que celle au suivi bague : 40 mois de suivi concernant la dosimétrie cristallin contre 34 mois pour la dosimétrie bague sur 60 mois de suivi attendus. Les doses mesurées au cristallin sans protection sont plus hétérogènes chez les radiologues interventionnels que celles enregistrées chez les chirurgiens vasculaires (respectivement écart-type de 1,42 mSv et 0,42 mSv). Ceci peut s'expliquer en partie par la plus grande diversité des actes radioguidés réalisés par les radiologues, entraînant ainsi des niveaux d'exposition du cristallin plus variables. Les dosimétries cristallin les plus élevées sont enregistrées chez les praticiens dont les activités opératoires, exprimées par le produit dose.surface, sont les plus importantes (radiologues 1 et 3).

Le port plus ou moins rigoureux des capteurs est aussi un élément à prendre en considération. Contrairement au serre-tête, le fait que le dosimètre soit fixé directement sur les lunettes plombées ou le calot, permet d'éviter de l'oublier et de favoriser son utilisation.

b) Efficacité des lunettes plombées

L'atténuation moyenne des rayonnements ionisants n'est que de 16 % pour les quatre modèles de lunettes plombées étudiés. Cependant, ce résultat n'est pas étonnant. En effet, le dosimètre se situe à l'intérieur de la branche gauche et aucune de ces protections ne possède de protection latérale plombée. De plus, en raison de la position du médecin interventionnel par rapport au générateur de rayons X, le dosimètre intérieur gauche est exposé au rayonnement diffusé latéralement. Ces données mettent en évidence l'importance de tester en pratique l'efficacité des lunettes plombées et le bénéfice potentiel que peuvent apporter les protections latérales. C'est pourquoi, des mesures complémentaires sont en cours afin de déterminer l'atténuation réelle des protections aux rayonnements ionisants et ainsi proposer le meilleur EPI.

c) Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit

L'exposition quatre fois plus élevée du cristallin gauche chez les radiologues est cohérente. En effet, lors des opérations, le générateur de rayons X se situe dans la très grande majorité des cas, à gauche des praticiens. Chez les chirurgiens vasculaires, le générateur de rayons X est positionné plus fréquemment en face de l'opérateur, au cours des actes interventionnels vasculaires périphériques. C'est pourquoi, l'écart entre les dosimétries cristallin gauche et droite est moins important que chez les radiologues (annexe 6).

d) Relation dosimétrie cristallin et PDS

(1) Dosimétrie intérieure gauche aux lunettes plombées

La dosimétrie cristallin intérieure gauche (annexe 4 : avec $n = 16$ données) n'est pas significativement associée au PDS, chez l'ensemble des praticiens porteurs de protection (radiologue 2, chirurgiens vasculaires 1, 2 et 3) avec $p = 0,12$ (Figure 13). En effet, les radiologues et les chirurgiens exercent des actes interventionnels différents. Leurs expositions du cristallin aux rayonnements ionisants ne sont pas comparables.

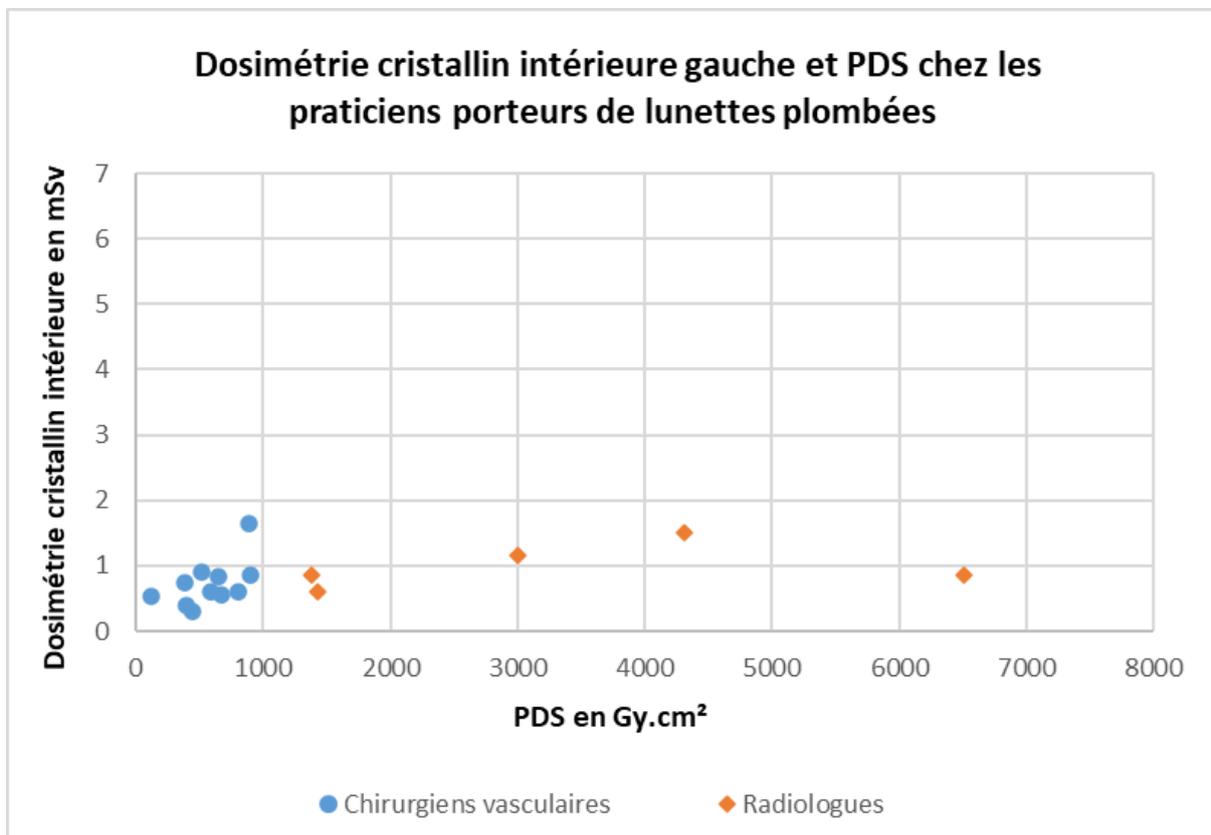


Figure 13

En étudiant seulement les chirurgiens vasculaires porteurs des lunettes plombées, la dosimétrie cristallin intérieure gauche (Annexe 4 avec $n = 11$) n'est toujours pas associée significativement au PDS mais s'en rapproche avec $p = 0,075$ (Figure 14). Même si leur type d'activité est homogène, les trois chirurgiens vasculaires portent des modèles de lunettes plombées ayant des caractéristiques et une atténuation qui leurs sont propres.

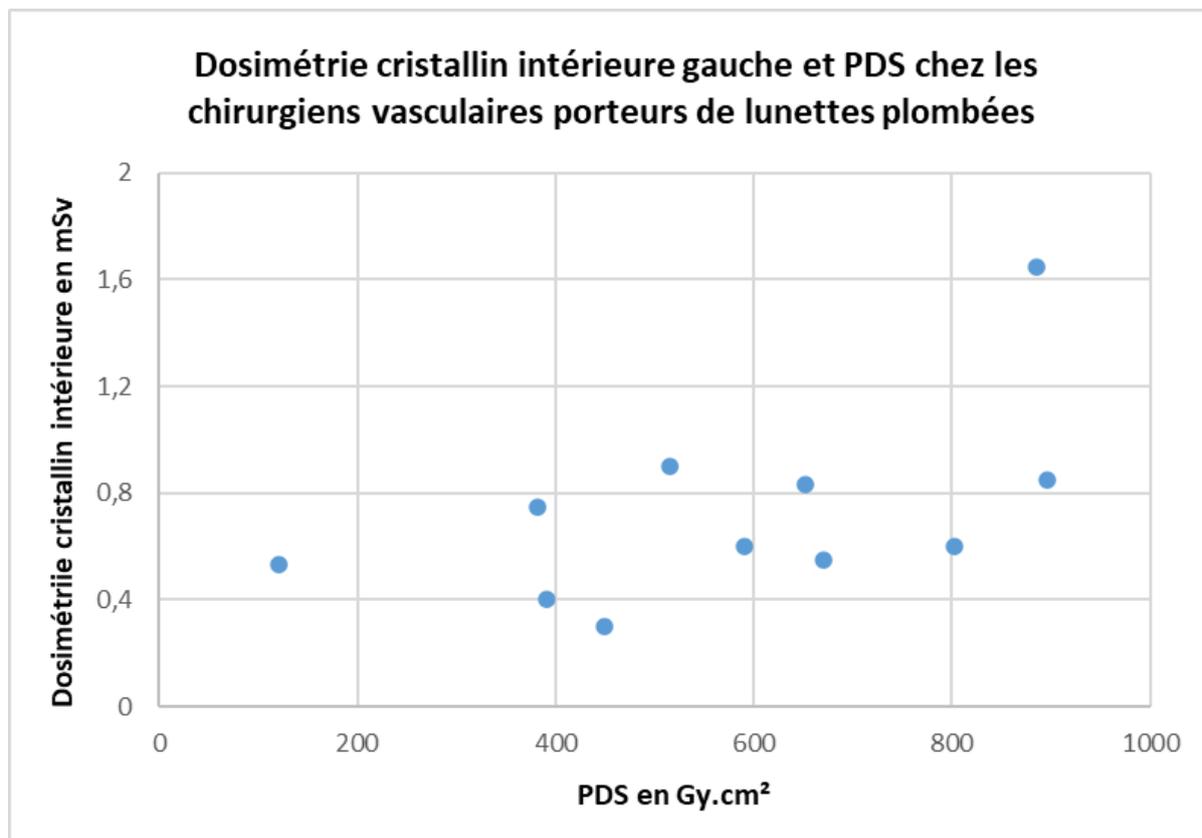


Figure 14

(2) Dosimétrie cristallin extérieure gauche

Chez l'ensemble des praticiens interventionnels, il existe une association significative entre la dosimétrie cristallin extérieure et le PDS (annexe 3 et n = 6) avec un $p < 0,001$ (Figure 15). Les dosimétries cristallin de février et mars-avril 2020 du radiologue 1 ne sont pas prises en compte pour ces analyses car le port du dosimètre a été trop irrégulier.

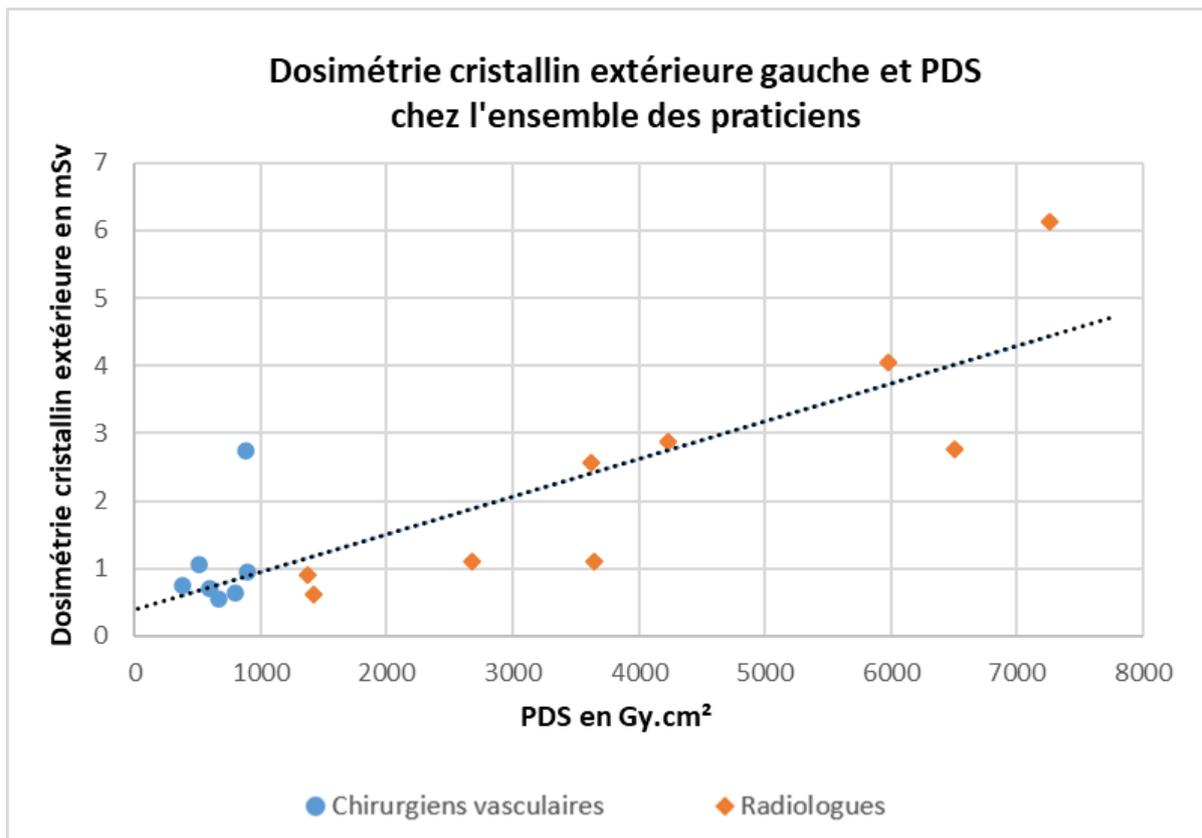


Figure 15

Cependant, lorsqu'on différencie les radiologues des chirurgiens vasculaires, l'association entre la dosimétrie cristallin extérieure et le PDS n'est pas significative chez les chirurgiens vasculaires (Annexe 3 et n = 7) avec $p = 0,32$ (Figure 16). Le faible nombre de données dosimétriques recueillies pour les chirurgiens vasculaires peut se traduire par un manque de puissance du test statistique.

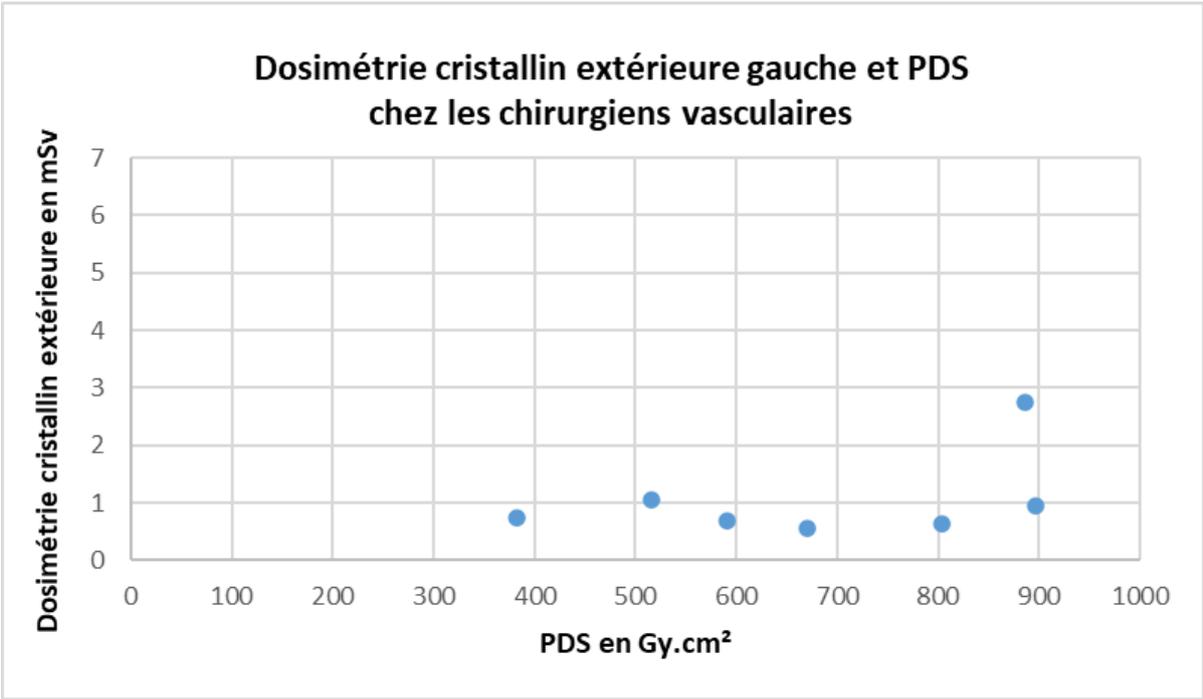


Figure 16

En revanche, chez les radiologues (Annexe 3 et n = 9), l'association entre la dosimétrie cristallin extérieure gauche et le PDS est statistiquement significative : $p = 0,0016$ avec un très bon $R^2=0,78$ (Figure 17).

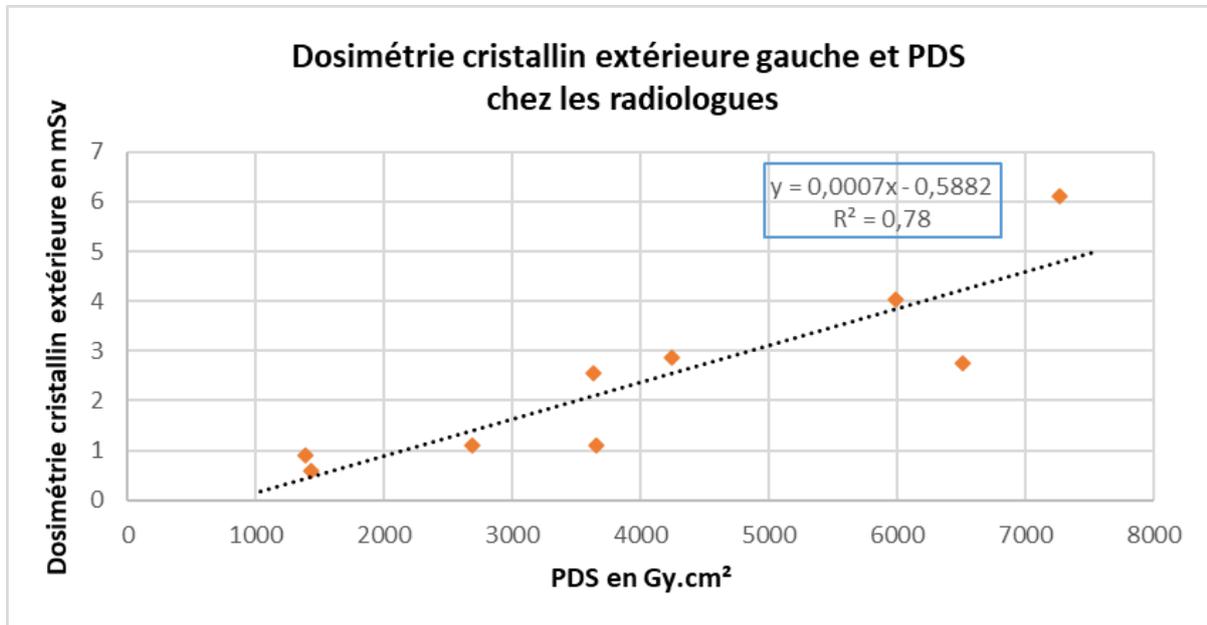


Figure 17

Cette association suit la relation suivante :

$$\text{Dosimétrie cristallin extérieure gauche en mSv} = 0,00074 \times \text{PDS (Gy.cm}^2\text{)} - 0,5882$$

Des résultats similaires montrant une corrélation linéaire entre la dosimétrie cristallin et le KAP (Kerma-Area Product) ont été mis en évidence dans l'étude ORAMED (67). L'existence d'une association entre la dosimétrie cristallin extérieure gauche et l'activité exprimée par le PDS n'est pas surprenante. D'une part, nous avons vu précédemment que les embolisations présentent le PDS le plus élevé par acte et participent ainsi de façon importante, au PDS total. D'autre part, l'étude ORAMED a démontré que l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants est maximale lors des embolisations (18).

e) Extrapolation annuelle cristallin

Pour les praticiens interventionnels dont le suivi est complet, la dosimétrie cristallin enregistrée sur cette période, est représentative de leur activité et de leur exposition aux rayonnements ionisants. C'est pourquoi, l'extrapolation annuelle est déterminée en multipliant par deux la dosimétrie enregistrée sur les six mois. Concernant l'interne de chirurgie vasculaire dont le suivi est complet durant ses cinq mois de stage, la dosimétrie enregistrée est multipliée par 2,4 (tableau 1).

Suivi cristallin complet	Dosimétrie en mSv (suivi)	Extrapolation sur 12 mois en mSv
Radiologue 2	4,86 (6 mois)	9,72
Radiologue 3	11,63 (6 mois)	23,3
Interne radiologie	4,07 (6 mois)	8,14
Chirurgien vasculaire 1	4,41 (6 mois)	8,82
Chirurgien vasculaire 2	3,23 (6 mois)	6,46
Interne chirurgie vasculaire	3,4 (5 mois)	8,16
Manip radio	0,95 (6 mois)	1,9
MAR	0,1 (6 mois)	0,2
IBODE	0 (6 mois)	0

Tableau 1

Une association entre la dosimétrie cristallin extérieure gauche et le PDS est démontrée chez les radiologues. La dosimétrie cristallin sur douze mois peut ainsi être déterminée à partir du PDS, pour un radiologue dont le suivi est incomplet ou inexistant (PDS de 45 368 Gy.cm² pour l'activité du radiologue 1 et 37 220 Gy.cm² pour celle du radiologue 4 sur douze mois). L'extrapolation de la dosimétrie cristallin gauche sur douze mois consécutifs est ainsi de 27 mSv pour le radiologue 4 et de 33 mSv pour le radiologue 1 (Figure 18).

Extrapolation annuelle radiologue 1 :
Dosimétrie cristallin extérieure = 0,00074 x 45 368 – 0,5882 = 33 mSv

Extrapolation annuelle radiologue 4 :
Dosimétrie cristallin extérieure = 0,00074 x 37 220 – 0,5882 = 27 mSv

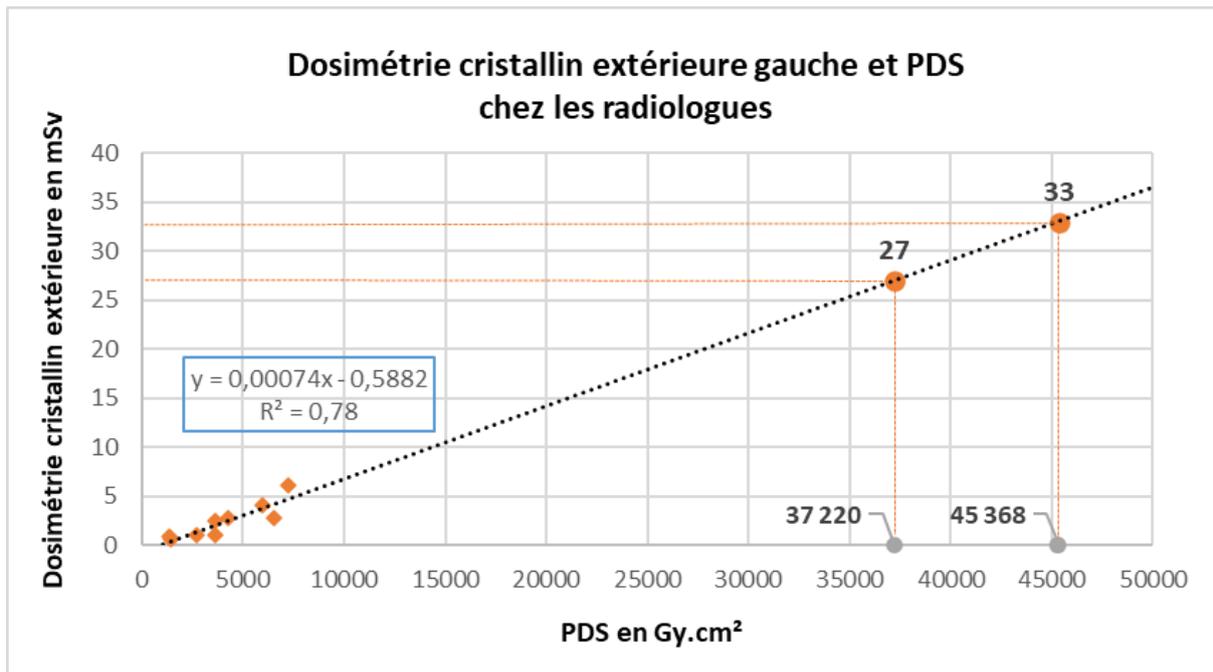


Figure 18

Concernant le chirurgien vasculaire 3, nous ne disposons pas assez de données pour exprimer l'extrapolation annuelle par un intervalle de doses. La dosimétrie cristallin annuelle minimale pour cet opérateur est de 7,2 mSv (0,6 mSv multiplié par 12). La dosimétrie annuelle maximale, quant à elle, ne peut pas être évaluée. Pour le chirurgien vasculaire 4, aucune extrapolation ne peut être réalisée, faute de données disponibles.

Les extrapolations cristallin annuelles les plus élevées sont observées chez les radiologues interventionnels : 33 mSv pour le radiologue 1 sur douze mois consécutifs, 9,72 mSv pour le radiologue 2, 23,3 mSv pour le radiologue 3 et 27 mSv pour le radiologue 4. Parmi ces quatre praticiens, trois présentent une extrapolation annuelle qui dépasse la nouvelle valeur limite d'exposition fixée à 20 mSv sur douze mois consécutifs (entrant en vigueur à partir du 1^{er} juillet 2023). Il est important de noter, que ces dépassements concernent des radiologues qui ne portent pas de lunettes plombées. Les trois chirurgiens vasculaires et les deux internes du service, présentent une dose cristallin inférieure à 10 mSv sur douze mois consécutifs. Le reste de l'équipe médicale a une exposition annuelle du cristallin très faible : inférieure à 2 mSv sur douze mois pour le manipulateur référent en radiologie et le poste de MAR, voire nulle pour le poste d'IBODE (Figure 19).

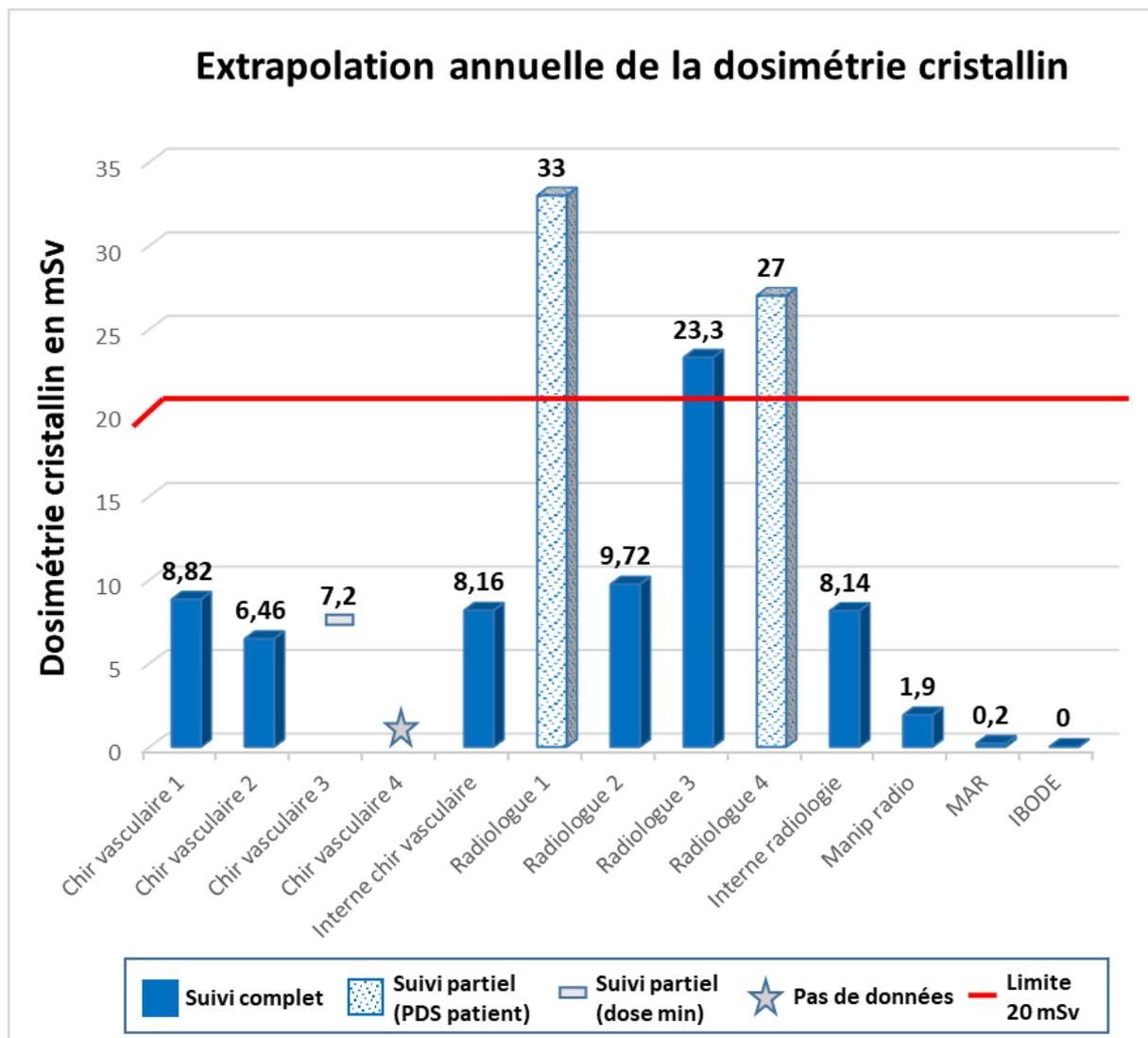


Figure 19

2. Exposition des mains aux rayonnements ionisants

a) Dosimétrie bague

Comme pour le cristallin, les doses mesurées aux extrémités sont plus hétérogènes chez les radiologues interventionnels que chez les chirurgiens vasculaires (respectivement écart-type de 4,7 mSv et 1,58 mSv). La plus faible adhésion au port du dosimètre bague peut s'expliquer en partie par une gêne ressentie par certains opérateurs lors de son utilisation et le souci de respecter l'asepsie opératoire stricte.

Bien que le radiologue 1 a exercé l'activité opératoire la plus importante (Figure 1), sa dosimétrie bague enregistrée au cours du suivi est moins élevée que celles des radiologues 2 et 3. Le radiologue 1 a en effet, moins porté le dosimètre, sa dose bague a donc été en partie sous-estimée. D'autre part, ce praticien a réalisé moins d'actes proximaux que les radiologues 2 et 3, se traduisant probablement par une exposition moindre des doigts aux rayonnements ionisants (tableau 2).

Opérateur	PDS des drainages biliaires sur 6 mois en Gy.cm ²
Radiologue 1	756
Radiologue 2	943
Radiologue 3	1281

Tableau 2

b) Relation dosimétrie bague et PDS

En étudiant les résultats dosimétriques bague chez l'ensemble des praticiens (Annexe 7 avec $n = 17$), on observe une association statistiquement significative entre la dosimétrie bague et le PDS avec $p = 0,01$ (Figure 20). La dosimétrie bague du radiologue 3 pour le mois de mai et celle du radiologue 1 pour le mois de janvier ne sont pas prises en compte dans les analyses. Le dosimètre n'a pas été porté assez régulièrement à ces périodes.

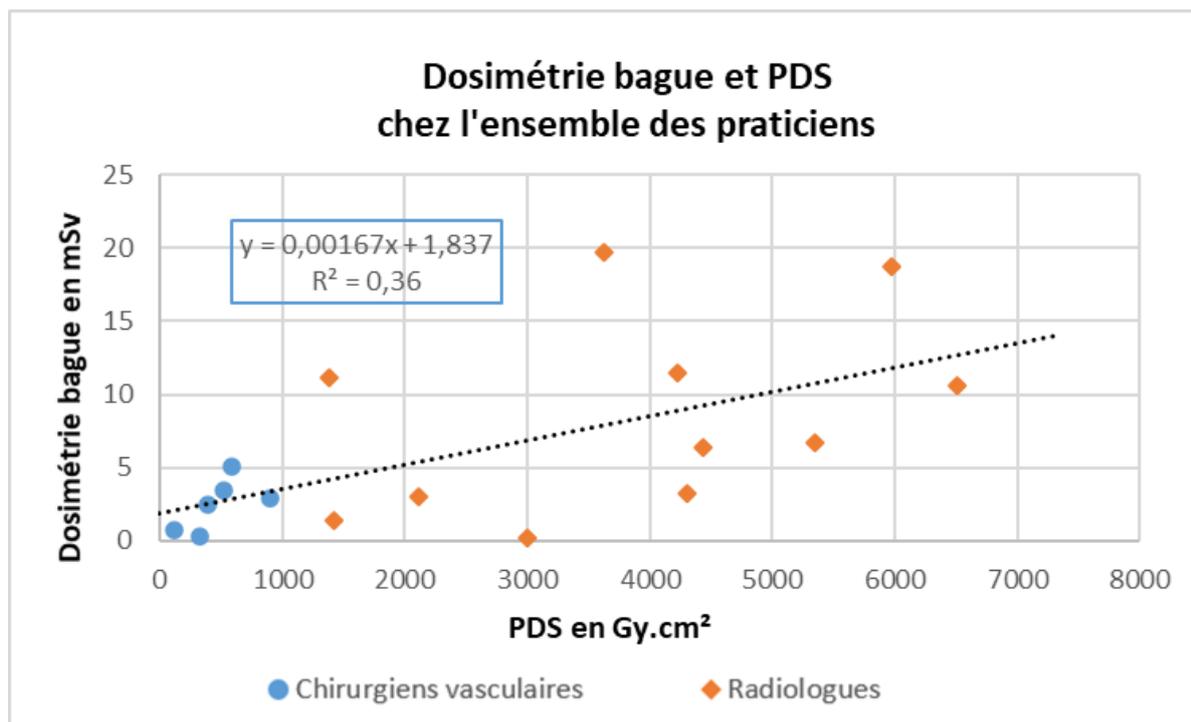


Figure 20

Cependant, le coefficient de corrélation multiple R^2 est de 0,36, ce qui signifie que seulement 36 % de la variance de la dosimétrie bague est expliquée par la variable PDS. Ce résultat confirme que la variable dosimétrie bague est dépendante d'autres facteurs, non pris en compte dans cette analyse (Figure 20).

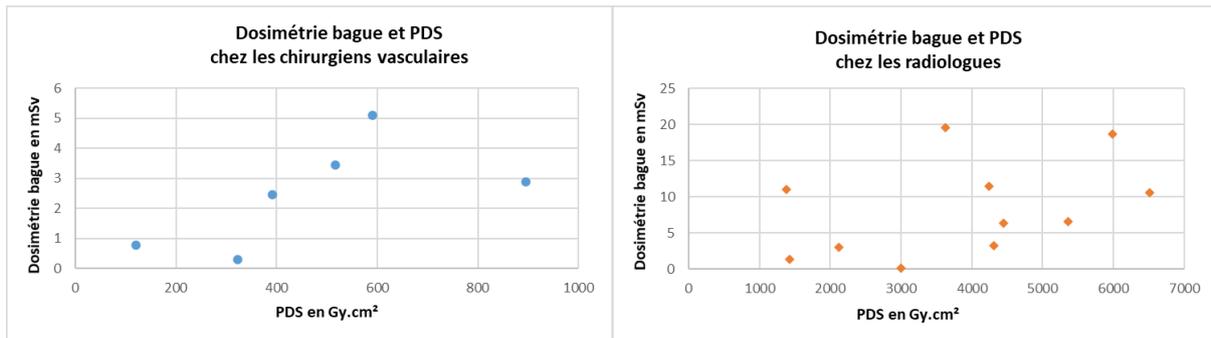


Figure 21

Si l'on considère la dosimétrie badge en fonction du PDS chez les chirurgiens vasculaires et les radiologues séparément (Annexe 7), l'association n'est pas significative ($p = 0,18$ chez les chirurgiens ($n = 6$) et $p = 0,21$ chez les radiologues ($n = 11$)) (Figure 21).

Comme l'activité opératoire est homogène chez les chirurgiens vasculaires, il est probable que leur dosimétrie badge soit comparable. Nous n'avons pas recueilli suffisamment de données ($n = 6$) car le suivi dosimétrique badge a été incomplet. Il est possible que le manque de puissance du test ne nous permette pas de conclure à une association entre la dosimétrie badge et le PDS dans cette population (Figure 21).

Un des éléments qui peut expliquer la faible corrélation entre la dosimétrie badge et le PDS chez les radiologues, est la grande variabilité des actes réalisés, avec la nécessité de garder les mains plus ou moins près du faisceau du générateur de rayons X. Ainsi, un opérateur réalisant un plus grand nombre d'actes dits proximaux, est susceptible de présenter une exposition plus élevée des doigts aux rayonnements ionisants (Figure 22).



Figure 22 : exemple d'un acte proximal avec la réalisation d'un drainage biliaire en salle monoplan de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen.

c) Extrapolation annuelle bague

Concernant les trois opérateurs ayant un suivi bague complet, l'extrapolation annuelle de la dosimétrie bague est réalisée à partir des données enregistrées au cours de ces six mois de suivi (tableau 3).

Suivi bague complet	Dosimétrie en mSv (suivi)	Extrapolation sur 12 mois en mSv
Radiologue 2	26,2 (6 mois)	52,4
Interne radiologie	14,2 (6 mois)	28,4
Interne chirurgie vasculaire	12,45 (5 mois)	34,7

Tableau 3

Il existe une association significative entre la variable dosimétrie bague et le PDS. Cependant, ce modèle explique seulement 36 % des variations de la dosimétrie bague par le PDS ($R^2 = 0,36$). C'est pourquoi, il nous semble hasardeux de réaliser une extrapolation annuelle de la dosimétrie bague à partir du PDS, pour les praticiens dont le suivi est incomplet (Figure 20).

Ainsi, pour l'ensemble des opérateurs qui ont un suivi incomplet, les projections annuelles bague sont faites sous la forme d'un intervalle de doses (tableau 4).

Suivi bague incomplet	Dosimétrie bague en mSv			
	Dosimétrie totale en mSv sur n mois	Dosimétrie mensuelle maximale en mSv	Dosimétrie annuelle minimale en mSv	Dosimétrie annuelle maximale en mSv
Radiologue 1	16,51 sur 5 mois	6,36	39,6	76,32
Radiologue 3	51,66 sur 5 mois	19,6	124	235,2
Chirurgien vasculaire 2	9,57 sur 3 mois	3,45	38,3	41,4
Chirurgien vasculaire 3	5,4 sur 3 mois	5,1	21,6	61,2

Tableau 4

Les extrapolations annuelles bague les plus élevées concernent les radiologues: de 39,6 à 76,3 mSv pour le radiologue 1, 52,4 mSv pour le radiologue 2 et de 124 à 235,2 mSv pour le radiologue 3. Concernant le radiologue 4 et les chirurgiens vasculaires 1 et 4, aucune extrapolation de leur dosimétrie bague n'est possible, faute de données. Nous n'avons pas mis en évidence de dépassements de la valeur limite d'exposition, fixée à 500 mSv pour les extrémités, pour un travailleur classé en catégorie A. Le radiologue 2 présente un intervalle de doses supérieur à la valeur seuil fixée à 150 mSv sur douze mois consécutifs pour un personnel classé en catégorie B (Figure 23).

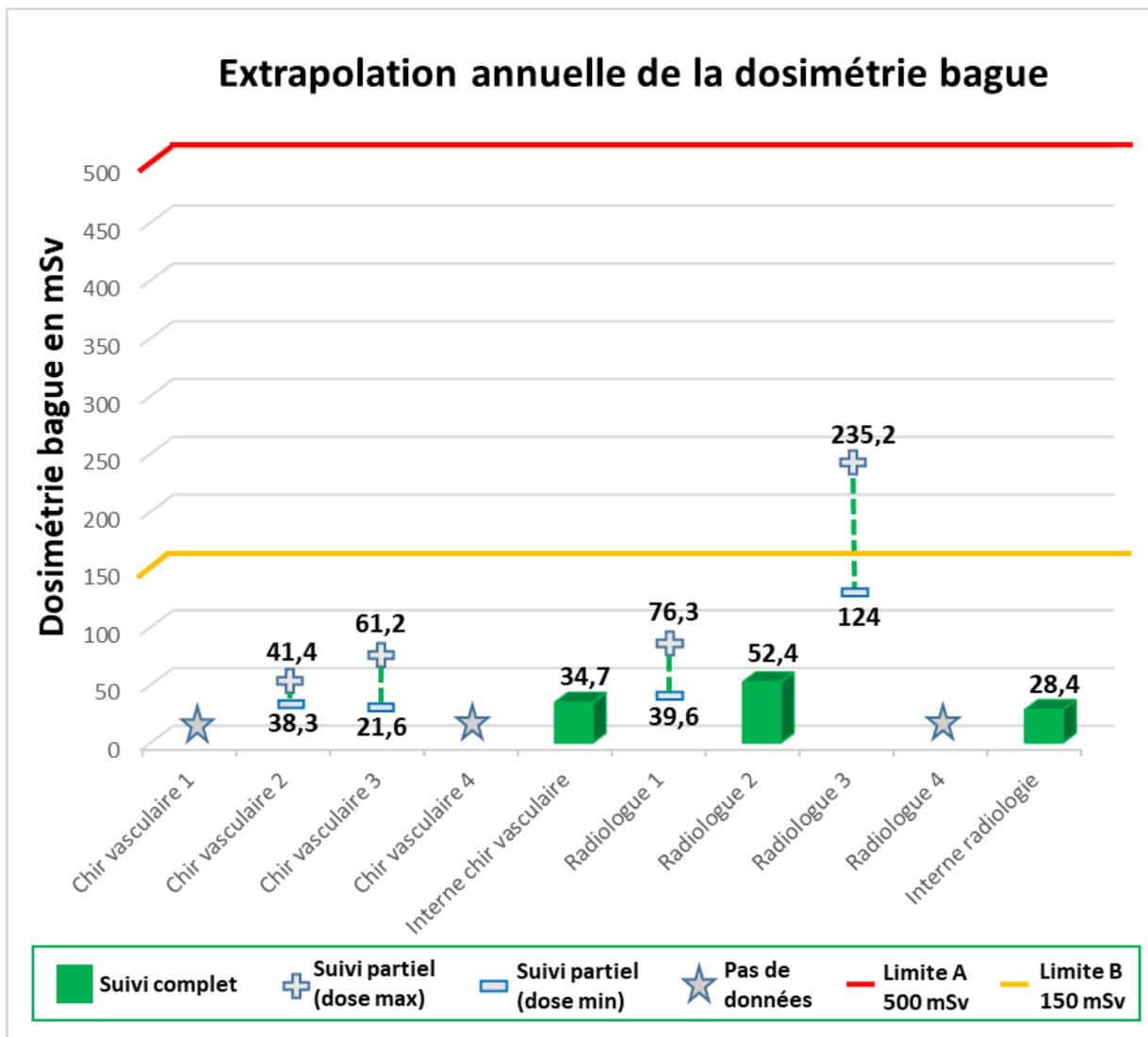


Figure 23

3. Utilisation des équipements de protection individuelle

Les radiologues présentent une plus forte exposition du cristallin aux rayonnements ionisants que les chirurgiens vasculaires. Paradoxalement, l'utilisation de lunettes plombées est moins fréquente chez les radiologues que chez les praticiens vasculaires. Il est essentiel de prendre en considération l'ergonomie des protections pour favoriser leur utilisation par les opérateurs. Les radiologues réalisent divers types d'actes interventionnels, avec un temps opératoire plus ou moins long et un nombre d'interventions important. Cela peut constituer un frein à l'utilisation systématique des protections.

4. Dosimétrie passive poitrine

La dosimétrie passive poitrine Hp (10), portée sous le tablier plombé, enregistre des niveaux d'exposition faibles pour l'ensemble du personnel suivi, avec une dose maximale de 0,95 mSv enregistrée sur six mois (Figure 24). Certains praticiens ne portent pas la dosimétrie passive poitrine, leur évaluation de l'exposition du corps entier aux rayonnements est ainsi sous-estimée. Les niveaux d'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants mis en évidence dans cette étude, soulignent l'importance de mettre à disposition une dosimétrie passive complémentaire et adaptée, pour les zones du corps non protégées par le tablier plombé.

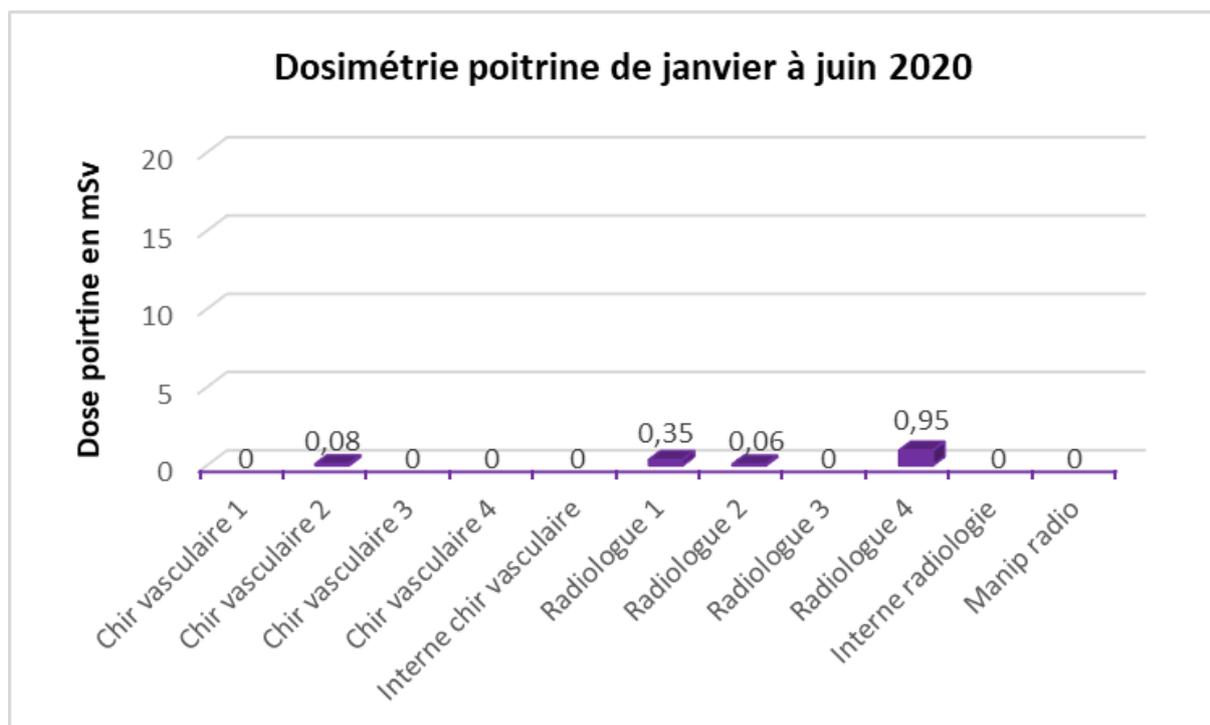


Figure 24

5. Suivi médical individuel

Pour trois radiologues du service, une exposition significative du cristallin aux rayonnements ionisants, supérieure à la VLE de 20 mSv sur douze mois consécutifs, est mise en évidence. Les extrapolations annuelles cristallin chez les chirurgiens vasculaires et le reste de l'équipe médicale restent modérées à très faibles. Les résultats dosimétriques ont été rendus lors d'une consultation individuelle puis lors d'une séance de restitution collective avec l'anonymisation des résultats.

Concernant l'exposition des mains, la VLE de 500 mSv aux extrémités semble être respectée. Cependant, un des radiologues est susceptible d'atteindre la valeur seuil de la catégorie B (150 mSv sur douze mois). Etant donné ce résultat, il est nécessaire de classer les radiologues en catégorie A, avec un suivi individuel renforcé tous les ans. Les chirurgiens vasculaires relèvent d'un classement en catégorie B car aucun risque de dépassement du seuil des 150 mSv n'est mis en évidence. Des mesures complémentaires doivent être réalisées afin d'évaluer leur exposition au bloc opératoire de chirurgie vasculaire pour confirmer ce classement.

Le produit dose.surface, enregistré lors des opérations, apparaît comme un marqueur fiable de l'exposition du cristallin en dehors de toute protection plombée. Cependant, cette méthode d'évaluation ne doit pas se substituer au port du dosimètre cristallin. En effet, elle ne permet pas de détecter de potentiels incidents d'exposition. Au vu de ces résultats, nous préconisons de poursuivre le suivi dosimétrique cristallin et bague, mensuellement pour les radiologues interventionnels et trimestrielle chez les chirurgiens vasculaires. Les internes effectuant leur stage dans le service doivent être intégrés dans le suivi. De plus, il ne semble pas nécessaire de mettre en place de suivi dosimétrique cristallin chez les manipulateurs en radiologie et aux postes de MAR et d'IBODE. En effet leur exposition est très faible voire nulle. Nous recommandons l'affichage d'une signalisation spécifique, concernant le risque d'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants, dans les salles de radiologie interventionnelle.

Le volume de l'activité interventionnelle augmente chaque année en France. Une exposition professionnelle répétée à de faibles doses de rayonnements ionisants nécessite chez le personnel médical, une attention particulière aux effets potentiels sur leur santé. Il n'existe ni

réglementation ni recommandation de la littérature scientifique concernant les modalités du suivi médical à mettre en place. La nécessité d'une démarche de dépistage repose sur les critères de Wilson et Jungner (72). Le développement d'une cataracte radio-induite peut occasionner une gêne fonctionnelle importante. De plus, les opacités précliniques peuvent être décelées en amont et les moyens de diagnostic et de traitement sont facilement disponibles. C'est pourquoi, en se basant sur ces critères définis par l'organisation mondiale de la santé, nous préconisons chez les praticiens interventionnels la mise en place d'un dépistage des opacités cristalliniennes et de la cataracte par un examen ophtalmologique à l'embauche puis tous les cinq ans au cours de leur carrière.

Les bénéfices d'un dépistage périodique des anomalies microvasculaires radio-induites, par capillaroscopie sous-unguéale, restent à évaluer. Bien que cet examen puisse dépister des anomalies précoces des capillaires, l'évolutivité de ces lésions en radiodermite chronique reste incertaine. De plus, il existe peu de traitements efficaces pour traiter la radiodermite chronique, une fois déclarée. Au vu de ses éléments, il nous paraît nécessaire qu'un groupe d'experts valide cette démarche avant de mettre en place un tel dépistage.

F. Limites

Le caractère monocentrique de cette étude ne nous a pas permis d'inclure un nombre important de praticiens interventionnels. De plus, les équipements de protection individuelle et collective mis à disposition ainsi que le volume et la typologie de l'activité opératoire réalisée, peuvent varier d'un service de radiologie à l'autre.

Ce travail s'est déroulé de janvier à juin 2020, dans un contexte sanitaire particulier. Des déprogrammations d'interventions et une baisse de l'activité interventionnelle ont eu lieu durant la période de mars-avril. C'est pourquoi, les extrapolations annuelles des dosimétries cristallin et bague, sont probablement en partie sous-estimées. Le port effectif des dosimètres n'a pas pu être vérifié avec précision pour chaque praticien. Les opérateurs ont moins bien adhéré au suivi dosimétrique bague. L'extrapolation annuelle de la dosimétrie bague a été exprimée plus fréquemment par un intervalle de doses. Elle est donc moins précise.

Il est important de noter que les actes réalisés par les chirurgiens vasculaires, dans le service de radiologie interventionnelle, ne représentent qu'une partie de leur activité opératoire. Des mesures dosimétriques complémentaires sont donc nécessaires dans les autres salles de bloc opératoire afin d'évaluer leur exposition aux rayonnements ionisants dans son ensemble.

G. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser l'activité opératoire puis d'évaluer l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants, chez les praticiens du service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen.

Malgré la bonne utilisation des équipements de protection collective, l'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants reste importante chez les radiologues, avec un risque de dépassement de la valeur limite d'exposition de 20 mSv sur douze mois consécutifs. Le port des équipements de protection individuelle, lunettes ou visières plombées, est donc indispensable afin de réduire l'exposition de l'œil de l'opérateur et limiter les effets potentiels sur la santé. Concernant l'efficacité des différents modèles de lunettes et visières, un second travail est en cours, afin de trouver la meilleure protection et réduire l'exposition du cristallin.

Ces résultats rappellent la nécessité, pour les praticiens interventionnels, d'utiliser au cours des opérations, l'ensemble des équipements de radioprotection collective ou individuelle, afin d'atténuer de façon optimale leur exposition professionnelle aux rayonnements ionisants. Ce travail a permis de sensibiliser les radiologues et les chirurgiens vasculaires à cette problématique par une présence rapprochée de l'équipe de santé au travail sur les six mois de l'étude puis lors du rendu des résultats. L'activité interventionnelle se développe au CHU de Rouen avec l'ouverture de nouvelles salles opératoires.

III. BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques :

1. Gauron C, Derock C, Donadille L, Choudat D. La technique de radiologie interventionnelle et l'exposition des professionnels. Grand angle TC 143. Réf Santé Trav. 2013;133 :19-28.
2. Ménéchal P, Valéro M, Megnigbeto C, Marchal C, GODET JL. La radioprotection des patients et des travailleurs en radiologie interventionnelle et au bloc opératoire. Hyg Séc Trav. 2011;222:27-33.
3. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2010. United Nations New York. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Vol. I, ISBN 978-92-1-142274-0.
4. Godard O, Lochard J. L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution. Ecole Polytechnique Centre National de la recherche scientifique. Juin 2005.
5. Linet MS, Kim KP, Miller DL, Kleinerman RA, Simon SL, Berrington de Gonzalez A, Historical Review of Occupational Exposures and Cancer Risks in Medical Radiation Workers. Radiat Res. 2010 Dec;174(6):793-808.
6. Rohrschneider W. Studies on the formation and the morphology of Rontgen-radiation cataract in humans. In German: Arch f Augenh. 1932;106:221–54.
7. Wassilieff S. Cataracte et rayonnements ionisants. Radioprotection. 2009 Oct;44(4):505–17.
8. Cataracte. Collège des Ophtalmologistes Universitaires de France (COUF). 2017.
9. World Health Organization (WHO). Magnitude and causes of visual impairment. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>. Accessed September 22/04/2020.
10. Belkacemi Y, Touboul E, Méric JB, Rat P, Warnet JM. Cataracte radio-induite : aspects physiopathologiques, radiobiologiques et cliniques. Cancer Radiothérapie. Aout 2001;5(4):397-412.

11. Fecondo JV, Augusteyn RC. Superoxyde dismutase, catalase and glutathione peroxydase in the human cataractous lens. *Exp Eye Res.* 1983 Jan;36(1):15-23.
12. Spector A, Wang GM, Wang RR, Li WC, Kuszak JR. A brief photochemically induced oxidative insult causes irreversible lens damage and cataract. I. Transparency and epithelial cell layer. *Exp Eye Res.* 1995 May;60(5):471–481.
13. Reddy VN, Giblin FJ. Metabolism and function of glutathione in the lens. In: Nugent K, Whelan J, Eds. *Human cataract formation. Ciba Foundation Symposium in Human Cataract Formation* 106. 1984:65-87.
14. Hightower KR, Dering M. Development and reversal of lens opacification caused by calcium. *Invest ophthalmol Vis Sci.* 1984 Sep;25(9):1108-11.
15. Vano E, Gonzalez L, Fernandez JM, Haskal ZJ. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology.* 2008 Sep;248(3):945-53.
16. Kim, K.P., Miller, D.L., Balter, S., Kleinerman RA, Linet MS, Kwon D, Simon SL. Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* 2008 Mar;94(3):211-27.
17. Efstathopoulos EP, Pantos I, Andreou M, Gkatzis A, Carinou E, Koukorava C, Kelekis NL, Brountzos E. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures. *Br J Radiol.* 2011 Jan;84(997):70-7.
18. Vanhavere F, Carinou E, Domienik J, Donadille L, Ginjaume M, Gualdrini G, Koukorava C, Krim S, Nikodemova D, Ruiz-Lopez N, Sans-Merce M, Struelens L. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: final results of the ORAMED project. *Radiat Meas.* 2011 Nov;46(11):1243–7.
19. Koukorava C, Carinou E, Simantirakis G, Vrachliotis TG, Archontakis E, Tierris C, Dimitriou P. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry.* 2011 Mar;144(1-4):482-6.
20. Seals KF, Lee EW, Cagnon CH, Al-Hakim RA, Kee ST. Radiation-Induced Cataractogenesis: A Critical Literature Review for the Interventional Radiologist. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2016 Feb;39(2):151-60.
21. Ainsbury EA, Bouffler SD, Dörr W, Graw J, Muirhead CR, Edwards AA, Cooper J. Radiation Cataractogenesis: A Review of Recent Studies. *Radiat Res.* 2009 Jul;172(1):1-9.
22. Hammer GP, Scheidemann-Wesp U, Samkange-Zeeb F, Wicke H, Neriishi K, Blettner M. Occupational exposure to low doses of ionizing radiation and cataract

- development: a systematic literature review and perspectives on future studies. *Radiat Environ Biophys.* 2013 Aug;52(3):303-19.
23. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21 (1-3).
 24. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4).
 25. Shore RE. Radiation and Cataract Risk: Impact of recent epidemiologic studies on ICRP judgments. *Mutat Res.* 2016 Oct-Dec;770(Pt B):231-237.
 26. Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, MacVittie TJ, Aleman BM, Edgar AB, Mabuchi K, Muirhead CR, Shore RE, Wallace WH. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP.* 2012;41:1–322.
 27. Jacob S, Michel M, Brezin AP, Laurier D, Bernier MO. Ionizing radiation as a risk factor for cataract: what about low-dose effects?. *J Clin Exp Ophthalmol.* 2011.
 28. Vañó E, González L, Beneytez F, Moreno F. Lens Injuries Induced by Occupational Exposure in Non-Optimized Interventional Radiology Laboratories. *Br J Radiol.* 1998 Jul;71(847):728-33.
 29. Junk, AK, Haskal Z, Worgul BV Cataract in interventional radiology an occupational hazard? *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2004 May; 45(13):388.
 30. Duran A, Vano E, Kleinman N, Echeverri D, Cabrera M, Miller M. Retrospective evaluation of lens injuries and dose study. *J Am Coll Cardiol.* 2011; 57(14).
 31. Jacob S, Michel M, Spaulding C, Boveda S, Bar O, Brézin AP, Strehö M, Maccia C, Scanff P, Laurier D, Bernier MO. Occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology (O'CLOC study): are X-Rays involved?. *BMC public health* 2010 Sep;10:537.
 32. Jacob S, Boveda S, Bar O, Brézin AP, Maccia C, Laurier D, Bernier MO. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: Results of a French multicenter observational study. 2013 Sep;167(5):1843-7.
 33. Struelens L, Covens P, Benadjaoud M, Auvinen A, Gianicolo E, Wegener A, Domienik J, Carinou E, Dragusin O, Teles P, Widmark A, Ciraj-Bjelac O, Grazia Andreassi M, Padovani R. The European Epidemiological Study (EURALOC) on Radiation Induced Lens Opacities among Interventional Cardiologists. *Phys Med.* 2018 Dec; 56:106.

34. Coppeta L, Pietroiusti A, Neri A, Spataro A, De Angelis E, Perrone S, Magrini A. Risk of Radiation-Induced Lens Opacities among Surgeons and Interventional Medical Staff. *Radiolo Phys Technol*. 2019 Mar;12(1):26-29.
35. Vañó E, González L, Guibelalde E, Fernández JM, Ten JJ. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br J Radiol*. 1998 Sep;71(849):954-60.
36. Reeves RR, Ang L, Bahadorani J, Naghi J, Dominguez A, Palakodeti V, Tsimikas S, Patel MP, Mahmud E. Invasive cardiologists are exposed to greater left sided cranial radiation: the BRAIN study (brain radiation exposure and attenuation during invasive cardiology procedures). *JACC Cardiovasc Interv*. 2015 Aug 17;8(9):1197-1206.
37. Bondy ML, Scheurer ME, Malmer B, Barnholtz-Sloan JS, Davis FG, Il'yasova D, Kruchko C, McCarthy BJ, Rajaraman P, Schwartzbaum JA, Sadetzki S, Schlehofer B, Tihan T, Wiemels JL, Wrensch M, Buffler PA. Brain tumor epidemiology: consensus from the Brain Tumor Epidemiology Consortium. *Cancer*. 2008 Oct 1;113(7 Suppl):1953-68.
38. Finkelstein MM. Is brain cancer an occupational disease of cardiologists?. *Can J Cardiol*. 1998 Nov;14(11):1385-8.
39. Roguin A, Goldstein J, Bar O, Goldstein JA. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am J Cardiol*. 2013 May 1;111(9):1368-72.
40. Roguin A, Bartal G. Radiation and your Brain: possible measures to reduce radiation in your cath lab. *Endovascular Today*. 2016 August;15(8):63-65.
41. Rajaraman P, Doody MM, Yu CL, Preston DL, Miller JS, Sigurdson AJ, Freedman DM, Alexander BH, Little MP, Miller DL, Linet MS. Cancer Risks in U.S. Radiologic Technologists Working With Fluoroscopically Guided Interventional Procedures. *AJR Am J Roentgenol*. 2016 May;206(5):1101-8
42. Andreassi MG, Cioppa A, Botto N, Joksic G, Manfredi S, Federici C, Ostojic M, Rubino P, Picano E. Somatic DNA damage in interventional cardiologists: a case-control study. *FASEB J*. 2005 Jun;19(8):998-9.
43. Stewart FA, Hoving S, Russell NS: Vascular damage as an underlying mechanism of cardiac and cerebral toxicity in irradiated cancer patients. *Radiat Res*. 2010 Dec;174(6):865-9.

44. Schultz-Hector S, Trott KR: Radiation-induced cardiovascular diseases: is the epidemiologic evidence compatible with the radiobiologic data? *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2007 Jan 1;67(1):10-8.
45. Metz-Flamant C, Bonaventure A, Milliat F, Tirmarche M, Laurier D, Bernier MO. Low doses of ionizing radiation and risk of cardiovascular disease: A review of epidemiological studies. *Rev Epidemiol Sante Publique.* 2009 Oct;57(5):347-59.
46. Little MP, Tawn EJ, Tzoulaki I, Wakeford R, Hildebrandt G, Paris F, Tapio S, Elliott P. Review and meta-analysis of epidemiological associations between low/moderate doses of ionizing radiation and circulatory disease risks, and their possible mechanisms. *Radiat Environ Biophys.* 2010 May;49(2):139-53.
47. Silasi G, Diaz-Heijtz R, Besplug J, Rodriguez-Juarez R, Titov V, Kolb B, Kovalchuk O. Selective brain responses to acute and chronic low-dose Xray irradiation in males and females. *Biochem Biophys Res Commun.* 2004 Dec 24;325(4):1223-35.
48. Marazziti D, Tomaiuolo F, Dell’Osso L, Demi V, Campana S, Piccaluga E, Guagliumi G, Conversano C, Baroni S, Andreassi MG, Picano E. Neuropsychological testing in interventional cardiology staff after long-term exposure to ionizing radiation. *J Int Neuropsychol Soc.* 2015 Oct;21(9):670-6.
49. Atlas de dermatologie professionnelle.radiologue available from : <http://www.atlasedematologieprofessionnelle.com/index.php/Radiologue> (Accessed 10 April 2020).
50. Hymes SR, Strom EA, Fife C. Radiation dermatitis: clinical presentation, pathophysiology, and treatment 2006. *J Am Acad Dermatol.* 2006 Jan;54(1):28–46.
51. Martin M, Lefaix J, Delanian S. TGF-beta1 and radiation fibrosis: a master switch and a specific therapeutic target? *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2000 May;47(2):277-90.
52. Denham JW, Hauer-Jensen M. The radiotherapeutic injury: a complex “wound”. *Radiother Oncol.* 2002 May;63(2):129-45.
53. Aubert B. Évaluation du risque en radiologie interventionnelle. *Arch Mal Prof Environ.* 2002;63(3-4):195-96.
54. Martin CJ. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat Prot Dosimetry.* 2009 Sep;136(3):140-57.
55. Whitby M, Martin CJ. A study of the distribution of dose across the hands of interventional radiologists and cardiologists. *Br J Radiol.* 2005 Mar;78(927):219-29.

56. Donadille L, Tagnard-Mérat F, Rehel JL, Gauron C. Techniques et résultats d'évaluations dosimétriques des extrémités chez les opérateurs en imagerie interventionnelle. IRSN Journée SFRP/SFC. Oct 2009.
57. Struelens L, Carinou E, Dominiek J, Brodecki M, Donadille L, Ferrari P, Koukorava C, Krim S, Nikodemova D, Ruiz-Lopez N, Sans Merce M and Vanhavere F. Doses aux Extrémités et au Cristallin du personnel médical Résultats du projet Européen ORAMED. Congrès National de Radioprotection SFRP. Juin 2011.
58. Tomei F, Papaleo B, Fantini S, Iavicoli S, Baccolo TP, Rosati MV: Vascular effects of occupational exposure to low-dose ionizing radiation. *Am J Ind Med.* 1996 Jul;30:72–77.
59. Perdereau B, Gauron C, Brixy F, Asselain B. Contrôle par capillaroscopie sous unguéale des radioexpositions en milieu hospitalier. *Arch Mal Prof Environ.* 2004;65 (2-3):264.
60. Gauron C, Wild P, Grzebyk M, Derock C, Champion K, Cohen P, Menez C, Tellart AS, Thiel H, Carpentier P, Chamoux A, De Gaudemaris R, Fiessinger JN, Sobaszek A, Donnadille L, Pennarola R, Perdereau B, Choudat D. Exposition des praticiens en radiologie interventionnelle : apport de la capillaroscopie . *INRS références en santé au travail.* Sept 2013;135:39-52.
61. Artignan S, Conso F, Perdereau B, Brixy F. Une radiodermite chronique en radiologie interventionnelle. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement.* Avril 2003;64(2):106-109.
62. Artignan S, Conso F, Hazebroucq V. Radiodermites en radiologie interventionnelle (doses reçues aux mains, dépistage et réparation). *Journal de radiologie.* Mars 2003; 84(3):317-319.
63. Shim DM, Kim YM, Oh SK, Lim CM, Kown BT. Radiation induced hand necrosis of an orthopaedic surgeon who had treated a patient with fluoroscopy guided spine injection. *J Korean Orthop Assoc.* 2014 Jun;49(3):250-254.
64. Instruction n° DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018 relative à la prévention des risques d'exposition aux rayonnements ionisants (chapitre I er du titre V du livre IV de la quatrième partie du code du travail).
65. IRSN Bilan 2018 de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France . Sept 2019.
66. Nikodemová D, Brodecki M, Carinou E, Domienik J, Donadille L, Koukorava C, Krim S, Ruiz-López N, Sans-Merce M, Struelens L, Vanhavere F, Zaknounge R. Staff

- Extremity Doses in Interventional Radiology. Results of the ORAMED Measurement Campaign. *Radiat Meas.* 2011 Nov; 46:1210-1215.
67. Krim S, Brodecki M, Carinou E, Donadille L, Jankowski J, Koukorava C, Dominiek J, Nikodemova D, Ruiz-Lopez N, Sans-Merce M, Struelens L, Vanhavere F. Extremity doses of medical staff involved in interventional radiology and cardiology: Correlations and annual doses (hands and legs). *Radiat Meas.* 2011 Nov;46:1223-1227.
68. Cousins C, Miller DL, Bernardi G, Rehani MM, Schofield P, Vañó E, Einstein AJ, Geiger B, Heintz P, Padovani R, Sim KH. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. *Ann. ICRP* 42(1). 2013.
69. Koukorava C, Carinou E, Ferrari P, Krim S, Struelens L. Study of the parameters affecting operator doses in interventional radiology using Monte Carlo simulations. *Radiat. Meas.* 2011;46(11):1216-1222.
70. Sturchio GM, Newcomb RD, Molella R, Varkey P, Hagen PT, Schueler BA. Protective Eyewear Selection for Interventional Fluoroscopy. *Health Phys.* 2013 Feb;104(2 Suppl 1):S11-6
71. Guersen J, Donadille L, Rehel JL, Charvais A, Zaknoune R, Cassagnes L, Chabrot P, Boyer L. Intérêt des gants radio-atténuateurs en radiologie interventionnelle : une évaluation expérimentale. *Radioprotection.* 2011;46(3):387-97.
72. Wilson JMG et Jungner G. Principes et pratique du dépistage des maladies. Organisation mondiale de la santé. 1970.

IV. ANNEXES

Annexe 1 : Activité opératoire des médecins interventionnels, exprimée par le PDS total et en nombre de demi-journées de vacation au cours du suivi.

Opérateur	PDS en Gy.cm ²						Demi-journées de vacation (6 mois)	Type d'activité
	Janvier	Février	Mars-Avril	Mai	Juin	Total sur 6 mois		
Radiologue 1	7 267	4 447	5 359	2 120	3 491	22 684	180	Mixte
Radiologue 2	1 383	1 428	6 515	3 005	4 314	16 645	83	Thérapeutique digestif
Radiologue 3	4 238	3 628	5 985	3 655	2 685	20 191	165	Mixte
Radiologue 4	1 693	4 109	6 619	2 644	3 545	18 610	117	Thérapeutique crâne
Chirurgien vasculaire 1	382	803	886	449	652	3 172	38	Thérapeutique périphérique
Chirurgien vasculaire 2	516	896	670	391	121	2 594	56	Thérapeutique périphérique
Chirurgien vasculaire 3	590	355	323	243	385	1 896	26	Thérapeutique périphérique
Chirurgien vasculaire 4	430	1 164	378	367	285	2 624	57	Thérapeutique périphérique

Annexe 2 : type d'activité exercée selon le praticien interventionnel.

	Activité interventionnelle de janvier à juin 2020	Diagnostique crâne	Thérapeutique crâne	Diagnostique périphérique	Thérapeutique périphérique	Diagnostique digestive	Thérapeutique digestive	Divers
Radiologue 1	% du nombre d'actes total (222)	42%	14%	5%	11%	1%	22%	5%
	% du PDS total (22 684 Gy.cm ²)	21%	11%	3%	15%	0%	50%	0%
Radiologue 2	% du nombre d'actes total (109)	0%	0%	1%	4%	6%	67%	22%
	% du PDS total (16 645 Gy.cm ²)	0%	0%	1%	2%	1%	90%	6%
Radiologue 3	% du nombre d'actes total (234)	28%	1%	2%	9%	6%	38%	16%
	% du PDS total (20 191 Gy.cm ²)	17%	2%	1%	13%	1%	65%	1%
Radiologue 4	% du nombre d'actes total (162)	25%	72%	1%	2%	0%	0%	0%
	% du PDS total (18 610 Gy.cm ²)	8%	89%	1%	2%	0%	0%	0%
Chirurgien vasculaire 1	% du nombre d'actes total (72)	0%	0%	5%	95%	0%	0%	0%
	% du PDS total (3172 Gy.cm ²)	0%	0%	5%	95%	0%	0%	0%
Chirurgien vasculaire 2	% du nombre d'actes total (63)	0%	0%	5%	95%	0%	0%	0%
	% du PDS total (2596 Gy.cm ²)	0%	0%	2%	98%	0%	0%	0%
Chirurgien vasculaire 3	% du nombre d'actes total (51)	0%	0%	5%	95%	0%	0%	0%
	% du PDS total (1896 Gy.cm ²)	0%	0%	3%	97%	0%	0%	0%
Chirurgien vasculaire 4	% du nombre d'actes total (86)	0%	0%	4%	96%	0%	0%	0%
	% du PDS total (2624 Gy.cm ²)	0%	0%	3%	97%	0%	0%	0%

Annexe 3 : Suivi dosimétrique cristallin extérieure gauche chez l'ensemble des praticiens.

Suivi cristallin en mSv	Janvier	Février	Mars Avril	Mai	Juin	Total (suivi)	Lunettes plombées
Radiologue 1	6,11 PDS =7267	0,7 PDS=4447	1,6 PDS=5359	X	X	8,41 mSv (4 mois)	Non
Radiologue 2	0,9 PDS=1383	0,6 PDS=1428	2,75 PDS=6515	-	-	-	Oui
Radiologue 3	2,86 PDS=4238	2,55 PDS=3628	4,03 PDS=5985	1,1 PDS=3655	1,09 PDS=2685	11,63 mSv (6 mois)	Non
Radiologue 4	X	X	X	X	X	X	Non
Interne radiologie	0,7	0,85	1,25	0,6	0,67	4,07 mSv (6 mois)	Non
Chirurgien vasculaire 1	0,75 PDS=382	0,65 PDS=803	2,75 PDS=886	-	-	-	Oui
Chirurgien vasculaire 2	1,05 PDS=516	0,95 PDS=896	0,55 PDS=670	-	-	-	Oui
Chirurgien vasculaire 3	0,7 PDS=590	X	X	-	-	-	Oui
Chirurgien vasculaire 4	X	X	X	X	X	X	Non
Interne chirurgie vasculaire	1,25	1,3	0,4	0,45	X	3,4 mSv (5 mois)	Non
Manipulateur en radiologie	0,3	0,15	0,1	0,1	0,4	0,95 mSv (6 mois)	Non
MAR	0,1	0	0	0	0	0,1 mSv (6 mois)	Non
IBODE	0	0	0	0	0	0 (6 mois)	Non

Annexe 4 : Dosimétrie cristallin intérieure gauche chez les praticiens porteurs de lunettes plombées.

Suivi cristallin en mSv	Janvier	Février	Mars Avril	Mai	Juin	Total (suivi)	Lunettes plombées
Radiologue 2	0,85 PDS=1383	0,5 PDS=1428	0,85 PDS=6515	1,15 PDS=3005	1,51 PDS=4314	4,86 mSv (6 mois)	Oui
Chirurgien vasculaire 1	0,75 PDS=382	0,6 PDS=803	1,65 PDS=886	0,4 PDS=449	1,01 PDS=652	4,41 mSv (6 mois)	Oui
Chirurgien vasculaire 2	0,9 PDS=516	0,85 PDS=896	0,55 PDS=670	0,4 PDS=391	0,53 PDS=121	3,23 mSv (6 mois)	Oui
Chirurgien vasculaire 3	0,6 PDS=590	X	X	X	X	0,6 mSv (1 mois)	Oui

Annexe 5 : Dosimétrie cristallin extérieure et intérieure gauche : atténuation moyenne des lunettes plombées aux rayonnements ionisants.

Opérateur et période de suivi	Dosimétrie cristallin extérieure gauche en mSv	Dosimétrie cristallin intérieure gauche en mSv	Atténuation par la lunette plombée	Atténuation moyenne
Chirurgien vasculaire 1 janvier	0,75	0,75	0 %	17 %
Chirurgien vasculaire 1 février	0,65	0,6	8 %	
Chirurgien vasculaire 1 mars-avril	2,75	1,65	41 %	
Chirurgien vasculaire 2 janvier	1,05	0,9	14 %	8 %
Chirurgien vasculaire 2 février	0,95	0,85	10 %	
Chirurgien vasculaire 2 mars-avril	0,55	0,55	0 %	
Chirurgien vasculaire 3 janvier	0,7	0,6	14 %	14 %
Chirurgien vasculaire 3 février	X	X	X	
Chirurgien vasculaire 3 mars-avril	X	X	X	
Radiologue 2 janvier	0,9	0,85	5 %	25 %
Radiologue 2 février	0,6	0,6	0 %	
Radiologue 2 mars-avril	2,75	0,85	69 %	

Annexe 6 : Différence d'exposition entre les cristallins gauche et droit.

Opérateur et période de suivi	Dosimétrie cristallin gauche en mSv	Dosimétrie cristallin droit en mSv	Rapport gauche/droit	Rapport moyen gauche/droit
Chirurgien vasculaire 1 mai	0,4	0,3	1,33	2
Chirurgien vasculaire 1 juin	1,01	0,83	1,21	
Chirurgien vasculaire 2 mai	0,4	0,2	2	
Chirurgien vasculaire 2 juin	0,53	0,16	3,3	
Chirurgien vasculaire 3 mai	X	X	X	
Chirurgien vasculaire 3 juin	X	X	X	
Radiologue 2 mai	1,15	0,2	5,75	4,2
Radiologue 2 juin	1,51	0,58	2,6	

Annexe 7 : Suivi dosimétrique bague chez l'ensemble des praticiens.

Suivi bague en mSv	Janvier	Février	Mars Avril	Mai	Juin	Total (suivi)
Radiologue 1	0,55 PDS=7267	6,36 PDS=4447	6,6 PDS=5359	3 PDS=2120	X	16,51 mSv (5 mois)
Radiologue 2	11,05 PDS=1383	1,3 PDS=1428	10,6 PDS=6515	0,1 PDS=3005	3,17 PDS=4314	26,22 mSv (6 mois)
Radiologue 3	11,41 PDS=4238	19,6 PDS=3628	18,7 PDS=5985	1,95 PDS=3655	X	51,66 mSv (5 mois)
Radiologue 4	X	X	X	X	X	X
Interne radiologie	1,3	3,5	3,45	3,85	2,21	14,31 mSv (6 mois)
Chirurgien vasculaire 1	X	X	X	X	X	X
Chirurgien vasculaire 2	3,45 PDS=516	2,9 PDS=896	X	2,45 PDS=391	0,77 PDS=121	9,57 mSv (4 mois)
Chirurgien vasculaire 3	5,1 PDS=590	X	0,3 PDS=323	X	X	5,4 mSv (3 mois)
Chirurgien vasculaire 4	X	X	X	X	X	X
Interne chirurgie vasculaire	4,4	3,1	3,25	1,7	X	12,45 mSv (5 mois)

Résumé

Contexte : Le nombre d'actes réalisés en médecine interventionnelle augmente chaque année en France. L'utilisation des rayons X permet de guider le geste opératoire mais entraîne une exposition secondaire des zones anatomiques non protégées par un équipement plombé chez les praticiens. L'association entre l'exposition professionnelle chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants et de potentiels effets sur la santé du personnel médical a été démontrée : cataractes radio-induites, anomalies microvasculaires sous-unguéales. Le principal objectif de cette étude a été d'évaluer l'exposition du cristallin et des mains aux rayonnements ionisants chez les praticiens interventionnels du CHU de Rouen.

Matériels et méthodes : Il s'agit d'une étude observationnelle, prospective et monocentrique. L'ensemble des praticiens intervenant dans le service de radiologie interventionnelle du CHU de Rouen a été inclus dans l'étude du 1^{er} janvier 2020 au 30 juin 2020 : quatre radiologues, quatre chirurgiens vasculaires, deux internes ainsi qu'un des manipulateurs référents en radiologie. La typologie de l'activité interventionnelle exercée a été définie et quantifiée pour chaque médecin en se basant sur le produit dose.surface de l'ensemble des opérations réalisées au cours du suivi. Un recueil dosimétrique cristallin et bague individuel a été mis en place pendant une période de six mois. Afin d'évaluer l'exposition du cristallin et des mains sur douze mois consécutifs, une extrapolation annuelle des dosimétries cristallin et mains a été réalisée.

Résultats : L'extrapolation annuelle de la dosimétrie cristallin a mis en évidence un dépassement de la valeur limite d'exposition (VLE), fixée à partir du 1^{er} juillet 2023 à 20 mSv sur douze mois consécutifs, pour trois radiologues du service de radiologie interventionnelle, respectivement 23,3, 27 et 33 mSv. Concernant l'exposition des mains aux rayonnements ionisants, aucun praticien n'a dépassé la VLE de 500 mSv sur douze mois pour les travailleurs classés en catégorie A. Cependant, un des radiologues a présenté un intervalle de doses bague annuelle au-dessus de la VLE de la catégorie B, définie à 150 mSv.

Conclusion : Les praticiens interventionnels sont exposés à de faibles doses de rayonnements ionisants de façon répétée au cours de leurs carrières professionnelles, pouvant entraîner un dépassement des valeurs limites d'exposition notamment au niveau du cristallin. L'utilisation de l'ensemble des équipements de protection collective et individuelle est nécessaire pour réduire cette exposition. Un suivi dosimétrique adapté du cristallin et des mains est essentiel pour quantifier l'exposition de ces praticiens aux rayonnements ionisants. Le médecin du travail doit mettre en œuvre une surveillance médicale renforcée afin de prévenir et dépister toute affection susceptible d'être en relation avec une exposition aux rayonnements ionisants.

Mots clés : *rayons X, radiologie interventionnelle, cataracte radio-induite, radiodermite chronique, radioprotection, dosimétrie.*