



HAL
open science

Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale du Bénin

Alfred Arnaud Gbetchedji

► **To cite this version:**

Alfred Arnaud Gbetchedji. Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale du Bénin. Santé publique et épidémiologie. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPASR005 . tel-04548374

HAL Id: tel-04548374

<https://theses.hal.science/tel-04548374>

Submitted on 16 Apr 2024

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

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

Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale du Bénin

Epidemiological study of exposed workers to ionizing radiation in medical imaging centers in Benin

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n°570 EDSP Santé Publique
Spécialité de doctorat : Santé Publique - Epidémiologie
Graduate School : Santé Publique Référent : Faculté de Médecine

Thèse préparée au **CESP (Université Paris-Saclay, UVSQ, Inserm)**, sous la direction de **Rodrigue Allodji, PhD-HDR, université Paris-Saclay**, la co-direction de **Catherine Luccioni, PU** et **Marcellin Amoussou-Guénou, PU, Université d'Abomey-Calavi**

Thèse présentée et soutenue à Villejuif, le 15 avril 2022, par

Alfred Arnaud Gbétchédji

Composition du Jury

Eric Deutsch PU, Université Paris Saclay	Président
Irina Guseva Canu PU, Université de Lausanne en Suisse	Rapporteuse & examinatrice
Louis Laurent DR, Institut national de recherche et de sécurité (INRS)	Rapporteur & examinateur
Florence Bodeau-Livinec Professeur, EHESP	Examinatrice
Blandine Vacquier MD-PHD, INSERM U 1219, Université de Bordeaux	Examinatrice
Rodrigue Allodji PhD-HDR, Université Paris Saclay	Directeur de thèse

A la mémoire de mon feu Père, Bernard C. GBETCHEDJI

REMERCIEMENTS

Mes tous premiers remerciements vont à l'endroit des membres de jury de thèse.

Je remercie le Professeur Eric DEUTSCH pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Au Professeure Irina GUSEVA CANU et Directeur de Recherche Louis LAURENT, mes sincères remerciements à vous d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur (e).

Au Professeure Florence BODEAU-LIVINEC et Docteure Blandine VACQUIER, mes sincères remerciements à vous pour avoir accepté d'évaluer ce travail en tant qu'examinatrice.

Ce travail a été réalisé grâce aux orientations et précieux conseils de mes Directeurs de thèse, sans vous, cette thèse ne pouvait pas démarrer.

Au Docteur Rodrigue ALLODJI, je dis tout simplement infiniment merci.

Au Professeure Catherine LUCCIONI, je dis un grand merci de votre disponibilité et de votre soutien tout au long de la thèse.

Au Professeur Marcellin AMOUSSOU-GUENOU, je dis un chaleureux merci pour ses orientations et encouragements.

Mes remerciements vont également à l'endroit de :

- toute l'équipe cancer & épidémiologie des radiations, principalement Florent de VATHAIRE et Françoise TERRIER pour leur engagement dans la facilitation des formalités administratives.
- l'actuelle directrice de l'Ecole Doctorale de Santé publique (EDSP) Florence MENEGAUX et l'ancien directeur, Jean BOUYER pour m'avoir accordé une chance.
- mon épouse et mes enfants pour leur courage et leur présente mes excuses pour leur avoir imposé mes longues absences à l'autre côté de l'océan. Que Dieu consolide d'avantage notre famille.
- ma maman, je dis merci pour m'avoir toujours encouragé même dans la douleur. Je remercie mes frères et sœurs et toutes les familles GBETCHEDJI, TIKRY, HOUKPON et FADONUGBO pour leur soutien et leur encouragement.
- François ANCEAU et toute sa famille pour m'avoir toujours entouré de leur amour familial.
- mes ex-collègues de l'Agence Béninoise de la Régulation Pharmaceutique et collègues de l'Autorité Nationale de Sûreté Radiologique et de Radioprotection ;
- mes Professeurs de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) en particulier Hurbert HOUNSOSSOU, Bertin GBAGUIDI et de la Faculté des Sciences de la Santé (FSS) notamment Olivier BIAOU et Bonaventure AWEDE ;
- coordonnateur AFRA/Bénin Pascal HOUNGNANDAN et NLO/Bénin Hervé DJOKPE ;
- mon supérieur hiérarchique Honoré BANKOLE, mes directeurs Fernand GBAGUIDI, Yossounon CHABI, Ange DOSSOU et Marcellin AMOUSSOU-GUENOU pour avoir tous cru en moi.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse et à la valorisation de mes travaux de thèse, principalement les différents co-auteurs des articles, les professionnels des sciences et techniques de l'imagerie médicale et les radiologues du Bénin.

Enfin, je remercie les autorités du Ministère de la Santé du Bénin et celles de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) pour avoir autorisé et accepté de financer ce projet de thèse.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES	4
1 INTRODUCTION GENERALE	18
2 ETAT DE LA LITTERATURE SUR LES RAYONNEMENTS X ET LES EFFETS RADIO-INDUITS.....	21
2.1 ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES RAYONNEMENTS X	21
2.2 UTILITE DES RAYONNEMENTS X DANS LE DOMAINE MEDICAL (DIAGNOSTIQUE ET THERAPIE)	23
2.2.1 <i>Facteurs déterminant la réalisation de l'image en radiologie standard</i>	25
2.2.2 <i>Facteurs déterminant la réalisation de l'image en tomodensitométrie</i>	29
2.3 EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS X.....	30
2.3.1 <i>Effets déterministes</i>	32
2.3.2 <i>Effets stochastiques</i>	33
2.4 PRINCIPES GENERAUX DE PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS X	34
2.5 METROLOGIE DES RAYONNEMENTS X	37
2.5.1 <i>Interaction rayonnement-atome</i>	37
2.5.2 <i>Système de détection</i>	37
2.5.3 <i>Grandeurs dosimétriques (grandeurs physiques, grandeurs opérationnelles et grandeurs de protection)</i>	39
2.6 SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION EXTERNE.....	45
2.6.1 <i>Surveillance dosimétrique des travailleurs</i>	46
2.6.2 <i>Surveillance médicale des travailleurs</i>	50
2.7 NIVEAU MONDIAL ET AFRICAIN D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE AUX RAYONNEMENTS IONISANTS (REVUE BIBLIOGRAPHIQUE).....	51

2.8 ETUDES EPIDEMIOLOGIQUES DES EFFETS SANITAIRES LIES A L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	58
2.8.1 Mesures d'association dans les études de cohorte.....	58
2.8.2 Effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements ionisants (alpha, bêta, gamma et X)	59
2.8.3 Effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements ionisants (gamma et X) ..	62
3 ETUDE DE LA MORBIDITE CHEZ LES TRAVAILLEURS EXPOSES LORS D'ACTES DE RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE A TRAVERS UNE COHORTE RETROSPECTIVE AU BENIN DE 1972 A 2019.....	66
3.1 INTRODUCTION.....	66
3.2 MATERIELS ET METHODE.....	67
3.2.1 Collecte des données, population et variable d'exposition.....	67
3.2.2 Les variables dépendantes d'intérêt et facteur de confusion	70
3.2.3 Consideration éthique	71
3.2.4 Analyse statistique.....	71
3.3 RESULTATS	72
3.3.1 Description de la population d'étude.....	72
3.3.2 Description des évènements de santé dans la cohorte	74
3.3.3 Incidence cumulative et facteurs de risque pour les maladies des yeux	76
3.3.4 Incidence cumulée et facteur de risque pour les masses sous-cutanées	80
3.4 DISCUSSION.....	84
3.4.1 Maladie des yeux.....	84
3.4.2 Masses sous-cutanées.....	85
3.4.3 Forces et limites	86
3.5 CONCLUSION.....	87
4 ÉVALUATION EXPERIMENTALE DE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS X SUR LES LIEUX DE TRAVAIL DANS LES CENTRES DE	

RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE AU BENIN EN 2019.....	89
4.1 INTRODUCTION.....	89
4.2 MATERIELS ET METHODE.....	91
4.2.1 <i>Collecte et traitement des données.....</i>	<i>91</i>
4.2.2 <i>Considération éthique</i>	<i>93</i>
4.2.3 <i>Mesures des doses au poste de travail</i>	<i>93</i>
4.2.4 <i>Formule utilisée.....</i>	<i>98</i>
4.2.5 <i>Analyses statistiques.....</i>	<i>98</i>
4.3 RESULTATS	99
4.3.1 <i>Description des centres de radiologie au Bénin</i>	<i>99</i>
4.3.2 <i>Résultats des équivalents de dose ambiants mesurés.....</i>	<i>100</i>
4.4 DISCUSSION.....	103
4.4.1 <i>Comparaison des niveaux d'équivalent de dose ambiants à ceux de la littérature</i> <i>103</i>	
4.4.2 <i>Forces et limites</i>	<i>105</i>
4.5 CONCLUSION.....	106
5 ESTIMATION RETROSPECTIVE DE LA DOSE CUMULEE D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE REÇUE PAR LES TRAVAILLEURS DE LA RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE AU BENIN, 1972-2019.....	108
5.1 INTRODUCTION.....	108
5.2 MATERIELS ET METHODE.....	110
5.2.1 <i>Population d'étude</i>	<i>110</i>
5.2.2 <i>Informations dosimétriques utilisées.....</i>	<i>111</i>
5.2.3 <i>Considération éthique</i>	<i>112</i>
5.2.4 <i>Collecte des données</i>	<i>113</i>
5.2.5 <i>Construction du modèle</i>	<i>114</i>

5.2.6	<i>Analyses statistiques</i>	115
5.3	RESULTATS	116
5.3.1	<i>Description de la population cible (n=335)</i>	116
5.3.2	<i>Description de la population expérimentale (n=138)</i>	117
5.3.3	<i>Comparaison des deux populations (expérimentale et cible)</i>	117
5.3.4	<i>Equivalents de dose ambiants mesurés dans les salles d'examens (62) sur deux mois, doses efficaces bimensuelles et annuelles reçues par les travailleurs (138)</i>	117
5.3.5	<i>Paramètres de régression linéaire estimés</i>	118
5.3.6	<i>Evolution de la dose efficace annuelle et cumulée (individuelle) entre 1972 et 2019</i>	119
5.4	DISCUSSION.....	120
5.4.1	<i>Analyse des doses efficaces médianes annuelles (individuelles)</i>	121
5.4.2	<i>Forces et limites</i>	122
5.5	CONCLUSION.....	123
6	ETUDE DE L'ASSOCIATION ENTRE LES NIVEAUX D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS A FAIBLE DOSE ET LE RISQUE DES MALADIES DES YEUX, ET MASSES SOUS-CUTANÉES	125
6.1	INTRODUCTION.....	125
6.2	METHODE.....	126
6.2.1	<i>Collecte et traitement des données</i>	126
6.2.2	<i>Analyses statistiques</i>	126
6.3	RESULTATS	127
6.3.1	<i>Comparaison des doses efficaces cumulées entre les travailleurs ayant des évènements de santé et ceux sans évènement de santé</i>	127
6.3.2	<i>Estimation des risques d'évènements de santé selon les niveaux de dose efficace cumulée</i>	128
6.3.3	<i>Estimation des excès de risque relatifs (ERR) d'évènements de santé par unité de</i>	

<i>dose cumulée individuelle (en mSv)</i>	129
6.4 DISCUSSION.....	130
6.4.1 <i>Relation dose-effet pour les maladies des yeux</i>	130
6.4.2 <i>Relation dose-effet pour les masses sous-cutanées</i>	131
6.4.3 <i>Forces et limites</i>	131
6.5 CONCLUSION.....	131
7 DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	133
7.1 NIVEAUX D'EXPOSITION AU POSTE DE TRAVAIL ET DOSES INDIVIDUELLES REÇUES PAR LES TRAVAILLEURS	135
7.2 ANALYSE DE LA MORBIDITE CHEZ LES TRAVAILLEURS EXPOSES AUX RAYONNEMENTS X DANS LES CENTRES D'IMAGERIE MEDICALE AU BENIN.....	136
7.3 PERSPECTIVES	139
8 CONCLUSION GENERALE	142

Liste des tableaux

Tableau 1 : Effets en fonction de la dose en cas d'exposition généralisée	33
Tableau 2 : Limites annuelles de doses efficaces et équivalentes fixées par les normes internationales (Guidance Safety Radiation part 3)	43
Tableau 3 : Résumé de vingt études sélectionnées.....	55
Tableau 4 : Résumé de sept articles issus des vingt études sélectionnées concernant le report des doses individuelles moyennes pour toutes les spécialités du secteur médical et les autres secteurs (Industriel/Recherche/Enseignement)	57
Tableau 5 : Résumé de huit articles issus des vingt études sélectionnées concernant le report des doses individuelles moyennes pour les différentes spécialités du secteur médical	57
Tableau 6 : Etudes indiquant une proportion de doses annuelles inférieures ou supérieures à la limite réglementaire pour le public dans le secteur médical	58
Tableau 7 : Caractéristiques de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019	73
Tableau 8 : Caractéristiques de survie et résumé des maladies les plus représentatives développées par les groupes exposés (n=335) et non exposés (n=193) de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019	74
Tableau 9 : Maladies des yeux et masses sous-cutanées de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019	75
Tableau 10 : Type de centres, équipements radiologiques et salles de radiologie au Bénin....	99
Tableau 11 : Résumé statistique des équivalents de dose ambiants ($H_{ih}^*(10)$) en μSv par heure pour les différentes salles d'examens et comparés aux niveaux de référence.....	101
Tableau 12 : Corrélation entre équivalents de dose ambiants en μSv par heure estimés au poste de travail et les surfaces des salles d'examens en cm^2 ou les distances en cm	105

Tableau 13 : Caractéristiques de la population des travailleurs inclus dans la cohorte expérimentale (n=138) et ceux non inclus (n=197) dans ladite cohorte au moment de l'enquête transversale en 2020	116
Tableau 14 : Comparaison des caractéristiques de la population cible à celles de la population expérimentale selon l'âge (année) et le sexe à la date de l'enquête.....	117
Tableau 15 : Résumés statistiques des variables explicatives du modèle et des doses efficaces bimensuelles, annuelles reçues par les travailleurs (n=138).	118
Tableau 16 : Paramètres des variables explicatives du modèle de regression linéaire des doses efficaces annuelles reçues par les travailleurs exposés (n=138)	118
Tableau 17 : Résumés statistiques de l'épaisseur du matériel de filtration, dose efficace cumulée reçue par tous les travailleurs (n=335) sur la durée cumulée de travail au poste entre 1972 et 2019.....	120
Tableau 18 : Classes de doses efficaces cumulées (mSv) estimées entre 1972 et 2019	120
Tableau 19 : Distribution des personnes.années et rapport de risque instantané des maladies des yeux et des masses sous-cutanées par classe de dose efficace cumulée d'exposition aux rayonnements X.....	129
Tableau 20 : Association entre la dose efficace cumulée et les maladies des yeux ou les masses sous-cutanées : Excès de Risque Relatif par mSv (ERR/mSv) de dose efficace cumulée selon un modèle linéaire, et leur intervalle de confiance (IC) à 95%	129

Liste des figures

Figure 1 : Schéma représentatif du tube à rayonnements X.....	22
Figure 2 : Première radiographie obtenue à l'aide des rayonnements X en 1895.....	23
Figure 3 : Processus de formation de l'image radiante à partir du faisceau incident de rayonnements X.....	25
Figure 4 : Positionnement du manipulateur pendant l'exposition du patient dans une salle de radiologie conventionnelle	27
Figure 5 : Positionnement du manipulateur pendant l'exposition du patient dans une salle de tomodensitométrie.....	28
Figure 6 : Importance relative des trois principales formes d'interaction des rayonnements photoniques avec la matière	31
Figure 7 : Constituants généraux des détecteurs	38
Figure 8 : Sphère ICRU concept d'alignement et d'expansion du champ sur une sphère ICRU de 30 cm de diamètre	45
Figure 9 : Types d'exposition.....	46
Figure 10 : Orientation des faisceaux de rayonnements (primaires, diffusés et de fuite)	48
Figure 11 : Evolution des doses annuelles dans le secteur de la radiologie diagnostique entre 2007 et 2010 en Afrique.....	53
Figure 12 : Diagramme du processus de sélection (flow chart) des sujets, pour l'étude des évènements de santé chez les travailleurs du secteur médical au Bénin, 1972-2019.....	68
Figure 13 : Courbe d'incidence cumulée de maladies des yeux (a) dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019.....	76
Figure 14 : Courbes d'incidence cumulée de maladies des yeux (b), stratifiées par statut d'exposition dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019	77
Figure 15 : Rapports de Risque Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des maladies	

des yeux en analyse univariée (a) d'évènements	77
Figure 16 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des maladies des yeux en analyse multivariée (b) d'évènements	79
Figure 17 : Courbe d'incidence cumulée (a) de masses sous-cutanées dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019.....	80
Figure 18 : Courbes d'incidence cumulée (b) de masses sous-cutanées dans la cohorte (exposé et non exposé) stratifiées par statut d'exposition entre 1972 et 2019	81
Figure 19 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des masses sous-cutanées en analyse univariée (a) d'évènements	82
Figure 20 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des masses sous-cutanées en analyse multivariée (b) d'évènements.....	83
Figure 21 : Répartition des centres de radiologie sur le territoire national du Bénin.....	91
Figure 22 : Diagramme de sélection des types de salles de radiologie au Bénin.....	92
Figure 23 : Radiamètre AT1123.....	93
Figure 24 : Positionnement du radiamètre au cours des mesures au poste de travail et dans le couloir.....	94
Figure 25 : Positionnement du radiamètre par rapport à l'écran de vitre plombée ou les portes des salles d'examens	95
Figure 26 : Positionnement du radiamètre derrière l'écran en vitre lors de la mesure des équivalents de dose ambiants	96
Figure 27 : Positionnement du radiamètre derrière la porte du couloir lors de la mesure des équivalents de dose ambiants	97
Figure 28 : Processus de sélection des participants à l'enquête transversale (février à mars 2020) pour l'estimation des paramètres du modèle de régression linéaire.....	110
Figure 29 : Schéma montrant la position du dosimètre au cours de l'exposition des patients pour	

les explorations diagnostiques.....	111
Figure 30 : Distribution des doses efficaces annuelles par travailleurs estimées dans les différents centres de radiologie entre 1972 et 2019	119
Figure 31 : Comparaisons des doses efficaces cumulées sur la période 1972 à 2019 entre les travailleurs ayant déclaré des évènements de santé et ceux sans évènements de santé	128

Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

AIC : Critère d'Information d'Akaike

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique

ALARA : *As low as Reasonably Achievable* (en anglais)

AMA : *American Medical Association* (en anglais)

AT1123 : Radiamètre commercialisé par la société APVL ingénierie en France

BEIR : Comité national de recherche sur les effets biologiques des rayonnements ionisants

CER-ISBA: Comité d'éthique de la recherche de l'Institut des Sciences Biomédicales Appliquées du Bénin

CIPR : Commission Internationale de la Protection Radiologique

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

cm : centimètres

DICOM : *Digital Imaging and Communication in Medicine* (en anglais)

D_T : Dose absorbée

E : Dose efficace

EPC : Equipement de protection collective

EPI : Equipements de Protection Individuelle

ERR : Excès de Risque Relatif

GSR : Guide de Sûreté Radiologique

Gy : Gray

HR : *Hazard Ratio* (en anglais), Rapport de risque instantané

H_T : Dose équivalente

IC : Intervalle de Confiance

CIM-10 : Classification Internationale des Maladies version 10

ICRU : Commission Internationale sur les Unités et Mesures des radiations

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

IQR : Intervalle interquartile

IRM : Imagerie par résonance magnétique

IU : Unité Internationale

J/kg : Joule par kilogramme

JPSTIM : journées scientifiques des professionnels des sciences et techniques d'imagerie

médicale

keV : kilo électron-Volt

Kg : kilogramme

mAs : milliAmpère seconde

mSv : millisievert

OR : *Odds Ratio* (en anglais), Rapport de cote

PCR : Personne Compétente en Radioprotection

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PMMA : Polyméthacrylate de Méthyle

RC : rayon central

RI : rayonnements ionisants

RPI/GAEC : Institut de Radioprotection du Ghana

RR : Risque Relatif

SAS : Système d'analyse statistique (*Statistical Analysis System* en Anglais)

Sv : Sievert

TDM : Tomodensitométrie

TE: Travailleurs exposés

TLD : Dosimètre Thermo-Luminescent

UNSCEAR : *United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (en anglais)

μ Sv : micro Sievert (sous multiple du Sievert)

W_R : facteur de pondération radiologique

Productions scientifiques liées à la thèse

Articles issus des travaux de thèse

Publiés

Gbetchedji AA, Houndetoungan GD, Hounsossou HC, Journy N, Haddy N, Rubino C, Biaou O, Medenou D, Amoussou-Guenou KM, de Vathaire F, Allodji RS. A systematic review of radiation dose monitoring among radiology healthcare workers in Africa. *J Radiol Prot (IF: 1.274)* 2020 Jul 8. doi: 10.1088/1361-6498/aba402. Online ahead of print. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/aba402>

Gbetchedji AA, Mansouri I, Hounsossou CH, Houndétoungan GD, Gbaguidi AB, Haddy N, Medehouenou CMT, Avocefohou SA, Takou SD, Rubino C, Biaou O, Medenou D, de Vathaire F, Amoussou-Guenou KM, Allodji RS, Luccioni C. Experimental assessment of workplace radiation doses in diagnostic X-ray medical imaging centres in Benin from 2019 to 2020. *Ann Work Expo Health*. 2021 Jul 13:wxab046. doi: 10.1093/annweh/wxab046. Epub ahead of print. PMID: 34254985

En cours

Gbetchedji AA, Hounsossou CH, Cisse M, Houndetoungan DG, Takou SD, Gbaguidi AB, Mansouri I, Haddy N, Medehouenou MCT, Avocefohou SA, Rubino C, Biaou O, Medenou D, de Vathaire F, Amoussou-Guenou KM, Luccioni C, Allodji RS. Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from 1972 to 2019. Submitted and under review to '*Int Arch Occup Environ Health*'.

Gbetchedji AA, Hounsossou CH, Cisse M, Houndetoungan DG, Takou SD, Gbaguidi AB, Mansouri I, Haddy N, Medehouenou MCT, Avocefohou SA, Rubino C, Biaou O, Medenou D, de Vathaire F, Amoussou-Guenou KM, Luccioni C, Allodji RS. Reconstruction of radiation dose received by medical diagnostic X-ray technologists in Benin from 1972 to 2019 using a retrospective dosimetry method. To be submitted to '*J Prev Med Public Health*'.

Présentations orales

Gbetchedji AA. Sensibilisation des employeurs au risque d'exposition aux rayons X des travailleurs lors des examens en radiologie diagnostique dans le Sud Bénin. *JPSTIM*. Cotonou. Oct 2019.

Gbetchedji AA. Évaluation expérimentale de l'exposition professionnelle aux rayons X dans les centres de radiologie diagnostique au Bénin de 2019 à 2020. *JPSTIM*. Cotonou. Oct 2020.

Présentations affichées

Gbetchedji AA, Hounsossou CH, Amoussou-Guenou KM, de Vathaire F, Allodji RS. Workplaces radiations doses in X-Ray Facilities in southern Benin. *IRPA15*. Seoul. May, 2020.

Gbetchedji AA, Hounsossou CH, Amoussou-Guenou KM, de Vathaire F, Allodji RS. A systematic review of radiation dose monitoring among radiology healthcare workers in Africa *IRPA15*. Seoul. May, 2020.

1 INTRODUCTION GENERALE

Les connaissances sur les effets sanitaires d'une exposition aux rayonnements ionisants proviennent en grande partie d'études épidémiologiques portant sur les survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki (United Nations et al. 2008). Ces études épidémiologiques ont permis majoritairement de caractériser les effets sanitaires d'une exposition unique aiguë (Laurier et al. 2017; Lee et al. 2021). D'autres études épidémiologiques menées dans le domaine médical notamment en radiothérapie externe lors du traitement des patients ont permis également de documenter les scientifiques sur les effets sanitaires des rayonnements (Allodji et al. 2019; Boice et al. 2019; Journy et al. 2019; Little et al. 2018). Si aujourd'hui, à travers la littérature les effets liés à une exposition aiguë sont bien connus, Azizova et al pensent que le risque estimé reste non clair quant à l'exposition prolongée à faibles doses telles que chez les travailleurs du secteur de la radiologie médicale (Azizova et al. 2018). De plus, la quantification des risques d'événements indésirables associés à une exposition prolongée à faibles doses ou faibles débits de dose de rayonnements, qui sont généralement rencontrés dans l'environnement professionnel reste débattue (Fournier et al. 2016). L'étude approfondie des effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements ionisants a justifié plus tôt la mise en place de cohortes de travailleurs de la radiologie médicale aux Etats Unis dès les années 1916. Plusieurs autres cohortes du domaine médical comme industriel ont suivi. Le but de ces cohortes était de pouvoir examiner le lien entre les effets sanitaires recensés chez les travailleurs de ces domaines et les niveaux d'exposition auxquels ils étaient soumis. La plupart des participants à ces cohortes avaient eu l'avantage de disposer d'un dosimètre pour l'enregistrement des doses efficaces reçues. Des reconstructions de doses avaient été faites pour d'autres cohortes en absence de suivi dosimétrique. C'est le cas du Bénin où les travailleurs n'ont aucune surveillance dosimétrique depuis 1993. Cependant, à l'époque postcoloniale

jusqu'en 1993, une surveillance dosimétrique était disponible mais les résultats n'étaient pas archivés et par conséquent non consultables. Une Autorité nationale de réglementation de l'utilisation des rayonnements ionisants est cependant fonctionnelle depuis août 2020. Ce qui pourra améliorer la radioprotection au Bénin.

Certaines maladies non cancéreuses ont été liées à l'exposition à faibles doses de rayonnements (Charles 2001; Shimizu et al. 1992). Cependant les connaissances sur cette association entre les faibles doses et le risque d'apparition d'effets sanitaires radio-induits restent controversées.

L'objectif était d'évaluer la morbidité chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants au Bénin, l'environnement de travail et les niveaux d'exposition auxquels ils étaient soumis de manière rétrospective, et à étudier l'association entre les niveaux d'exposition et cette morbidité.

Le premier sous-objectif vise à évaluer la morbidité chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants au Bénin donc **de faire un état des lieux des évènements de santé** qu'on pourrait recenser auprès de ces travailleurs. Dans ce sous-objectif, seuls les évènements de santé en proportion élevée dans la cohorte après la collecte d'informations seront considérés.

Le second sous-objectif est **d'évaluer à l'aide d'un instrument de mesure des rayonnements ionisants dans l'environnement, l'efficacité des équipements de protection collective (EPC)** mis en place pour protéger les travailleurs et le public.

Le troisième sous-objectif est **d'estimer de manière rétrospective les niveaux d'exposition des travailleurs** dans un contexte d'absence de suivi dosimétrique. Un modèle sera développé à partir des informations disponibles actuellement sur l'historique de la carrière des travailleurs et des mesures de dosimétrie obtenues sur une période expérimentale donnée.

Le quatrième et dernier sous-objectif de ce manuscrit de thèse est l'examen de **l'association**

entre les niveaux d'exposition des travailleurs et les évènements de santé tels que les maladies des yeux et les masses sous-cutanées.

Les sous-objectifs de la thèse seront déclinés en chapitres dans lesquels une petite introduction, une méthodologie, des résultats et des discussions seront présentés. En dehors de la première partie qui comprend l'état de l'art et la deuxième partie qui regroupe les sous-objectifs 1 à 4, une dernière partie sera consacrée à la discussion générale, à l'analyse des forces et limites de l'étude et à une présentation des perspectives envisagées.

2 ETAT DE LA LITTÉRATURE SUR LES RAYONNEMENTS X ET LES EFFETS RADIO-INDUITS

2.1 ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES RAYONNEMENTS X

La découverte des rayonnements X le 8 novembre 1895, par Wihelm Conrad Roentgen (prix Nobel en 1901) (Röntgen, 1896) a révolutionné l'exploration diagnostique et la prise en charge de certaines maladies, qui auparavant étaient difficiles à diagnostiquer. Roentgen constate que, lorsque des électrons frappent une plaque de métal dans une enceinte de verre sous vide, des rayonnements sont émis. Il s'agit donc des rayonnements X. L'appellation rayons « X » vient du fait de leur caractère mystérieux avec sa capacité à traverser le corps humain sans douleur.

A la suite de cette découverte, les physiciens français Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, ont mis en évidence la radioactivité à partir de l'uranium, du polonium et du radium. Ils obtiendront tous le prix Nobel en 1903.

On distingue quatre types de rayonnements issus de la radioactivité. Il s'agit de :

- rayonnements alpha (particulaires) ;
- rayonnements bêta (particulaires) ;
- rayonnements neutrons (particulaires) ;
- rayonnements gamma (γ) (photoniques).

Ils sont tous produits à partir du noyau des éléments radioactifs au cours des désintégrations.

Dans un tube à rayons X (Figure 1), les faisceaux d'électrons issus du chauffage du filament de tungstène (cathode, borne négative) sont fortement accélérés vers une plaque de métal (anode en rotation, borne positive). Le freinage des électrons accélérés, sous une différence de potentiel de l'ordre du kilovolt, au voisinage des noyaux des atomes de la plaque de métal produit des rayonnements appelés rayonnements de « Bremsstrahlung » ou rayonnements X de freinage

(Biop et al., 2017; Thayalan, 2014).

Tout comme la lumière, les rayonnements X se déplacent en ligne droite. Ce sont des rayonnements électromagnétiques d'une longueur d'onde inférieure à 10 nanomètres (nm). Lorsqu'ils rencontrent un objet, ils peuvent passer directement à travers l'objet, mais parfois ils interagissent avec l'objet et peuvent être déviés dans de multiples directions. Il s'agit du phénomène de diffusion. Lors des interactions, il y a transfert d'énergie pouvant créer des effets thermiques, d'excitation et d'ionisation. Ce dernier effet, l'ionisation captera notre attention tout au long de ce manuscrit.

On dit qu'un rayonnement est ionisant lorsque l'énergie qu'il peut transférer aux électrons de la matière est suffisante pour les arracher de leur atome. Le mécanisme de transfert d'énergie avec le milieu traversé est différent selon la nature du rayonnement ionisant (alpha, bêta, neutrons, γ ou X). Par ailleurs, les rayonnements X et gamma ne sont pas directement ionisants. Dans la suite, nous nous intéresserons plus particulièrement aux types d'interaction rencontrés en radiologie diagnostique.

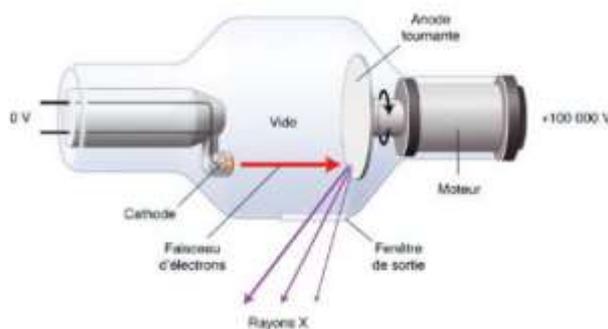


Figure 1 : Schéma représentatif du tube à rayonnements X
Cyrille Martinet

2.2 UTILITE DES RAYONNEMENTS X DANS LE DOMAINE MEDICAL (DIAGNOSTIQUE ET THERAPIE)

L'utilisation des rayonnements X dans le domaine médical fait d'elle l'une des plus anciennes applications des rayonnements X. Elle démarre après la découverte des rayonnements X par Roentgen qui irradia le 22 novembre 1895 la main de sa femme. Ceci fut la première image radiographique obtenue à l'époque (Figure 2).

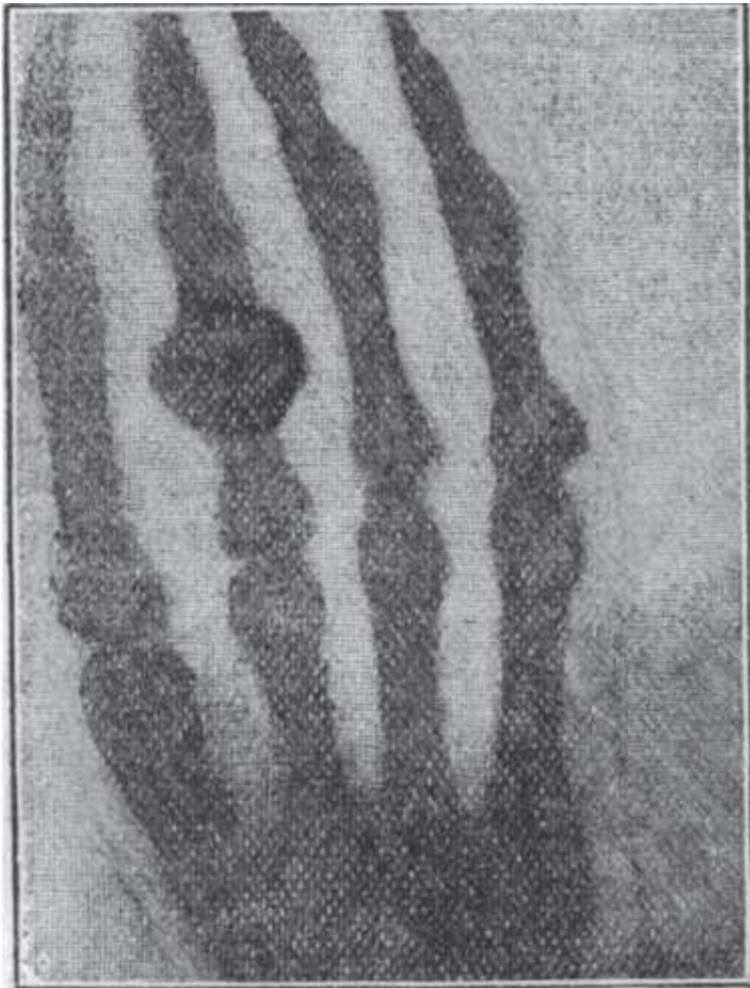


Figure 2 : Première radiographie obtenue à l'aide des rayonnements X en 1895 (Röntgen, 1896).

L'avantage de l'utilisation des rayonnements X pour le traitement s'est fait également sentir dans le domaine de la prise en charge de certaines affections, depuis le début du XXème siècle.

Le lupus tuberculeux, le favus et la teigne, un champignon microscopique (très contagieux) ont été traités aux rayonnements X à des doses importantes. Ces propriétés thérapeutiques des rayonnements X sont également exploitées pour stériliser les cellules cancéreuses en bloquant leur capacité à se multiplier : c'est la radiothérapie. Dans ce chapitre de l'état de l'art, nous n'aborderons que la partie diagnostique, centre de notre sujet.

Selon l'Institut National du Cancer en France, la radiologie est une spécialité médicale qui utilise des rayonnements X ou des ultrasons pour obtenir des images d'une partie du corps ou des organes (radiographie, échographie, tomodensitométrie) (Institut national du cancer, 2020).

Pour la technique de la radiologie utilisant les rayonnements X, des faisceaux de rayonnements X obtenus à partir d'un tube radiogène sont dirigés vers une région anatomique à radiographier. Les faisceaux de rayonnements X subissent une absorption (ou atténuation), qui varie en fonction de trois facteurs :

- l'épaisseur des tissus traversés ;
- la nature des tissus ;
- l'énergie du rayonnement.

Les photons transmis après passage dans la région anatomique sont ceux qui n'ont pas été absorbés par le patient et qui vont permettre de réaliser les images rendant ainsi compte de la densité des milieux traversés (Figure 3). C'est la technique utilisée en radiologie standard pour l'obtention des images en plan (conventionnelle et interventionnelle) ou en tomodensitométrie, plus communément appelée scanner (imagerie en coupes).

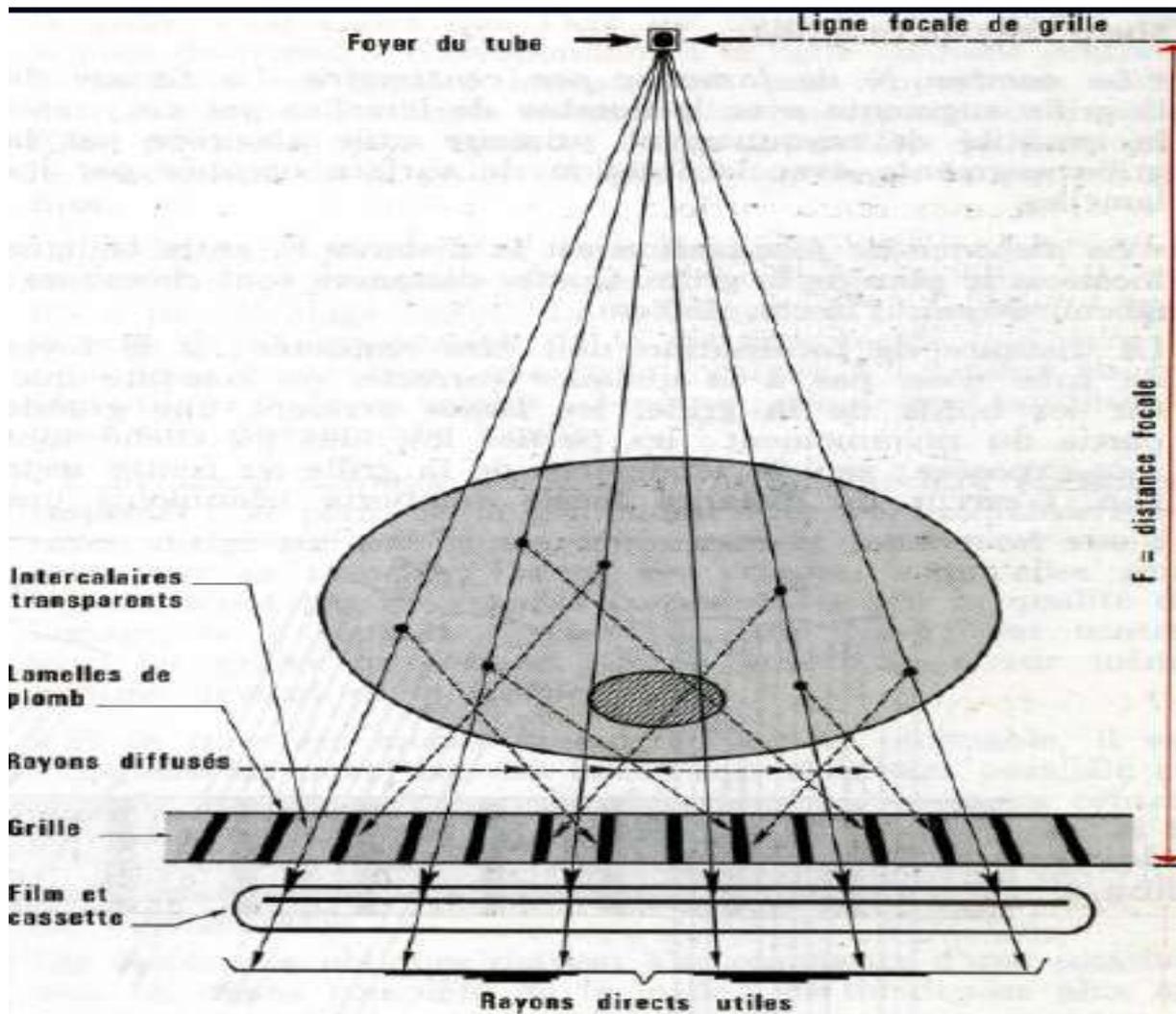


Figure 3 : Processus de formation de l'image radiante à partir du faisceau incident de rayonnements X

(Biop et al., 2017)

2.2.1 Facteurs déterminant la réalisation de l'image en radiologie standard

L'obtention d'une image radiologique acceptable est déterminée par trois facteurs :

- la tension du tube (ou « kilovoltage ») détermine l'énergie du rayonnement X produit ;
- l'intensité électrique (ou « milliampérage ») en milliampère (mA) ;
- le temps d'exposition en seconde (s).

Les deux derniers étant le plus souvent réunis par leur produit exprimé en mAs qui détermine la quantité de photons X produits.

Réalisation d'une image radiologique

La réalisation d'une image radiologique démarre par le positionnement du patient après sa préparation conforme à la région anatomique d'intérêt (partie à exposer) et se termine par l'obtention d'un cliché radiologique (système cassette-film) ou d'une image numérique (système numérisé).

Elle est conduite de la manière suivante :

Positionnement du tube radiogène

Selon qu'il s'agit d'une radiographie à réaliser sur table ou debout contre le potter bucky mural, le tube est orienté vers la table, verticalement ou horizontalement vers le potter bucky mural, tout en veillant à ce que le rayon central (RC) soit orthogonal au récepteur d'image (cassette-film, écran radio luminescent ou capteur plan). Il existe des cas où une inclinaison du faisceau de rayonnements est nécessaire.

Distance foyer film

C'est une distance qui sépare le foyer de production des rayonnements X et le récepteur (film radiologique). Elle varie selon la région anatomique d'intérêt.

Positionnement du patient

Il permet de mettre la région anatomique d'intérêt dans le plan médian du faisceau des rayonnements X.

Collimation

C'est un processus de diminution de la surface d'irradiation à l'aide d'un dispositif constitué par de volets en plomb. Il est matérialisé par un champ lumineux de dimensions modifiables projeté sur le patient. Il permet d'éviter l'irradiation inutile de régions anatomiques sans intérêt pour l'exploration envisagée.

Exposition

C'est une opération qui consiste à exposer la région anatomique d'intérêt au faisceau de rayonnements X volontairement émis. Cet acte est réalisé par un manipulateur/technicien supérieur en radiologie, après avoir choisi les paramètres d'exposition (Kilovoltage et milliampérage.seconde) requis à la réalisation de l'image de la région anatomique d'intérêt. Il se positionne derrière un écran transparent, habituellement une vitre plombée, telle que décrite par les figures 4 et 5 ci-dessous. Il actionne le bouton déclenchant dans un premier temps le chauffage du filament et la rotation de l'anode et, ensuite la production des faisceaux de rayonnements X nécessaires à la réalisation de l'image. Pour le cas de la tomodensitométrie, le technicien se trouve à l'extérieur de la salle d'examen, car lors de l'acquisition des images, la surface isodose associée à une valeur acceptable peut se situer à trois mètres du patient.

Dans certains cas de réalisation d'images radiologiques, d'autres manipulateurs/techniciens supérieurs en radiologie ou radiologues autres que le manipulateur/technicien chargé de réaliser l'exposition peuvent séjourner auprès du patient pendant l'acte d'exposition. Ces derniers portent dans ces conditions un tablier en plomb (Equipement de Protection Individuelle).

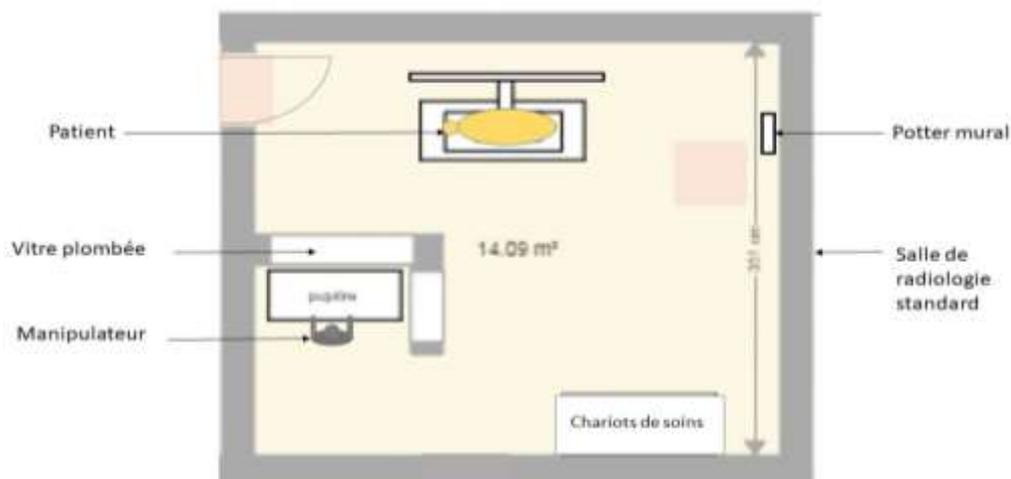


Figure 4 : Positionnement du manipulateur pendant l'exposition du patient dans une salle de radiologie conventionnelle

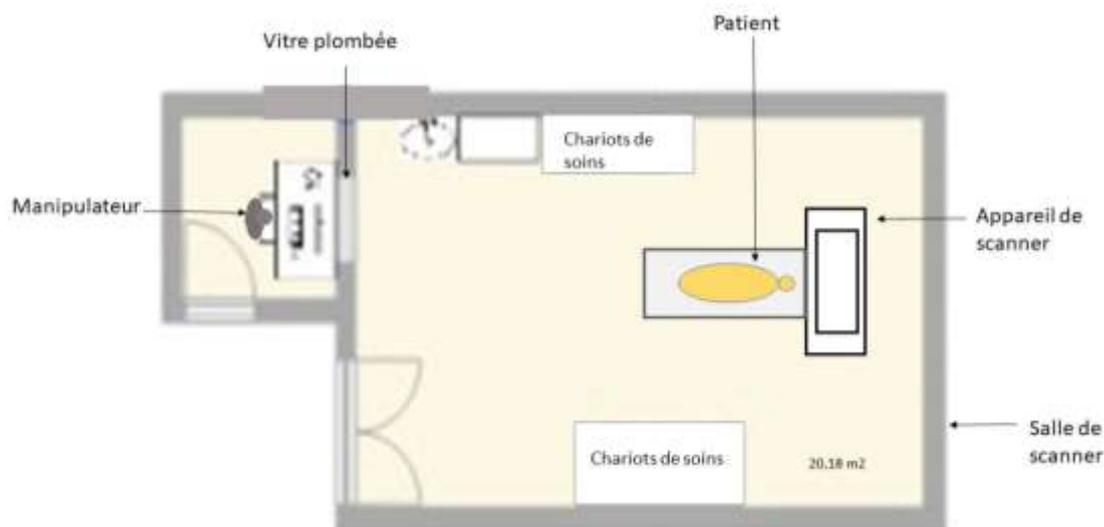


Figure 5 : Positionnement du manipulateur pendant l'exposition du patient dans une salle de tomodensitométrie

Obtention de l'image

Le dispositif de détection reçoit le faisceau transmis après la traversée de la région anatomique d'intérêt. C'est l'image radiante non visible à l'œil nu. Le faisceau de rayonnements X que constitue cette image radiante est hétérogène selon la nature du milieu traversé. Cette image radiante invisible est convertie en une image visible par le détecteur. Il existe différents types de détecteurs. On retrouve selon le système de développement, les détecteurs suivants :

- détecteurs statiques (cassette-écran-film) ;
- détecteurs dynamiques (amplificateur de brillance –intensification de l'image) ;
- détecteurs numériques (écran radio-luminescent à mémoire, détecteurs à capteurs plan).

Avec l'évolution scientifique, les détecteurs statiques ont été abandonnés au profit des détecteurs numériques. Mais au Bénin, la majorité des centres d'imagerie médicale continue d'utiliser les détecteurs statiques en radiologie standard.

L'image latente obtenue à partir du rayonnement lumineux émis par l'écran de la cassette, est révélée dans une solution d'hydroquinone et de la phénidone (le révélateur). Elle est ensuite

fixée par une solution d'hyposulfite de sodium (le fixateur) avec une nuance de gris allant du blanc au noir, créant ainsi un contraste d'un point à l'autre. Cette opération est dénommée développement manuel ou automatique et se fait dans une chambre noire à cause de la sensibilité du film aux rayonnements lumineux.

2.2.2 Facteurs déterminant la réalisation de l'image en tomodensitométrie

L'obtention d'une image acceptable en tomodensitométrie est déterminée par les mêmes facteurs qu'en radiologie standard.

Réalisation d'une image en tomodensitométrie

La réalisation d'une image en tomodensitométrie se fait de la même manière qu'en radiologie standard à la différence qu'ici le tube radiogène et les détecteurs font un couple. Par conséquent, le tube est toujours orienté vers le patient et les rayonnements primaires venant du tube sont atténués par le dispositif de détection.

Les images sont réalisées soit en coupes axiales ou hélicoïdales fines ou épaisses selon les indications médicales et permettant selon le cas de faire des reconstructions coronales et sagittales en 3 dimensions.

Les points concernant le positionnement du patient, la collimation et l'exposition sont les mêmes que ceux décrits plus haut pour la radiologie standard.

Obtention de l'image

A la tomodensitométrie, l'obtention de l'image se base sur le système de détection numérique (détecteurs à capteurs plan). Les images numérisées sont gérées par le DICOM (*Digital Imaging and Communication in Medicine* en anglais). Il n'est pas intégré à la fabrication de l'appareil et permet de standardiser l'accès aux images et de les transférer vers d'autres moniteurs.

Les rayonnements X, malgré leurs avantages que nous venons de décrire, sont nocifs à

l'organisme humain et peuvent créer d'importants dommages à court et long terme.

2.3 EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS X

L'interaction des rayonnements ionisants (RI) avec la matière, et en particulier avec le tissu biologique, se traduit par un transfert d'énergie au milieu irradié. Des dégâts plus ou moins importants peuvent être causés aux cellules atteintes, suivis d'effets sur la santé de l'individu ou de sa descendance (International Commission on Radiological Protection, 1991). Dans ces circonstances, les études épidémiologiques et radiobiologiques établissent des données quantitatives permettant d'estimer le risque associé aux rayonnements ionisants. Ce risque doit rester dans les limites telles qu'il ne constitue qu'une composante mineure de l'ensemble des risques auxquels sont exposés les humains (International Commission on Radiological Protection, 1991).

Les premières descriptions d'effets biologiques des RI ont été publiées dès 1896, quelques mois seulement après la découverte des rayonnements X par Röntgen, puis les effets tératogènes (1901), des cancers (1902) et des mutations génétiques en 1927 (International Commission on Radiological Protection, 1991).

On peut distinguer quatre catégories d'effets biologiques des RI :

- Les effets précoces (immédiats) ;
- Les effets somatiques (à long terme) ;
- Les effets génétiques ;
- Les effets tératogènes ;

Sur le plan physique, les rayonnements X mettent en mouvement des électrons, qui interagissent avec les noyaux et les électrons du milieu qu'ils traversent. L'énergie transportée est cédée en

partie au milieu. Cette énergie est absorbée par les molécules. Selon la quantité d'énergie cédée, il y aura deux phénomènes principaux qui peuvent se produire :

- L'ionisation où l'atome perd un ou plusieurs électrons ;
- L'excitation qui amène les électrons de l'atome du milieu irradié à passer sur une couche plus externe.

Les phénomènes cités ci-dessus sont liés à trois types d'interactions des rayonnements ionisants avec la matière. Il s'agit de : (i) l'effet photoélectrique, (ii) la diffusion Compton et (iii) la création de paires aux fortes énergies, mais cela n'intervient pas avec les tubes utilisés en radiographie. La probabilité de réalisation de l'un de ces effets est directement liée à l'énergie du photon incident et à la charge des noyaux contenus dans la matière observée (Figure 6). Ces aspects seront abordés plus en détails dans le chapitre sur la « Métrologie des rayonnements X ».

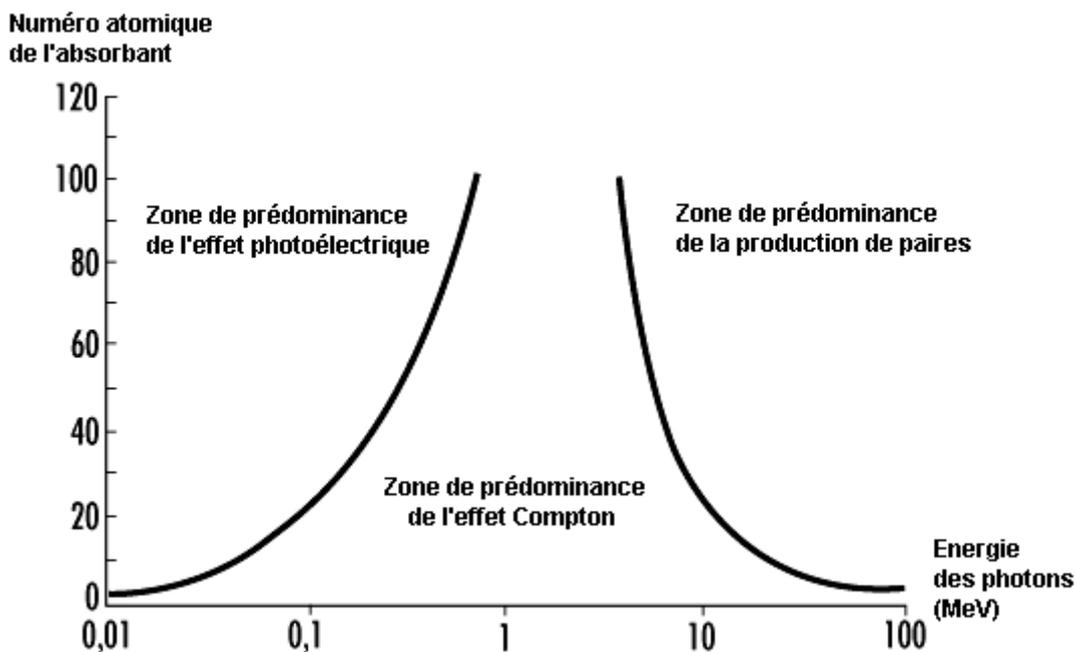


Figure 6 : Importance relative des trois principales formes d'interaction des rayonnements photoniques avec la matière

(Robert N and Cherry Jr, n.d.)

Sur le plan chimique, les transferts d'énergie résultant des interactions physiques sont à l'origine de réactions radiochimiques qui aboutissent à la formation de radicaux libres. Les radicaux libres ont une très grande réactivité chimique et une durée de vie très courte.

La plupart des radicaux libres proviennent des molécules d'eau. Ils sont formés à proximité de la trajectoire de la particule ionisante. Cependant, des radicaux libres de type (H[•]) peuvent être formés plus loin de cette trajectoire. Selon l'énergie transférée par les rayonnements, plusieurs radicaux libres se forment les uns proches des autres et aboutissent au peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée, H₂O₂) qui est très toxique pour la cellule. D'autres radicaux de types hydroperoxyde, superoxyde, qui sont également des oxydants très puissants et toxiques pour la cellule peuvent se former également.

Il existe deux sites particulièrement importants sur les cellules dont l'altération cause d'énormes dégâts à l'échelle moléculaire, en raison de leurs rôles physiologiques. Il s'agit de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et des membranes.

Suite à des lésions de l'ADN, on peut assister à une réparation fidèle des dommages ou à une réparation erronée. Ces lésions de l'ADN et des membranes conduisent soit à la mort de la cellule (l'apoptose, l'autophagie, l'apoptose, la mort mitotique) soit à une mutation génétique de cette dernière.

2.3.1 Effets déterministes

L'exposition à fortes doses de rayonnements ionisants supérieures à un certain seuil conduit à des effets sanitaires précoces qui peuvent apparaître dans les heures suivant l'irradiation ou quelques jours, semaines voire quelques mois après l'irradiation. Il s'agit d'un effet déterministe. Ces effets sont reproductibles et prévisibles pour une dose donnée. Les lésions résultant des effets déterministes apparaissent d'autant plus tôt et durent d'autant plus longtemps que la dose est élevée (Tableau 1). Plus la dose est élevée plus les effets déterministes sont

graves.

Selon que les tissus irradiés soient à renouvellement rapide ou lent les effets apparaissent précocement ou tardivement. Les effets déterministes tardifs s'observent plusieurs mois à plusieurs années suite à des irradiations localisées (accidents radiologiques ou radiothérapie).

Tableau 1 : Effets en fonction de la dose en cas d'exposition généralisée

Doses délivrées au corps entier	Symptômes
< 0,25 Gy	Aucun symptôme
De 0,25 à 1 Gy	Nausées, légère chute du nombre de globules blancs
De 1 à 1,25 Gy	Vomissement, modification nette de la formule sanguine
5 Gy	Dose mortelle pour une personne sur deux

(United Nations, 2010)

2.3.2 Effets stochastiques

Une exposition à faibles doses de rayonnements ionisants (inférieure à 100 mSv) peut entraîner des effets probabilistes dont la fréquence d'apparition augmente avec la dose. On parle d'effets stochastiques. Il s'agit d'effets tardifs qui apparaissent plusieurs années, voire plusieurs décennies après l'exposition.

Plusieurs études réalisées dans les cohortes de travailleurs professionnellement exposés avaient recherché des effets à long terme dus à une exposition prolongée ou répétée à des rayonnements ionisants de faible intensité (effets stochastiques) (Sun et al., 2016). Ces études épidémiologiques ont permis de confirmer l'utilisation du modèle dose-réponse linéaire sans seuil à des fins de radioprotection. Le risque de développement d'un cancer chez les travailleurs professionnellement exposés, a été montré par de nombreuses études (Charles, 2001; Chartier et al., 2020; Memon et al., 2010; United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2016; Wang et al., 2015; Williams, 2002;). Ce risque exprimé en rapport des

cotes¹ (Odds Ratio : OR en anglais) est de 2,90 [IC 95% : 1,19 ; 7,04] pour le cancer des seins et 4,19 [IC 95% : 1,87 ; 9,38] pour le cancer de l'œsophage chez les travailleurs de la radiologie en Chine en 2015 (Wang et al., 2015). Chez les survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki, Preston et al en 2004 ont montré, pour les intervalles de dose de 0 à 0,2 Sv, un excès de risque relatif² (ERR) par Sv de mortalité par cancers solides qui était de 0,76 (P=0,003) (Preston et al., 2004). Cependant, la relation entre certains effets sur la santé (autres que le cancer) et une exposition prolongée à faibles doses ou débits de dose soulève toujours des questions. C'est d'ailleurs l'un des objectifs de cette thèse où il sera question d'évaluer la morbidité chez les travailleurs de l'imagerie médicale au Bénin. Les doses de rayonnements utilisées dans le domaine de l'imagerie médicale diagnostique (la radiologie) sont généralement caractérisées par de faibles doses inférieures à 100 mSv (United Nations et al., 2008).

Connaissant les avantages et les effets sanitaires issus de l'exposition aux rayonnements X, il est important de s'imprégner sur les principes généraux de protection contre les rayonnements X.

2.4 PRINCIPES GENERAUX DE PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS X

La radioprotection au niveau international est organisée par plusieurs institutions dont les plus importantes sont la Commission Internationale de la Protection Radiologique (CIPR), l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et la Commission Internationale sur les Unités et Mesures des radiations (ICRU). Sur la base d'études scientifiques pertinentes sur les effets de l'exposition aux rayonnements sur la santé, elles font des recommandations en matière de limites de dose et de mesures de protection. Ces recommandations sont transposées dans les

¹ Le rapport des cotes ou *l'odds ratio* en anglais est le rapport des cotes de probabilité d'avoir la maladie pour ceux qui ont un symptôme donné d'une part et de ceux qui ne l'ont pas d'autre part (Falissard, 2005).

² L'**excès de risque relatif** est l'augmentation du risque relatif par unité de dose (cas des rayonnements ionisants). Il correspond à la pente de la droite représentant de manière linéaire la relation dose-effet (Breslow and Day, 1996).

directives et dans les lois au niveau national.

Le Guide de sûreté radiologique partie 3 (International Atomic Energy Agency, 2016) de l'AIEA recommande la prise en compte de trois principes dans le domaine de la radioprotection.

Il s'agit de :

- la justification, processus visant à déterminer, si une pratique est, dans l'ensemble, bénéfique, c'est-à-dire si les avantages attendus pour des personnes et pour la société, liés à l'introduction ou à la poursuite de cette pratique l'emportent sur le préjudice (dont le détriment radiologique) résultant de cette pratique (International Atomic Energy Agency, 2016) ;
- l'optimisation, elle se traduit par le principe « ALARA » en anglais « *As low as Reasonably Achievable* » qui signifie « aussi bas que raisonnablement possible d'atteindre ». Selon le guide de sûreté de l'AIEA (GSR partie 3) le principe de l'optimisation est un processus prospectif et itératif qui nécessite des jugements à la fois quantitatifs et qualitatifs. C'est un processus d'établissement de niveaux de protection et de sûreté qui permettent de faire en sorte que la valeur des doses individuelles, le nombre des individus (travailleurs et personnes du public) soumis à une exposition et la probabilité d'exposition soient « aussi bas que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux » (ALARA) (International Atomic Energy Agency, 2016) ; et
- la limitation, c'est le principe qui vise à fixer la valeur d'une grandeur de protection dans certaines activités ou circonstances spécifiées et qui ne doit pas être dépassée) (International Atomic Energy Agency, 2016).

Aussi bien les travailleurs exposés professionnellement que la population générale sont tous soumis à une exposition naturelle aux rayonnements ionisants. Il s'agit de l'exposition aux

rayonnements cosmiques et telluriques, celle liée à l'incorporation de radionucléides naturels contenus dans les denrées et l'eau de boisson puis enfin et celle associée à la présence de radon dans l'habitat. En France, pour la composante rayonnement tellurique, la dose efficace au niveau des mairies varie de 0,30 mSv/an à 2,0 mSv/an en fonction des communes (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2020).

Comme nous l'avons défini au point 1.1 de ce chapitre, les rayonnements X sont des rayonnements électromagnétiques pouvant passer directement à travers un objet ou la matière vivante, ou interagir avec l'objet ou la matière vivante pour finir par être déviés dans de multiples directions.

Dans le but d'appliquer efficacement le principe d'optimisation pour essayer de réduire au niveau plus bas qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, l'exposition potentielle aux rayonnements X, trois moyens de radioprotection sont recommandés. Il s'agit de :

- la durée (limiter la durée des séjours passés auprès de la source) ;
- la distance (plus vous êtes éloignés de la source moins vous êtes exposés ; application de la règle de l'inverse carré de la distance) ;
- l'écran (atténuer les énergies des rayonnements par un matériau de blindage).

Dans un but préventif, il est recommandé d'établir un zonage radiologique autour de la source émettrice de rayonnements ionisants. Ce zonage permet de se rendre compte visuellement par code de couleur, du niveau graduel (du plus faible au plus élevé) d'exposition aux rayonnements ionisants auquel les travailleurs sont soumis.

Pour atténuer l'énergie transportée par ces rayonnements il faut interposer sur leur parcours des matériaux lourds (grande densité) tels le plomb, le bismuth, l'uranium appauvri etc ...

Parmi les écrans, on distingue les équipements de protection collective (EPC) et les équipements de protection individuelle (EPI).

Dans le cas de la radiologie diagnostique, les postes de travail (pupitre de commande) sont séparés de la table d'examen ou du potter mural par un écran en vitre transparente généralement de densité élevée et un mur en béton ordinaire, qui constituent les équipements de protection collective.

Les tabliers plombés, les caches thyroïdes et autres EPI sont portés par chaque travailleur au besoin pour réduire le risque individuel d'exposition aux rayonnements.

2.5 METROLOGIE DES RAYONNEMENTS X

2.5.1 Interaction rayonnement-atome

Les rayonnements X sont des rayonnements électromagnétiques comme nous l'avons précisé plus haut. Les propriétés issues de leurs interactions avec la matière sont utilisées dans le domaine de la métrologie. Puisqu'ils cèdent totalement, ou en partie, leur énergie.

Dans les interactions possibles d'un photon incident avec la matière, les cas rencontrés à la radiologie sont les interactions photon-électron (effet photoélectrique et effet-Compton).

Typiquement, dans les tissus (corps humain constitué en majorité d'eau) l'effet-Compton est prépondérant. Car les noyaux dans les tissus ont pour la plupart une charge inférieure à 8 (Hydrogène, Carbone, Azote, Oxygène). L'effet photoélectrique et effet-Compton sont ceux qui se produisent généralement entre 50 et 100 keV (Antoni and Bourgois, 2013).

Les propriétés de ces différentes interactions sont le plus souvent utilisées dans les matières solides, liquides ou gazeuses pour réaliser des mesures.

2.5.2 Système de détection

Les propriétés d'interaction des rayonnements avec la matière sont utilisées par les techniques

de détection. Ces techniques permettent de convertir l'énergie invisible des rayonnements ionisants en un signal visible à travers leur réaction avec la matière. Les milieux dans lesquels se produisent ces interactions sont liquides, gazeux ou solides. Ces milieux sont souvent contenus ou protégés dans des structures qui permettent de recevoir les rayonnements ionisants dans un angle solide (4π ou 2π stéradians). Ils sont parfois dotés d'ouverture.

Les interactions des rayonnements dans le milieu détecteur produisent une somme d'informations élémentaires qui peuvent être exploitées directement par l'intermédiaire d'un dispositif de conversion ou de traitement. Un signal d'informations exploitables est recueilli par un dispositif d'analyse qualitative et/ou quantitative (Figure 7). Le signal peut, si le principe et la nature du détecteur le permettent, contenir une ou plusieurs informations sur l'énergie, la date, la durée et l'intensité de l'interaction etc...

Dans le cas de mesures passives, le milieu de détection intègrera l'ensemble des énergies cédées ou le nombre d'interactions y ayant eu lieu. C'est le cas des dosimètres passifs ou d'ambiance utilisés pour quantifier la dose efficace d'ambiance ou la dose individuelle des travailleurs et les radiamètres pour le niveau d'exposition, mesure ponctuelle (l'équivalent de dose d'ambiance) dans le milieu de travail.

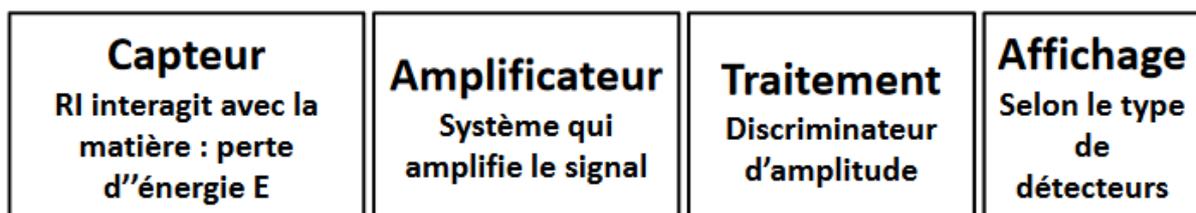


Figure 7 : Constituants généraux des détecteurs

Selon le type d'interaction le milieu de détection et l'information recueillie à l'origine des interactions, on distingue neuf (9) familles de détecteurs. Mais, les familles décrites ci-dessous sont les plus utilisées pour mesurer les rayonnements X. Il s'agit de :

- compteurs gazeux, semi-conducteurs ;
- scintillateurs organiques et inorganiques, écrans fluorescents ;
- dosimètres chimiques, par coloration, émulsions photographiques ;
- dosimètres radiothermoluminescents, dosimètres radiophotoluminescents, dosimètres par luminescence optiquement stimulés.

Ces quatre familles de détecteurs sont basées pour la plupart sur la détection à l'aide d'un gaz, d'un scintillateur gazeux, liquide ou plastique ou d'un semi-conducteur.

2.5.3 Grandeurs dosimétriques (grandeurs physiques, grandeurs opérationnelles et grandeurs de protection)

2.5.3.1 Grandeurs physiques

Les grandeurs physiques sont des grandeurs accessibles quantitativement par un calcul ou par une mesure. Il y a les grandeurs radiométriques servant à caractériser le champ de rayonnement (fluence, énergie) et le kerma (*Kinetic energy released per unit mass* en anglais) qui traduit l'effet « physique » des rayonnements sur la matière en termes d'énergie transférée ou de dépôt d'énergie.

La détermination du kerma fait appel au flux de rayonnements, à l'énergie, à l'activité du radionucléide s'il s'agit d'une source radioactive, et la capacité de ces rayonnements à transférer leur énergie au milieu traversé.

Dans le cas des rayonnements indirectement ionisants tels les rayonnements X, la notion de kerma apparaît indispensable pour exprimer la dose. Elle est caractérisée par l'énergie transférée aux particules secondaires (électrons) au point d'interaction dans un volume donné de matière. Ces électrons déposeront tout ou une partie de leur énergie dans le milieu. C'est le kerma moyen.

$K_{\text{moyen}} = \bar{E}_{tr}/m$; il s'exprime en Gray (Gy) ; $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$; où \bar{E}_{tr} est l'énergie transférée aux particules secondaires (électrons) dans un volume donné de matière et m est la masse en kg ;

Le débit de kerma est le kerma par unité de temps et s'exprime en $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\dot{K} = dK/dt$$

Lorsqu'un équilibre est atteint dans un volume cible pour les particules secondaires mis en mouvement, on peut exprimer la dose ou le débit de dose en fonction du kerma ou du débit de kerma. La notion d'équilibre est développée dans la suite du présent sous-chapitre.

Le kerma est une grandeur systématiquement mesurable, alors que la dose absorbée ne l'est que sous certaines conditions (Antoni and Bourgois, 2013). Nous reviendrons un peu plus loin sur la dose absorbée dans la section « Grandeur de protection ». Sur la base du kerma les grandeurs opérationnelles peuvent être mesurées.

2.5.3.2 *Grandeurs de protection*

Les grandeurs de protection sont non mesurables. Elles sont destinées à quantifier le risque encouru par un individu lorsqu'il est soumis à une exposition interne et/ou externe et sont définies par la Commission Internationale de la Protection Radiologique (International Commission on Radiological Protection, 1991; International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1997, p. 103). L'établissement des grandeurs de protection se base pour la plupart sur les études épidémiologiques ou d'études en radiobiologie.

Il existe trois grandeurs de protection à savoir :

- la dose absorbée (D_T) à l'organe ou au tissu T ;
- la dose équivalente (H_T) relative à l'organe ou tissu T résultant d'un type de rayonnement donné ;
- la dose efficace (E) au corps entier.

La dose absorbée (D_T) à l'organe ou au tissu T

Elle est l'énergie déposée dans la matière par unité de masse et s'exprime en Gray (Gy) ; 1 Gy = 1 J/kg ;

$$D_T = dE/dm$$

Où

dE est l'énergie moyenne conférée par les rayonnements ionisants à la matière (organe ou tissu T) de masse dm .

Le débit de dose (\dot{D}) est la dose par unité de temps et s'exprime en $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\dot{D} = dD/dt$$

Où

dD est la dose instantanée sur un intervalle de temps dt .

Les rayonnements X ne sont pas directement ionisants. L'ionisation provient des effets des électrons (particules) secondaires mis en mouvement dans les tissus. L'estimation de la dose absorbée est en lien avec l'énergie transportée par ces particules mises en mouvement qui sera déposée dans la matière avec laquelle elles interagiront. Généralement le kerma est assimilé à la dose lorsque l'équilibre électronique est atteint à une profondeur donnée (d en mm) dans les tissus. Cette profondeur doit être supérieure à la portée de l'électron secondaire le plus énergétique. En ordre de grandeur pour des électrons énergétiques de 150 KeV, la portée est 0,026 mm dans les tissus humains (Antoni and Bourgois, 2013). La dose absorbée due aux photons en un point à la profondeur d dans le milieu est égale au kerma en ce même point. En deçà de cette profondeur la dose absorbée ne peut être déterminée analytiquement et seul le kerma est accessible au calcul analytique déterministe et à la mesure. Or dans le cas de l'estimation de la

dose reçue au niveau du corps humain, la profondeur d en mm supposée équivalent tissu est de 10 mm (Antoni and Bourgois, 2013).

La dose équivalente relative (H_T) à l'organe ou tissu T résultant du rayonnement de type R

La dose équivalente (H_T en Sievert) est une mesure de la dose délivrée à un organe ou un tissu T visant à rendre compte de l'ampleur du préjudice causé. La relation de base s'écrit :

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{TR}$$

Où

W_R est un facteur de pondération radiologique (facteur multiplicatif dépendant du type de rayonnement R incident sur le tissu ou l'organe T ; $W_R = 1$ pour les rayonnements X , fourni par l'ICRP 60) (Clement et al., 2012, p. 60; International Commission on Radiological Protection, 1991) ; Dans le cas traité dans cette thèse il n'y a pas de somme sur le rayonnement de type R .

D_{TR} : Dose absorbée moyenne dans l'organe ou le tissu T résultant du rayonnement de type R ;

La dose efficace (E) au corps entier

Elle est définie comme étant la somme des produits des doses équivalentes aux tissus ou organes par leurs facteurs de pondération tissulaire respectifs. Car le tissu des différents organes présente de différentes sensibilités aux rayonnements ionisants.

La dose efficace (en Sievert) est une généralisation à l'organisme entier de la notion de dose équivalente. Elle est en fait une dose fictive qui, administrée de manière homogène au corps entier, entraînerait les mêmes dommages tardifs que l'ensemble des doses équivalentes reçues par l'individu au niveau des différents organes à des moments différents.

Il s'agit là de la prise en compte des effets stochastiques. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

Où

W_T : facteur de pondération tissulaire de l'organe (donnée issue des publications ICRP 60, 1991b ; et 103, 2007) (International Commission on Radiological Protection, 1991; International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1997, p. 103) ;

H_T : Dose équivalente relative à l'organe ou tissu T.

Enfin, sur la base de ces grandeurs, sont établies des limites de doses autorisées dont les valeurs numériques sont telles que le risque associé ne modifie pas de façon significative l'ensemble des risques de la vie courante (International Commission on Radiological Protection, 1991).

Ces limites sont énumérées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Limites annuelles de doses efficaces et équivalentes fixées par les normes internationales (Guidance Safety Radiation part 3)

Limites de doses	Public	Travailleurs exposés	Apprentis & étudiants (16 -18 ans)
Dose efficace (E)	1 mSv par an	20 mSv par 12 mois consécutifs glissants	6 mSv par an
Cristallin	15 mSv par an	20 mSv par 12 mois consécutifs glissants	15 mSv par an
Dose équivalente (H_T)	Peau (moyenne de la dose à la peau sur une surface d'1 cm ²)	500 mSv par 12 mois consécutifs glissants	150 mSv par an
Mains, avant-bras, pieds et chevilles	Pas d'application	500 mSv par 12 mois consécutifs glissants	150 mSv par an

Pour le corps entier (dose efficace) et le cristallin (dose équivalente) on admet aux travailleurs une limite maximale de dose efficace de 50 mSv sur une année sans qu'ils ne dépassent 100 mSv sur 5 années consécutives glissantes d'exposition.

2.5.3.3 Les grandeurs opérationnelles

Dans le but de suivre l'exposition professionnelle, la Commission Internationale sur les Unités de Radiation et Mesures (ICRU en anglais) a introduit dans son rapport n°39 en 1985 (International Commission on Radiation Units and Measurements, 1985, p. 39), le concept des grandeurs opérationnelles, dans le cadre des expositions externes. Elle a été soutenue par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) qui dans sa publication 60 (Clement et al., 2012, p. 60) préconise l'utilisation de ces grandeurs opérationnelles pour estimer les grandeurs de protection (doses efficaces et doses équivalentes aux organes ou tissus). Ces grandeurs permettent une estimation raisonnable des grandeurs de protection. Elles s'expriment en Sievert ou millisievert (sous-multiples).

Les grandeurs opérationnelles ont les caractéristiques suivantes :

- mesurables par des instruments équipés de détecteurs de rayonnements externes ;
- généralement majorantes de la dose efficace et des doses équivalentes aux organes ou tissus, pour les rayonnements fortement et faiblement pénétrants.

Pour la dosimétrie d'ambiance ou de zone, ces grandeurs sont l'équivalent de dose ambiant $H^*(d)$ pour les rayonnements fortement pénétrants et $H'(d, \Omega)$, équivalent de dose directionnel, pour les rayonnements faiblement pénétrants. L'équivalent de dose ambiant $H^*(d)$ en un point dans le champ de rayonnement est l'équivalent de dose qui serait produit par le champ expansé et unidirectionnel correspondant dans la sphère ICRU (Figure 8) à une profondeur d , sur un rayon qui fait face à la direction de champ unidirectionnel.

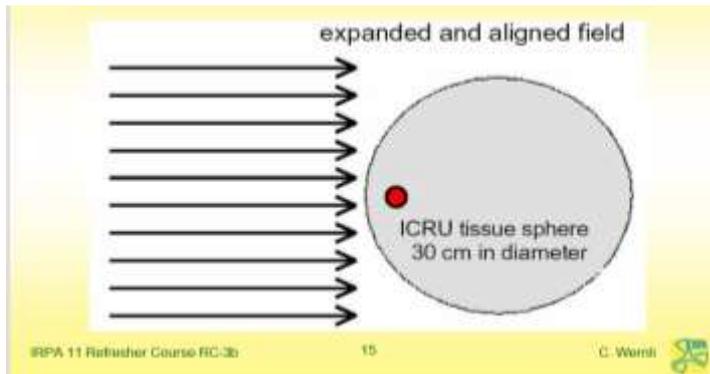


Figure 8 : Sphère ICRU concept d'alignement et d'expansion du champ sur une sphère ICRU de 30 cm de diamètre

(Wernli and Scherrer, 2004)

Pour la dosimétrie individuelle, la grandeur opérationnelle correspond à un équivalent de dose individuelle $H_p(d)$. C'est l'équivalent de dose dans le tissu mou ou du moins spécifié sur la surface du corps à une profondeur (d) d'un matériel de mesure équivalent tissu. Cette grandeur peut être mesurée à l'aide d'un dosimètre porté à la surface du corps. La profondeur (d) , d'un matériel de mesure équivalent tissu, recommandée pour le contrôle des rayonnements fortement pénétrants comme les rayonnements X est de 10 mm. Elle s'exprime en millisievert (mSv). Pour les rayonnements faiblement pénétrants la profondeur (d) , d'un matériel de mesure équivalent tissu, recommandée est de 0,07 mm ($H_p(0,07)$) s'il s'agit de la peau et de 0,3 mm ($H_p(0,3)$) pour le cristallin.

2.6 SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION EXTERNE

Pour respecter les limites recommandées, il faut évaluer l'exposition sur les lieux de travail.

De manière générale et selon les applications des rayonnements dans les installations médicales, les travailleurs sont confrontés à des risques d'exposition externe (rayonnement X, gamma et bêta) et interne (rayonnement alpha et bêta) lors des contaminations par des sources radioactives non scellées (liquides ou gazeuses) (Figure 9).

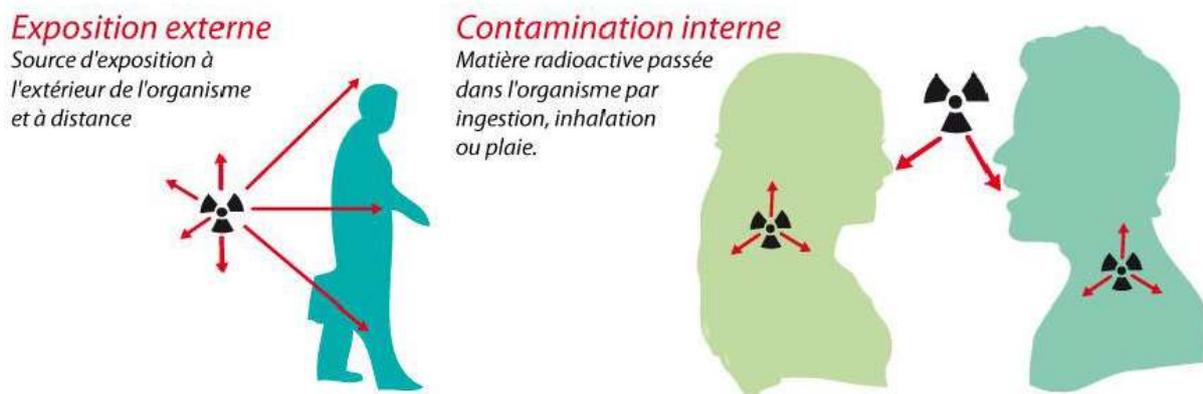


Figure 9 : Types d'exposition
(Fournier, 2017)

En radiologie, et principalement au Bénin, les travailleurs sont uniquement soumis aux risques d'irradiation externe due aux rayonnements X.

2.6.1 Surveillance dosimétrique des travailleurs

La surveillance dosimétrique est un moyen de vérification des niveaux d'exposition des travailleurs. Les données dosimétriques telles que « dose équivalente » ou « dose efficace » sont généralement confrontées aux doses déterminées lors de l'évaluation individuelle avant l'affectation au poste de travail et aux limites d'exposition professionnelle fixées par les réglementations nationales.

Elle se base généralement sur l'étude de poste réalisée par une personne compétente en radioprotection (PCR) désignée par le Chef d'établissement en collaboration avec un médecin de travail.

Les principes de justification et d'optimisation gouvernent généralement les fondements de l'étude de poste à réaliser.

Dès lors qu'une exposition est justifiée le principe d'optimisation est appliqué de telle sorte que

la valeur des doses individuelles, le nombre de travailleurs soumis à une exposition et la probabilité d'exposition soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux. L'étude de poste prend également en compte les expositions potentielles.

Dans une étude de poste, les étapes suivantes sont à prévoir :

– *Identification du danger*

Dans le cas de notre étude, le danger est représenté par les rayonnements ionisants. Ils proviennent soit directement du tube à rayons X (rayonnements primaires orientés vers le patient), ou du patient en tant que rayonnements diffusés vers le travailleur ou toute personne présente dans la salle au moment de l'irradiation. Ces rayonnements diffusés sont émis dans toutes les directions (y compris vers le poste de travail des techniciens de radiologie).

– *Identification du risque d'exposition externe aux rayonnements ionisants*

Pour les rayonnements diffusés : le risque d'exposition concerne toute personne présente dans la salle d'examen ou au poste de travail au moment du passage des rayonnements au cours de la réalisation d'un acte radiologique par le technicien. Les niveaux d'exposition ambiants dans la salle d'examen et au poste de travail ne sont pas les mêmes.

Pour les rayonnements primaires : ils sont sans risque pour les personnes présentes dans la salle d'examen ou au poste de travail, puisqu'ils sont orientés vers le patient (Figure 10).

En dehors de ces deux types d'exposition, il arrive que le travailleur au poste de travail ou toute autre personne présente dans la salle au moment de l'exposition du patient soit exposée aux rayonnements de fuite. Ils sont émis par les gaines du tube (entrée des courants de la haute tension du tube) (Figure 10).

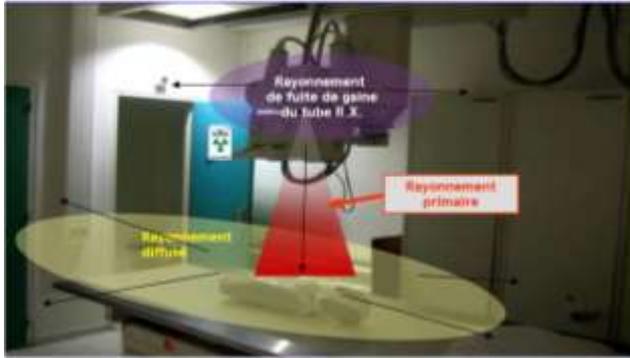


Figure 10 : Orientation des faisceaux de rayonnements (primaires, diffusés et de fuite)
(Rehel, 2008)

– *Déroulement des procédures d'exposition des patients*

Les procédures d'exposition des patients ont été décrites plus haut pour le cas de la radiologie standard et ne sont pas différentes de celles réalisées à la tomodensitométrie. En ordre de grandeur en France, la dose efficace moyenne pour un adulte dans le cadre de la réalisation d'une radiographie du rachis lombaire est de 2,7 mSv en moyenne (2,7 clichés en moyenne par acte) et de 10,7 mSv pour une tomodensitométrie abdomino-pelvienne avec injection (1,8 acquisition en moyenne par acte) (Institut de Veille Sanitaire, 2010).

– *Evaluation du risque d'exposition des travailleurs*

L'évaluation du risque s'appuie généralement sur (i) les indicateurs dosimétriques fournis par les fabricants, (ii) les résultats des mesures réalisées sur l'installation par la PCR ou un organisme agréé, (iii) les résultats des contrôles techniques d'ambiance réalisés soit à l'aide d'un radiamètre ou d'un dosimètre d'ambiance, (iv) l'analyse des pratiques propres à chaque examen, (v) les statistiques dosimétriques des travailleurs au poste.

La mise en place d'un zonage radiologique qui permet de visualiser le danger est indiquée pour traduire les résultats des contrôles techniques d'ambiance réalisés à l'aide d'un radiamètre. Il permet de connaître l'équivalent de dose ou le débit d'équivalent de dose susceptible d'être reçu

par une personne ayant séjourné près de la source d'irradiation en une heure à une position donnée dans le zonage, dans les conditions d'exploitation les plus pénalisantes.

En radiologie standard comme pour la tomodensitométrie, un lieu est classé zone surveillée si les niveaux d'équivalent de dose ambiant sont inférieurs à 7,5 μSv en une heure. Au dessus, il est classé zone contrôlée. Cette dernière peut être subdivisée en plusieurs sous-zones (verte, jaune, orange, correspondant à des doses horaires de 7,5 μSv , 25 μSv et 2000 μSv sur une heure respectivement).

Cependant, les réglementations exigent que le poste de travail soit classé à minima zone surveillée au cas où l'appareil serait sous tension.

– *Identification des personnes concernées par l'exposition externe aux rayonnements X*

Habituellement, sont concernés par ces expositions professionnelles, les manipulateurs (techniciens) en électroradiologie médicale, les radiologues, les physiciens médicaux et le personnel de maintenance des appareils.

– *Périodicité du suivi dosimétrique individuel*

Dans la réglementation française (R. 4451-57 du Code du travail) (Parlement de la France, 1910), selon l'étude de poste les travailleurs peuvent être classés catégorie A ou B, indépendamment des zones où ils exercent leur activité.

Sont classés en catégorie A les travailleurs susceptibles de recevoir sur 12 mois consécutifs, une dose efficace supérieure à 6 mSv, et/ou une dose équivalente supérieure à 150 mSv pour la peau et/ou les extrémités.

Sont classés en catégorie B tous les autres travailleurs susceptibles de recevoir sur 12 mois consécutifs, une dose efficace supérieure à 1 mSv, et/ou une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin et/ou à 50 mSv pour la peau et/ou les extrémités.

Sur la base de cette classification, une surveillance dosimétrique individuelle mensuelle est requise pour les travailleurs de la catégorie A et trimestrielle pour ceux de la catégorie B.

Mais, sur les lieux de la collecte des données de notre étude, selon la réglementation béninoise (Ministère du Travail et de la Fonction Publique and Ministère de la Santé, 2006), il n'existe pas de classification des travailleurs exposés. La périodicité de la surveillance dosimétrique individuelle est en accord avec le poste de travail classé zone surveillée où la surveillance est trimestrielle ou, zone contrôlée où la surveillance est mensuelle pour les travailleurs. Au Bénin tous les travailleurs sont désignés travailleurs exposés lorsqu'ils sont susceptibles de recevoir sur 12 mois consécutifs, une dose efficace supérieure à 1 mSv, et/ou une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin et/ou à 50 mSv pour la peau et/ou les extrémités (Ministère du Travail, de la Fonction Publique et des Affaires Sociales and Ministère de la Santé de la République du Bénin, 2017). Cependant, tout travailleur intervenant dans un milieu où sont émis des rayonnements ionisants ou susceptibles d'être émis, sont également désignés travailleurs exposés.

2.6.2 Surveillance médicale des travailleurs

Pour une prise en charge efficace de la santé des travailleurs, conformément aux recommandations internationales, à la réglementation française (art. R. 4451-82 du Code du travail) (Parlement de la France, 1910) et celles béninoises (Parlement du Bénin, 1998), il est institué une surveillance médicale renforcée des travailleurs. Elle est généralement renforcée du fait du caractère spécifique des expositions aux rayonnements ionisants et a pour objectif de déceler les effets sanitaires des rayonnements ionisants. Ces effets sanitaires sont consignés dans le dossier de suivi médical du travailleur.

2.7 NIVEAU MONDIAL ET AFRICAÏN D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE AUX RAYONNEMENTS IONISANTS (REVUE BIBLIOGRAPHIQUE)

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants se produit pour de nombreuses professions, y compris la médecine, la recherche/l'enseignement et l'industrie (United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2016).

En 2021 à l'issue de son Assemblée générale (soixante-septième et soixante-huitième sessions), le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a publié dans son rapport une évaluation annuelle de l'exposition professionnelle entre 2010 et 2014. Au cours de cette période, le Comité a estimé le nombre annuel de travailleurs exposés dans le monde à des sources naturelles et artificielles de rayonnements ionisants à environ 24 millions, dont plus de 11,4 millions (United Nations, 2021) pour les sources artificielles uniquement. Parmi ceux-ci, le personnel du secteur médical était prédominant et représentait environ 80 % du total (9 millions) (United Nations, 2021). La dose efficace annuelle moyenne pour le secteur médical était d'environ 0,5 mSv au cours de la même période (United Nations, 2021).

En 2020 en France, la dose efficace individuelle moyenne était de 0,78 mSv, avec plus de 94 % des travailleurs suivis qui avaient reçu une dose efficace annuelle inférieure à 1 mSv. L'évaluation de cette exposition avait pris en compte tous les domaines d'activité impliquant l'utilisation des rayonnements ionisants. Par ailleurs, le domaine médical et vétérinaire et le domaine de la recherche présentaient des doses annuelles individuelles moyennes les plus faibles, inférieures ou égales à 0,25 mSv (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, 2021). Malgré l'augmentation notable d'année en année de la fréquence des procédures radiologiques (Samer S. Abu Zer et al., 2016) qui soulève des inquiétudes quant au risque potentiel qu'elles peuvent représenter pour les patients et les professionnels (Dauda et al., 2019), les expositions professionnelles moyennes annuelles dans le domaine médical en France

restent inférieures à celles du niveau mondial publiées par le rapport du Comité cité ci-dessus.

Le suivi du personnel médical exposé de façon chronique aux rayonnements ionisants est une pratique courante dans de nombreux pays, mais reste limité sur le continent africain. Ceci a été démontré dans le rapport 2017 du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants qui indique que la littérature traitant de l'exposition médicale en Afrique, en Asie et en Amérique latine est limitée (United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2016).

Nous avons réalisé une étude de revue systématique en 2019, qui consistait à synthétiser les informations existantes sur le suivi des niveaux d'exposition externe aux rayonnements, du personnel médical sur le continent africain.

On constate que le rapport UNSCEAR 2017 (United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2018) et le rapport de l'Agence internationale de l'énergie atomique, 2014 (International Atomic Energy Agency, 2014) ont mis à jour les informations au sujet des niveaux d'exposition externe aux rayonnements au niveau international, alors que très peu de travaux africains ont été trouvés.

Au total, sur les vingt articles potentiellement pertinents qui ont été identifiés dans la revue systématique citée plus haut, quinze rapportaient la dose efficace annuelle moyenne globale du personnel médical (Tableau 3). Les études incluses dans cette revue systématique représentent un inventaire de la radioprotection des travailleurs médicaux dans divers pays d'Afrique, en mettant l'accent sur la surveillance de l'exposition professionnelle aux rayonnements. Les doses efficaces annuelles moyennes variaient de 0,44 à 8,20 mSv (Tableau 4) (Gbetchedji et al., 2020) dans toutes les spécialités des secteurs médicaux, tandis qu'au niveau de la radiologie diagnostique considérée isolément, les doses efficaces annuelles moyennes variaient de 0,07 à

4,37 mSv (Tableau 5) (Gbetchedji et al., 2020). Presque la moitié (41,67 %) (Tableau 6) des études a présenté une dose efficace annuelle moyenne inférieure à 1 mSv. Ces niveaux d'exposition sont relativement élevés par rapport à 0,5 mSv en 2014 pour le personnel médical (International Atomic Energy Agency, 2014) au niveau international et à 0,25 mSv en 2020 (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2021) en France. Cependant, on note une baisse des niveaux d'exposition dans le secteur de la radiologie diagnostique entre 2007 et 2010 (Figure 11).

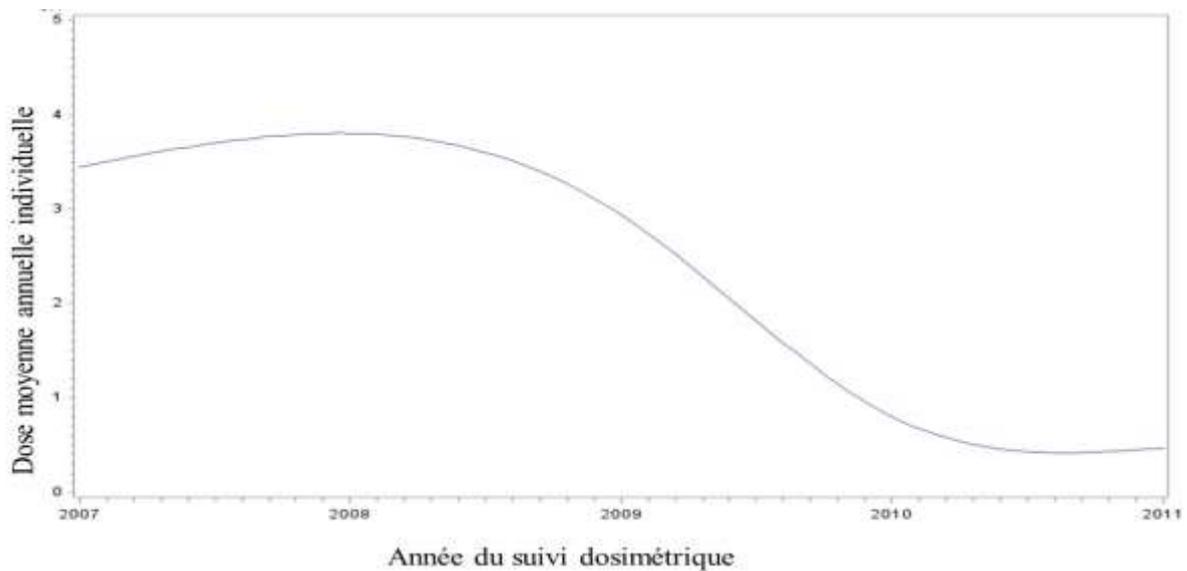


Figure 11 : Evolution des doses annuelles dans le secteur de la radiologie diagnostique entre 2007 et 2010 en Afrique

Nous avons conclu dans notre revue systématique qu'il était nécessaire de réaliser davantage d'études en lien avec la surveillance dosimétrique en Afrique pour obtenir une image réelle de l'exposition professionnelle sur ce continent.

Ces différentes doses efficaces reçues par les travailleurs ne sont peut-être pas sans conséquence, quand bien même elles sont inférieures au 100 mSv, niveau de dose en dessous duquel prévalent les effets stochastiques. La revue des études épidémiologiques que nous allons

aborder dans la session suivante, nous en dira un peu plus sur ces effets stochastiques.

Tableau 3 : Résumé de vingt études sélectionnées

Auteurs	Pays	Type d'étude	Source population (taille de l'échantillon)	Doses moyennes disponibles (Oui/Non)	Doses individuelles annuelles collectives disponibles (Oui/Non)	Période
(Yakoro et al., 2010)	Burkina Faso	Longitudinale	TE en médical (3 à 121)	Oui	Non	2007 à 2010
(Tapsoba et al., 2012)	Burkina- Faso	Transversale	TE en radiologie diagnostique (81)	Oui	Non	2010 à 2011
(Alramlawi et al., 2015)	Egypt	Rétrospective	TE (source radioactive) (27)	Non	Non	2002 à 2012
(Bayou, 1991)	Ethiopia	-	TE (100 à 450)	Oui	Oui	1977 à 1988
(Gordon et al., 2011)	Ghana	Transversale	TE en médical, industriel, recherche et l'enseignement (650)	Oui	Oui	2002 à 2007
(Hasford et al., 2012)	Ghana	Rétrospective	TE en radiologie diagnostique (5152), radiothérapie (747), médecine nucléaire (87)	Oui	Oui	2000 à 2009
(Adjei et al., 2012)	Ghana	Transversale	TE en medical, industriel, de la recherche et l'enseignement : radiothérapie (8), diagnostic (556), médecine nucléaire (4)	Oui	Oui	2008 à 2009
(Osei, 1997)	Ghana	Transversale	TE en médecine, industriel, recherche et l'enseignement (254 à 761)	Oui	Oui	1988 à 1995
(Korir et al., 2011)	Kenya	Transversale	TE en radiologie diagnostique (367)	Oui	Oui	2007
(Andriambololona et al., 2002)	Madagascar	Transversale	TE en radiologie diagnostique (260)	Oui	Non	1990 à 2000
(Chinangw)	Malawi	Transversale	TE en radiologie diagnostique (Nombre de travailleurs non défini)	Non	Non	2018

a et al., 2018)						
(Farai, P. and Obed, I., 2001)	Nigeria	Longitudinale	TE en médical, en industriel, et de la recherche (640)	Oui	Oui	1990 à 1999
(Ogundare and Balogun, 2003)	Nigeria	Transversale	TE en médical (30 to 192)	Oui	Oui	1999 à 2001
(Okeji et al., 2010)	Nigeria	Transversale	TE en radiologie diagnostique (500)	Non	Non	2009
(Eze et al., 2011)	Nigeria	Transversale	TE (nombre de travailleurs non défini)	Non	Non	2011
(Ogundare and A. Balogun, 2003)	Nigeria	Transversale	TE en medical et en industriel (500)	Oui	Oui	2000 à 2001
(Nzotta and Chiaghana m, 2010)	Nigeria	Transversale	TE en médical, techniciens et radiologues (59)	Oui	Non	2005 à 2007
(Ahmed et al., 2012)	Sudan	Transversale	TE en cardiologie (nombre de travailleurs non défini)	Non	Non	2010
(Muhogora et al., 2013)	Tanzania	Rétrospective	TE en médical, en industriel, recherche et enseignement (730)	Oui	Oui	1996 à 2010
(Muhogora et al., 1997)	Tanzania	Transversale	TE en médical, industriel, recherche et enseignement (1000)	Oui	Oui	1986 à 1997

TE: Travailleurs exposés.

Tableau 4 : Résumé de sept articles issus des vingt études sélectionnées concernant le report des doses individuelles moyennes pour toutes les spécialités du secteur médical et les autres secteurs (Industriel/Recherche/Enseignement)

Auteurs	Type de dosimètre	Doses moyennes annuelles individuelles (en mSv)		
		Secteur medical	Autres secteurs	
			Industriel	Recherche et enseignement
(Farai, P. and Obed, I., 2001)	TLD	8.20	2.34	4.39
(Bayou, 1991)	TLD	4.51	-	-
(Gordon et al., 2011)	TLD	0.57	0.54	-
(Adjei et al., 2012)	TLD	0.44	0.54	0.38
(Ogundare and Balogun, 2003)	TLD	3.20 à 3.70	4.70 à 19.40	-
(Muhogora et al., 1997)	TLD	1.68	0.93	0.92
(Ogundare and A. Balogun, 2003)	TLD	2.7	16.25	-

TLD = Dosimètre Thermo-Luminescent.

Tableau 5 : Résumé de huit articles issus des vingt études sélectionnées concernant le report des doses individuelles moyennes pour les différentes spécialités du secteur médical

Auteurs	Type de dosimètre	Doses moyennes annuelles individuelles (en mSv)		
		Radiologie diagnostique	Médecine Nucleaire	Radiothérapie
(Hasford et al., 2012)	TLD	2.94	6.30	5.24
(Muhogora et al., 2013)	TLD	1.50	1.50	-
(Nzotta and Chiaghanam, 2010)	TLD	4.37	-	-
(Osei, 1997)	TLD	0.80	0.56	1.12
(Tapsoba et al., 2012)	TLD	0.07 à 0.47	-	-
(Korir et al., 2011)	TLD	2.52	-	-
(Yakoro et al., 2010)	TLD	En moyenne 85.22 % of doses < 0.10	-	-
(Andriambololona et al., 2002)	TLD	0.90 à 2.00	-	-

TLD = Dosimètre Thermo-Luminescent.

Tableau 6 : Etudes indiquant une proportion de doses annuelles inférieures ou supérieures à la limite réglementaire pour le public dans le secteur médical

Auteurs	Nombre d'études indiquant des doses annuelles inférieures ou supérieures à la limite réglementaire pour le public
(Yakoro et al., 2010); (Tapsoba et al., 2012); (Suliman et al., 2011); (Adjei et al., 2012); (Gordon et al., 2011)	< 1 mSv/an 5/12 (41.67%)
(Farai, P. and Obed, I., 2001); (Bayou, 1991); (Hasford et al., 2012); (Muhogora et al., 2013); (Korir et al., 2011); (Andriambololona et al., 2002); (Ogundare and Balogun, 2003)	>1mSv/an 7/12(58.33%)

2.8 ETUDES EPIDEMIOLOGIQUES DES EFFETS SANITAIRES LIES A L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

2.8.1 Mesures d'association dans les études de cohorte

L'épidémiologie fournit les principales bases de l'estimation des effets « stochastiques » des expositions aux rayonnements ionisants pour l'homme. En épidémiologie analytique, l'objectif est d'estimer le lien entre la survenue d'une maladie ou d'un décès (variable à expliquer notée Y) dans une population donnée à des prédicteur(s) ou facteur(s) d'exposition (variables explicatives notées X) dans cette même population. Pour ce faire, on utilise souvent un modèle de régression, c'est-à-dire une fonction mathématique exprimant Y en fonction de X et des paramètres de régression. Pour l'analyse des données de cohorte, les paramètres comme le rapport des risques instantanés (en anglais : *hazard ratio* (HR)), le risque relatif (en anglais : *relative risk* (RR)) ou l'excès de risque relatif (en anglais : *excess relative risk* (ERR)) sont couramment estimés. HR estimé à partir du modèle de Cox (D. R. Cox, 1972), correspond au rapport entre la fonction de risque instantané au temps t chez les exposés et la fonction de risque instantané au temps t chez les non exposés. Le modèle de Cox se présente comme suit (D. R. Cox, 1972) :

$$h(t, z) = \exp(\beta z) h_0(t)$$

Où β est un paramètre de régression ; Z est la variable ; t est le temps ; $h_0(t)$ est la fonction de risque de base. La vraisemblance partielle est utilisée pour obtenir des estimations de

paramètres pour la régression de Cox. HR est proche du RR avec une dimension temporelle supplémentaire. La régression de Poisson est le second modèle fréquemment utilisé en épidémiologie pour l'analyse des études de cohorte, en plus du modèle de Cox. Effectuer une régression de Poisson consiste à modéliser le nombre d'événements observés par intervalles de temps et d'exposition. Cette régression permet d'estimer RR et ERR. Le RR est le rapport entre la probabilité de survenue d'une maladie chez les exposés et la probabilité de survenue d'une maladie chez les non exposés. L'ERR correspond à l'augmentation du risque relatif par unité de dose (cas des rayonnements ionisants). Il correspond à la pente de la droite représentant de manière linéaire la relation dose-effet (Breslow and Day, 1996). Il est aussi exprimé par le risque relatif (RR) moins un ($ERR=RR-1$).

2.8.2 Effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements ionisants (alpha, bêta, gamma et X)

2.8.2.1 *Cancers solides et leucémies*

Dès le début du XXe siècle, plusieurs études épidémiologiques ont mis en évidence les effets sanitaires des rayonnements ionisants. La communauté internationale à travers le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) et le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) ont documenté largement ces questions. Les premières études menées dès les années 1920 sur les « radium girls », ouvrières américaines chargées de peindre des cadrans de montres avec de la peinture au radium ont permis de connaître les effets à fortes doses des rayonnements ionisants. Plusieurs de ces ouvrières avaient développé un sarcome osseux (Castle et al., 1925). Dans cette lancée de la recherche sur les effets sanitaires des rayonnements ionisants, des études épidémiologiques ont décelé chez des radiologues un excès de leucémies (Henshaw et al., 1944; Ulrich, 1946). Ce n'est qu'après ces études pionnières que viennent celles réalisées sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki (Pierce et al., 1996, pp. 1950–1990) qui ont permis d'approfondir la connaissance sur les effets sanitaires des rayonnements ionisants. Le rapport VII du Comité

national de recherche sur les effets biologiques des rayonnements ionisants (BEIR) en 2006 (National Research Council, 2006, p. 2) avait fait l'état des lieux sur les cancers radio-induits en se basant sur plusieurs études épidémiologiques.

Le but de ces études était d'apporter de nouvelles connaissances à la communauté scientifique et de contribuer à l'élaboration des normes de radioprotection.

L'UNSCEAR (United Nations, 2010) dans son rapport 2006 volume I a présenté des études épidémiologiques qui avaient établi des liens entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le cancer de certains organes. Il s'agit du cancer des glandes salivaires, de l'œsophage, de l'estomac, de l'intestin grêle (y compris du duodénum), du côlon, du rectum, du foie, du pancréas, des poumons, des os, du sein (au niveau des femmes), de l'utérus, des ovaires, de la prostate, de la vessie, des reins, du cerveau et le système nerveux central, et de la thyroïde. Les risques de lymphome non hodgkinien, de la maladie de Hodgkin, de myélome multiple, de leucémie, de mélanome cutané et de cancer de la peau non mélanique ont fait également l'objet d'études épidémiologiques recensées à l'annexe B dudit rapport.

De 2006 à 2017 plusieurs autres études épidémiologiques ont été effectuées à la suite des premières dont les plus récentes à notre connaissance sur les cancers induits par les rayonnements ionisants à faibles doses avaient fait l'objet d'une revue par Amy Berrington de Gonzalez et al, (Berrington de Gonzalez et al., 2020) et Michael Hauptmann, et al, (Hauptmann et al., 2020).

La revue systématique d'Amy Berrington de Gonzalez et al, (Berrington de Gonzalez et al., 2020) a présenté 26 études éligibles qui avaient présenté des valeurs d'excès de risque relatif à 100 mGy de décès par cancers solides et leucémies dont 14 sur l'exposition professionnelle. La

plupart des participants aux études sur les expositions professionnelles dans cette revue systématique avaient été exposés à des doses inférieures à 100 mGy. L'excès de risque relatif³ (ERR) à 100 mGy pour tous les cancers (cancers solides) était positif (c'est-à-dire > 0) pour 16 des 22 études. Pour la leucémie, l'ERR à 100 mGy était positif pour 17 des 20 études.

Toutefois, Pierce et al, déclarent que l'analyse de l'incidence des cancers chez les survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki suggère que les doses inférieures à 150 mSv ne conduisent pas à une augmentation du risque de leucémies radio-induites. Ils poursuivent plus loin en précisant qu'un tel seuil n'a pas été mis en évidence pour les cancers solides, mais il ne peut être exclu au-dessous de 60 mSv (Le Guen, 2006; Pierce and Preston, 2000).

En dehors des cancers solides et leucémies abordés dans la littérature, nous avons également des affections non cancéreuses liées à l'exposition aux rayonnements ionisants qui ont attiré notre attention.

2.8.2.2 Affections non cancéreuses liées à l'exposition aux rayonnements ionisants (alpha, bêta, gamma et X)

Les études épidémiologiques explorées par le rapport 2006 de l'UNSCEAR ont abordé l'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et les maladies cardiovasculaires et la cataracte.

Concernant les maladies non cancéreuses, telles que cataracte (McCarty et al., 1999), radiodermites aiguë et chronique (Davis et al., 1989; Totten et al., 1957), elles ont été largement documentées et développées dans la revue systématique de Jay R. Parikh et al, (Parikh et al., 2017).

³ L'excès de risque relatif est l'augmentation du risque relatif par unité de dose (cas des rayonnements ionisants). Il correspond à la pente de la droite représentant de manière linéaire la relation dose-effet (Breslow and Day, 1996).

La sensibilité des tissus aux rayonnements ionisants n'étant pas la même d'un type de rayonnements à l'autre, il s'avère nécessaire de rechercher les informations publiées dans la littérature sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements gamma ou X spécifiquement. Nous rappelons que les rayonnements gamma ou X sont des rayonnements électromagnétiques de mêmes caractéristiques.

2.8.3 Effets sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements ionisants (gamma et X)

2.8.3.1 *Cancers solides et leucémies*

Une revue de littérature, exhaustive, portant sur les risques de cancers parmi les radiologues et les techniciens en radiologie a été effectuée par Yoshinaga et al, (Yoshinaga et al., 2004). Cette revue a pris en compte huit cohortes de plus de 270 000 radiologues et techniciens en radiologie dans divers pays. Les travaux associés concluent à une augmentation de la mortalité due à la leucémie chez les travailleurs employés avant 1950, pour des expositions élevées et un risque accru de leucémie pour une durée de travail croissante dans les premières années. Contrairement à cette preuve de l'effet de l'exposition sur les leucémies dans ce groupe de travailleurs, les risques de mortalité par cancers solides étaient moins cohérents. Par ailleurs, plusieurs études répertoriées au cours de cette revue ont fourni des preuves d'une association entre l'exposition et le cancer du sein et, le cancer de la peau.

Plus tard en 2017, Jay R. Parikh et al, (Parikh et al., 2017) ont réalisé une revue ayant pris en compte un grand nombre de travaux sur les radiologues avec un nombre de sujets inclus dans les différentes cohortes qui allaient de 6500 à 146022 sujets. Parmi ces cohortes, on peut citer les plus grandes à savoir : (i) la cohorte de 43763 radiologues non interventionnels de 1916 à 2006 de l' « *American Medical Association* » en anglais (AMA) et (ii) la cohorte de 146022 techniciens en radiologie certifiés des États-Unis par l' « *American Registry of Radiologic Technologists* » de 1923 à 1980. Les preuves d'une association entre l'exposition aux RI et la mor-

talité par cancer due à la leucémie myéloïde aiguë ou le syndrome myélodysplasique, le mélanome et le lymphome non hodgkinien (Berrington de González et al., 2016; Jablon and Miller, 1978; Linet, 2005), cancer du sein (Doody et al., 2006; Mohan, 2002) mélanome (Freedman et al., 2003) cancer de la peau (Sont et al., 2001; Yoshinaga et al., 2005) cancer de la thyroïde (Parikh et al., 2017; Pukkala et al., 2009) sont apportées .

Les preuves d'une association entre l'exposition aux rayonnements X et les maladies cancéreuses continuent d'être fournies par la littérature jusqu'à présent.

2.8.3.2 Affections non cancéreuses liées à l'exposition aux rayonnements ionisants (gamma et X)

La plupart des études citées dans les revues effectuées par Yoshinaga (Yoshinaga et al., 2004) et Jay R. Parikh (Parikh et al., 2017) ont évoqué la mise en évidence d'association entre les cancers solides ou la leucémie et l'exposition aux rayonnements ionisants (gamma et X). Par contre, les affections non cancéreuses ont été abordées seulement que par quelques études. C'est le cas des maladies cardiovasculaires dont l'excès de risque relatif par Gray était de 0,11 ($ERR.Gy^{-1}$) [Intervalle de Confiance (IC) 95% : 0,05 ; 0,17] (Ozasa et al., 2016). Mais ces études restent imprécises sur les preuves d'une telle association et concluent qu'il existe plusieurs facteurs de risques de confusion importants, tels que le tabagisme et la consommation d'alcool, qui pourraient influencer ces résultats et, qui malheureusement n'avaient pas été pris en compte dans ces études. Dans le cadre de l'exposition professionnelle, Rajaraman et al. (Rajaraman et al., 2016, pp. 1994–2008) ont conclu que, comparés aux personnes non exposées, les techniciens de radiologie avaient un risque relatif égal à 1,34 (IC 95% : 1,10 ; 1,64) de faire un accident vasculaire cérébral.

La cataracte également a fait l'objet d'une grande attention lors de plusieurs études épidémiologiques recensées par Jay R. Parikh et al. (Parikh et al., 2017). Les effets néfastes sur le cristallin étaient connus pour les doses élevées (Nefzger et al., 1969, pp. 1963–19641), mais il a

fallu les études sur la cohorte prospective menées auprès de 35705 techniciens en radiologie des Etats Unis d'Amérique avec 2382 cas de cataracte auto-déclarés pour révéler un ERR élevé (ERR = 2,0, IC 95% : - 0,7 ; 4,7) entre la formation de cataracte et l'augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants (Chodick et al., 2008) (Parikh et al., 2017). Cet ERR n'était toutefois pas significatif. Plus récemment, une extension de cette cohorte à 67246 techniciens en radiologie avec 12366 cas de cataracte auto-déclarés, a permis montrer un ERR significatif bien que plus faible (ERR = 0,69, IC 95% : 0,27 ; 1,16) (Mark P. Little et al., 2018).

En Chine, Qing Sun et al. (Sun et al., 2018), sur une cohorte prospective de 508 techniciens en radiologie industrielle (rayonnements gamma) suivie entre 2010-2013, mettent en évidence des risques relatifs (RR) respectifs de 2,6 (IC 95% : 1,9 ; 3,8) et de 2,2 (IC 95% : 1,5 ; 3,3) pour des lésions hépatiques (augmentation du niveau du taux d'alanine aminotransférase et aspartate aminotransférase par rapport à la limite supérieure (40 IU/L)) en analyse non ajustée et ajustée.

Dans le domaine des faibles doses de rayonnements reçues par les travailleurs en dessous des 100 mSv, prédomine l'apparition des effets probabilistes dont les cancers tels que nous l'avons vu à travers les études épidémiologiques citées plus haut. Malgré les études épidémiologiques de types cas-témoins, cohorte prospective et rétrospective, et écologiques issues des populations exposées professionnellement ou lors des accidents radiologiques et nucléaires, les courants de pensées actuels suggèrent la nécessité de poursuivre des recherches sur les effets stochastiques.

Il est possible que dans un contexte d'absence de suivi dosimétrique sur plusieurs décennies, les travailleurs du Bénin aient été exposés à des doses élevées, de manière itérative et, développent des affections radio-induites.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous atteler à faire un état des lieux des affections que l'on pourrait rencontrer chez les travailleurs de la radiologie au Bénin et le lien potentiel entre ces affections et l'exposition aux rayonnements ionisants.

3 ETUDE DE LA MORBIDITE CHEZ LES TRAVAILLEURS EXPOSES LORS D'ACTES DE RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE A TRAVERS UNE COHORTE RETROSPECTIVE AU BENIN DE 1972 A 2019

Ce travail a été soumis et sous révision en tant qu'article original dans la revue "International Archives of Occupational and Environmental Health" <https://www.editorialmanager.com/iaoe/default1.aspx>

3.1 INTRODUCTION

De manière générale, il y a plus de 2,3 millions de travailleurs sous rayonnement médical, et pendant la moitié de leur temps de travail, ils sont exposés à des sources artificielles de rayonnements à faibles doses (Wang et al. 2015; Yoshinaga et al. 2004). Les radiologues et les radiothérapeutes ont été parmi les premiers groupes professionnels à être exposés à des rayonnements externes, selon Berrington (Berrington et al. 2001). Ces rayonnements externes sont à l'origine de certains effets sur la santé. Les effets sur la santé des doses de rayonnements aigües (modérées et élevées) sont bien caractérisés (Laurier et al. 2017; Lee et al. 2021) et détaillés dans la base de données des survivants de la bombe atomique japonaise et pour les patients traités par radiothérapie (Allodji et al. 2019; Boice et al. 2019; Journy et al. 2019; Little et al. 2018). Mais selon une étude réalisée par Azizova et al. (Azizova et al. 2018), les estimations des risques restent encore non élucidées pour une exposition prolongée à de faibles doses et faibles débits de dose, pour le personnel médical. De plus, des débats continuent d'être menés quant à l'estimation des risques d'événements de santé associés à une exposition prolongée à de faibles doses ou faibles débits de dose de rayonnements auxquels les travailleurs sont habituellement exposés. (Fournier et al. 2016). En radiologie, la santé et la sécurité au travail sont un enjeu important en raison du très grand nombre de travailleurs exposés (Akyurt 2021). Peu d'études sur les risques de maladies humaines non cancéreuses induites par de faibles doses de rayonnements, avaient été résumées par l'UNSCEAR (United Nations et al. 2008) et d'autres auteurs (Charles 2001; Shimizu et al. 1992). Les quelques-unes rencontrées

dans la littérature ont montré une association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et les événements de santé tels que la cataracte (Picanon et al. 2012), les opacités du cristallin (Ainsbury et al. 2021).

En Afrique, il existe un nombre limité d'études épidémiologiques sur l'effet des rayonnements ionisants chez le personnel médical. Maalej (2007) en Tunisie, a mené des études qui ont montré des effets tardifs radio-induits, comme le carcinome épidermoïde, en relation avec des expositions aux rayonnements ionisants (Maalej et al. 2007). Au Bénin, le seul article retrouvé est celui de Dossou et al. (2014) qui a conclu à l'augmentation de différentes formes d'aberrations chromosomiques chez les techniciens en radiologie médicale (Dossou et al. 2014). Par conséquent, les effets à long terme des rayonnements ionisants chez le personnel médical au Bénin ne sont pas encore pleinement explorés.

La présente étude visait donc à évaluer la morbidité à long terme chez les travailleurs médicaux en radiologie au Bénin.

3.2 MATERIELS ET METHODE

3.2.1 Collecte des données, population et variable d'exposition

La population d'étude issue des centres privés et publics comprenait 335 travailleurs médicaux en radiologie, exposés aux rayonnements X et un groupe de 193 travailleurs médicaux non exposés, employés dans le même centre, qui ont travaillé au Bénin entre 1972 et 2019 (47 ans) et sont nés entre 1937 et 1997.

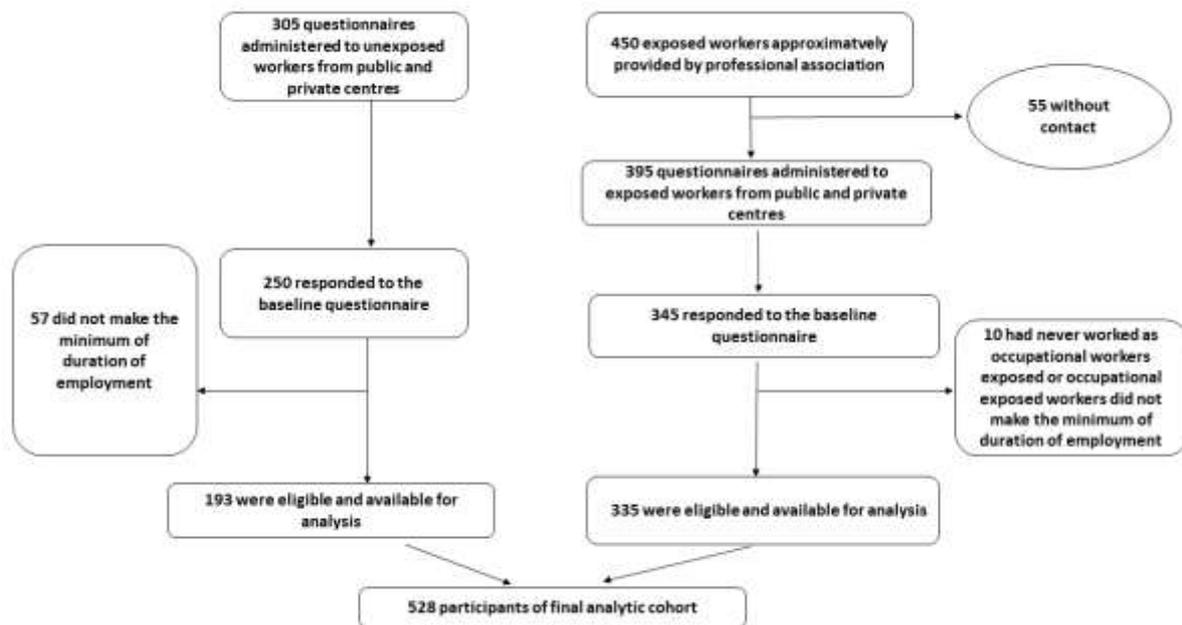


Figure 12 : Diagramme du processus de sélection (flow chart) des sujets, pour l'étude des évènements de santé chez les travailleurs du secteur médical au Bénin, 1972-2019

La présente étude de cohorte rétrospective était basée sur des questionnaires autoadministrés et nécessitait un contact avec les membres de la cohorte. Une liste de contact avait été obtenue des associations professionnelles (radiologues, techniciens en radiologie...) pour les travailleurs exposés. Mais, pour les travailleurs non exposés, des questionnaires ont été soumis à ceux qui étaient présents au moment de l'enquête. L'enquête a été menée en 2019 et avait recueilli des taux de réponse de 81,96 % (250/305) et 87,34 % (345/395) sur 305 et 395 questionnaires destinés aux travailleurs non exposés et exposés, respectivement (Figure 12). Le questionnaire 1 (Annexe 1) comprenait différentes informations sur : (i) les caractéristiques sociodémographiques ; (ii) le nombre d'enfants ; (iii) historique de la reproduction (iv) les antécédents médicaux, les cancers et les maladies non cancéreuses ; (v) antécédents de tabagisme et de consommation d'alcool ; (vi) carrière professionnelle (en années) ; (vii) historique des congés au cours d'une carrière (Annexe 1). Les questions relatives à la morbidité étaient posées sur la base des affections reportées par la littérature (Berrington de González et

al., 2016; Iakovleva, 1978; Nefzger et al., 1969; Parikh et al., 2017, 2017; Rajaraman et al., 2016; Sun et al., 2018; Yoshinaga et al., 2004) et ont été validées par un médecin du travail béninois. Trois enquêteurs ont été sélectionnés pour la collecte des données. Les questionnaires ont été élaborés pour unifier et faciliter le recueil des données.

L'étude de cohorte rétrospective sur des professionnels de santé a été menée dans les 12 départements du Bénin (Atacora, Donga, Borgou, Alibori, Zou, Collines, Mono, Couffo, Ouémé, Plateau, Atlantique, Littoral) ou 6 selon l'ancien découpage (2015) (Atacora-Donga, Borgou-Alibori, Zou-Collines, Mono-Couffo, Ouémé-Plateau, Atlantique-Littoral), sur l'ensemble du territoire national. Elle est composée de radiologues, techniciens en radiologie et assistants médicaux en radiodiagnostic pour les travailleurs exposés et de médecins, d'assistants médicaux dans d'autres services et employés administratifs pour les travailleurs non exposés. Des consultations téléphoniques ont été réalisées auprès des personnels soignants ayant quitté le territoire national au moment de l'enquête. La durée minimale d'emploi à inclure dans l'étude était d'un (01) an (Sun et al. 2018). Pour être un cas de maladie éligible, la maladie devrait s'être déclarée après le premier emploi en tant que travailleur exposé professionnellement ou travailleur non exposé professionnellement. La cohorte d'étude a sollicité tous les travailleurs vivants exposés professionnellement des services d'imagerie médicale du Bénin. Au total, 10 travailleurs exposés professionnellement et 57 travailleurs non exposés professionnellement ont été exclus car les travailleurs exposés professionnellement n'avaient pas effectué la durée minimale d'emploi qui était d'un an (Figure 12). La cohorte d'analyse finale était composée de 528 participants dont 335 travailleurs exposés professionnellement et 193 travailleurs non exposés professionnellement.

Le suivi rétrospectif de la cohorte a commencé par une date de premier emploi dans l'établissement et s'est poursuivi jusqu'aux dates d'enquête.

3.2.2 Les variables dépendantes d'intérêt et facteur de confusion

Les variables dépendantes d'intérêt (maladies des yeux et autres affections du tissu adipeux sous-cutané) ont été extraites des jeux de données car elles représentaient les événements de santé ayant les proportions les plus élevées (53,8 % pour les maladies des yeux) et (13,9 % pour les masses sous-cutanées) parmi l'ensemble des événements de santé recensés au sein de la cohorte (Annexe 2a et 2b). De plus, de nombreux travaux ont été publiés sur la survenue de complications oculaires après exposition aux rayonnements ionisants. Toutes les maladies des yeux et les masses sous-cutanées ont été rétrospectivement codées selon la classification internationale des maladies (10^{ème} révision, version 2019) (CIM-10) (Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation, 2019). Les maladies des yeux comprenaient les affections telles que la cataracte, le glaucome et les troubles de la vision codées respectivement (H26.9), (H40.9) et (H53.9). Les masses sous-cutanées étaient codées R22.9 comme tuméfaction et masse localisées.

Plusieurs facteurs ont été considérés comme des facteurs de confusion potentiels qui ont été définis et inclus dans le questionnaire 1 (Annexe 1). L'âge à la première année d'emploi a été classé en trois classes, moins de 25 ans, 26-30 ans et 31 ans et plus, compte tenu de l'intervalle interquartile. Le tabagisme (oui/non) et le statut de consommation d'alcool (aucun, modéré, élevé) ont été collectés en raison des preuves antérieures d'associations avec différentes maladies. La durée d'exposition professionnelle (année) n'était pas la même pour tous les travailleurs et pouvait être associée à des effets sanitaires radio-induits. Les catégories d'exposition professionnelle étaient basées sur l'intervalle interquartile du temps réel passé au travail. Le fait d'avoir des vacances pendant la carrière (oui/non) a été retenu car la réduction du temps de travail au poste peut réduire les niveaux d'exposition individuelle. Les différentes questions liées aux facteurs de confusion ont été développées en annexe 1.

3.2.3 Consideration éthique

L'étude a été examinée et approuvée par le Comité d'éthique de la recherche de l'Institut des Sciences Biomédicales Appliquées (CER-ISBA) au Bénin. Le consentement éclairé des travailleurs exposés ou des travailleurs non exposés professionnellement a été demandé et obtenu avant la soumission des questionnaires.

Les répondants ont reçu des informations sur l'étude et ont été assurés de la confidentialité des données. Ils ont été informés de leur droit de se retirer de l'étude à tout moment.

3.2.4 Analyse statistique

Les informations ont été saisies dans Epiinfo version 3.5.4. Les données recueillies ont été analysées à l'aide de SAS® version 9.4. La fréquence et le pourcentage ont été utilisés pour résumer les données sociodémographiques pour les statistiques descriptives du groupe exposé ou non exposé. Des tests de Chi2 ont été effectués pour comparer les différences entre chaque groupe. Des tests bilatéraux ont été réalisés et une valeur $P \leq 0,05$ était considérée comme statistiquement significative.

Nous avons également estimé l'incidence cumulée des morbidités sélectionnées (les maladies des yeux et masse sous-cutanée) en utilisant le 'suivi' comme échelle de temps et avons présenté le rapport de risque instantané (HR : *Hazard Ratio* en anglais) et les intervalles de confiance (IC) à 95% calculés à partir du modèle de Cox brut et multivarié.

Le rapport de risque instantané est sous forme d'une fonction de risque instantané qui traduit le risque d'apparition d'un événement sur un intervalle de temps « t » très petit, en supposant que cet événement n'était pas apparu auparavant.

Cette fonction de risque instantané se présente comme suit (D. R. Cox, 1972) :

$$h(t, z) = \exp(\beta z) h_0(t)$$

Où β est un paramètre de régression ;

Z est la variable ;

t est le temps ;

$h_0(t)$ est la fonction de risque de référence.

C'est un modèle semi-paramétrique basé sur l'hypothèse des risques proportionnels.

La vraisemblance partielle a été utilisée pour obtenir des estimations de paramètres pour la régression de Cox. Le modèle multivarié avec un critère d'informations d'Akaike (AIC) le plus faible a été préféré pour le choix du modèle. Le modèle multivarié final a été obtenu avec ajustement sur l'année du premier d'emploi ; l'âge à la première année d'emploi, le sexe et la consommation d'alcool en utilisant l'AIC.

3.3 RESULTATS

3.3.1 Description de la population d'étude

Les caractéristiques des travailleurs selon le statut d'exposition sont décrites dans le tableau 7. L'âge moyen à la première année d'emploi des travailleurs exposés était de 26 ans (min ; max, 21 ; 46 ans) (Tableau 7), et 59,7 % étaient des femmes. Chez les travailleurs non exposés, l'âge moyen à la première année d'emploi était de 28 ans (min ; max, 19 à 46 ans) (Tableau 7) et 53,9 % était des femmes. De même, aussi bien dans le groupe des exposés que des non exposés, la majorité des sujets ne fumait pas (98,5 % pour les exposés et 99,5 % pour les non exposés) et ne buvait pas (65,1 % pour les exposés et 73,6 % pour les non exposés) (Tableau 7).

Tableau 7 : Caractéristiques de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Variables	Exposé n (%)	Non exposé n (%)	P-values [¶]
Statut d'exposition (exposé/non exposé)	335 (100.0)	193 (100.0)	-
Sexe			
Masculin	135 (40.3)	89 (46.1)	0.19
Féminin	200 (59.7)	104 (53.9)	
Age à la première année d'emploi (année)			
≤ 25	233 (69.6)	75 (38.9)	<.0001
26-30	54 (16.1)	53 (27.5)	
≥ 31	48 (14.3)	65 (33.7)	
Age au moment de l'enquête (année)			
≤ 30	129 (38.51)	35 (18.13)	<.0001
31-41	131 (39.10)	112 (58.03)	
≥ 42	75 (22.39)	46 (23.83)	
Fumeur			
Non	330 (98.5)	192 (99.5)	0.42
Oui	5 (1.5)	1 (0.5)	
Consommation d'alcool			
Rien	218 (65.1)	142 (73.6)	0.06
Modérée	109 (32.5)	50 (25.9)	
Élevée	8 (2.4)	1 (0.5)	
Nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année)			
≤ 1	119 (35.5)	72 (37.3)	0.10
2-6	127 (37.9)	85 (44.0)	
≥ 7	89 (26.6)	36 (18.7)	
Avoir un congé durant la carrière			
Non	161 (48.1)	104 (53.9)	0.21
Oui	174 (51.9)	89 (46.1)	
Année calendaire au premier emploi (année)			
≤ 2007	99 (29.6)	47 (24.4)	0.44
2008 – 2016	157 (46.9)	97 (50.2)	
≥ 2017	79 (23.6)	49 (25.4)	
	Moyenne (min ; max)	Moyenne (min ; max)	P-values^{&}
Moyenne de l'âge à la première année d'emploi (année)	26 (21 ; 46)	28 (19 ; 46)	<.0001
Masculin	25 (21 ; 41)	27 (19 ; 46)	<.0001
Féminin	26 (21 ; 46)	29 (19 ; 44)	<.0001
Moyenne d'année de travail comme travailleur exposé ou travailleur non exposé (année)	5.2 (1 ; 30)	4.2 (1 ; 22)	0.03
Moyenne des années calendaires au premier emploi (année)	2009 (1972 ; 2018)	2011 (1972 ; 2019)	0.22

[¶]Tests de Chi-2. & Tests de Spearman.

L'âge à la première année d'emploi ($P < 0,0001$) et l'âge au moment de l'enquête ($P < 0,0001$) étaient significativement différents entre les travailleurs exposés et non exposés. Aussi bien dans le groupe exposé que dans le groupe non exposé, il n'y avait pas de différence significative sur le temps de travail au poste ($P = 0,10$) dans tous les centres, la première année d'emploi ($P = 0,44$) et les vacances pendant une carrière ($P = 0,21$) (Tableau 7). Une différence statistiquement significative de la répartition des travailleurs dans les différents départements du Bénin était constatée entre les exposés et les non exposés ($P = 0,02$) (Annexe 3).

3.3.2 Description des évènements de santé dans la cohorte

Sur la base du questionnaire 1 (Annexe 1) sur la santé des travailleurs, 186 évènements de santé ont été déclarés par 113 (21,4%) travailleurs (Annexe 2a). Les affections prédominantes étaient les complications oculaires (100/186) et la masse sous-cutanée (26/186) (Annexe 2a).

Tableau 8 : Caractéristiques de survie et résumé des maladies les plus représentatives développées par les groupes exposés ($n=335$) et non exposés ($n=193$) de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Maladies	Exposés n (%)	Non exposés n (%)	P-values [¶]	Suivi médian (IQR) années
Maladies des yeux (CIM-10)				6 (2 ; 11)
Non	272 (81.2)	172 (89.1)	0.02	
Oui	63 (18.8)	21 (10.9)		
Masse sous-cutanée				6 (3 ; 12)
Non	312 (93.1)	190 (98.5)	0.01	
Oui	23 (6.9)	3 (1.5)		

[¶] Tests de Chi-2 ; masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10^{ème} révision (CIM-10, 2019)

La proportion des maladies des yeux ($P = 0,02$) et la masse sous-cutanée ($P = 0,01$) étaient significativement différentes entre les travailleurs exposés et non exposés (Tableau 8). Quatre cas de cataracte ont été signalés parmi les complications oculaires (Annexe 2b). Les maladies des yeux étaient le sous-groupe qui regroupait un grand nombre de complications oculaires (63 contre 12 pour les exposés et 21 contre 4 pour les non exposés) (Annexe 2b). Les évènements de santé apparaissaient à un âge moyen de 36,7 ans pour les maladies des yeux et 36,4 ans pour

les masses sous-cutanées.

Tableau 9 : Maladies des yeux et masses sous-cutanées de la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Variables	Cohorte entière	Événements de santé retenus	
		Maladies des yeux	Masse sous-cutanée
Général	528	84	26
Age atteint (année) (moyenne, min ; max)	-	36.7 (22 ; 66)	36,4 (25 ; 57)
Suivi médian (année) (médiane, IQR)	-	8 (2 ; 13)	8,5 (4 ; 12)
	n (%)	n (%)	n (%)
Sexe			
Masculin	224 (42.4)	33 (39.3)	5 (19.2)
Féminin	304 (57.6)	51 (60.7)	21 (80.8)
Age à la première année d'emploi (année)			
≤ 25	308 (58.3)	42 (50)	15 (57.7)
26-30	107 (20.3)	19 (22.6)	3 (11.5)
≥ 31	113 (21.4)	23 (27.4)	8 (30.8)
Fumeur			
Non	522 (98.9)	82 (97.6)	24 (92.3)
Oui	6 (1.1)	2 (2.4)	2 (7.7)
Consommation d'alcool			
Rien	360 (68.2)	47 (55.9)	11 (42.3)
Modérée	159 (30.1)	33 (39.3)	11 (42.3)
Élevée	9 (1.7)	4 (4.8)	4 (15.4)
Nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année)			
≤ 1	191 (36.2)	27 (32.1)	3 (11.5)
2-6	212 (40.2)	26 (31)	10 (38.5)
≥ 7	125 (23.7)	31 (36.9)	13 (50)
Avoir un congé durant la carrière			
No	265 (50.2)	35 (41.7)	10 (38.5)
Yes	263 (49.8)	49 (58.3)	16 (61.5)
Période d'année calendaire au premier emploi (année)			
≤ 2007	146 (27.7)	46 (54.7)	17 (65.4)
2008 – 2016	254 (48.1)	29 (34.5)	8 (30.8)
≥ 2017	128 (24.2)	9 (10.7)	1 (3.8)

% = n/general; masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10^{ème} révision (CIM-10, 2019);

Maladies des yeux = cataracte, glaucome et troubles de la vision codées respectivement H26.9, H40.9 et H53.9 selon la CIM-10, 2019.

Au total, 84 et 26 cas de maladies des yeux et masses sous-cutanées (Tableau 9) ont été identifiés sur un suivi médian de six (06) ans avec un intervalle interquartile de (IQR) 2 ; 11 et IQR, 3 ; 12, respectivement (Tableau 8). Le suivi médian chez les cas uniquement était de huit

(08) ans [(IQR) 2 ; 13] et huit ans et demi (8,5) [(IQR) 4 ; 12] pour les maladies des yeux et les masses sous cutanées respectivement.

3.3.3 Incidence cumulative et facteurs de risque pour les maladies des yeux

Les incidences cumulées des maladies des yeux dans l'ensemble de la cohorte et par changement du statut d'exposition ont été présentées respectivement sur les figures 13 et 14.

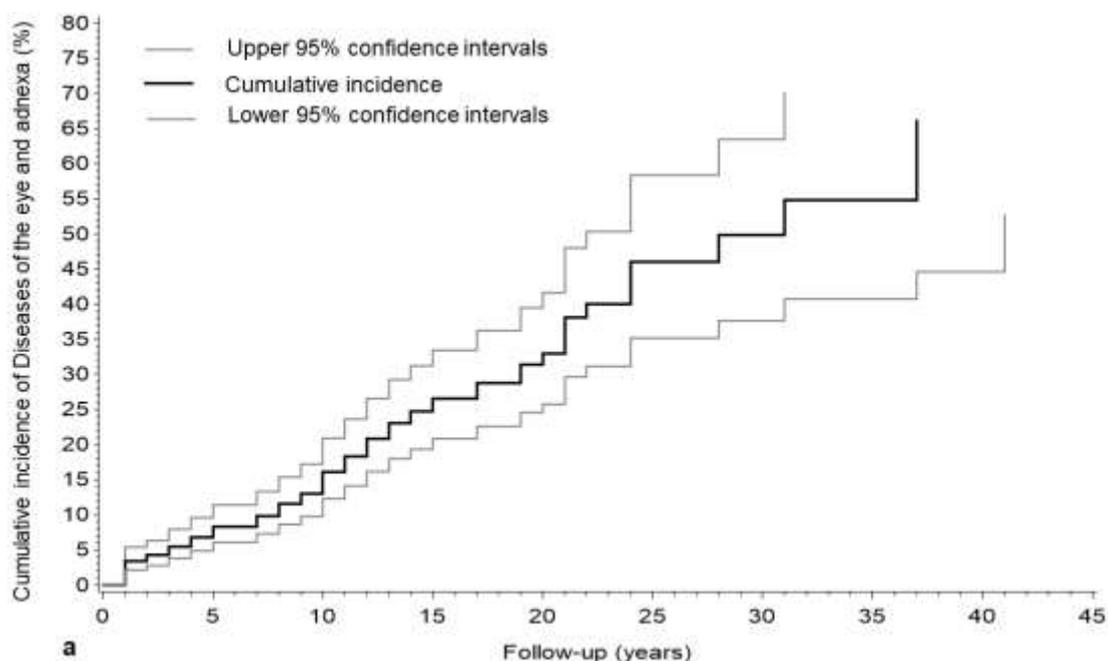


Figure 13 : Courbe d'incidence cumulée de maladies des yeux (a) dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019

L'incidence cumulée globale à 7 ans de suivi après la première année d'emploi était de 9,9 % (IC 95% : 7,3 ; 13,3) (Figure 13) et les travailleurs exposés avaient un risque plus élevé de développer des maladies des yeux à 7 ans de suivi après la première année d'emploi, l'incidence cumulée était de 12,2 % (IC 95% : 8,7 ; 16,9) tandis que pour les travailleurs non exposés, elle était de 5,9 % (IC 95% : 3,0 ; 11,4) (Figure 14).

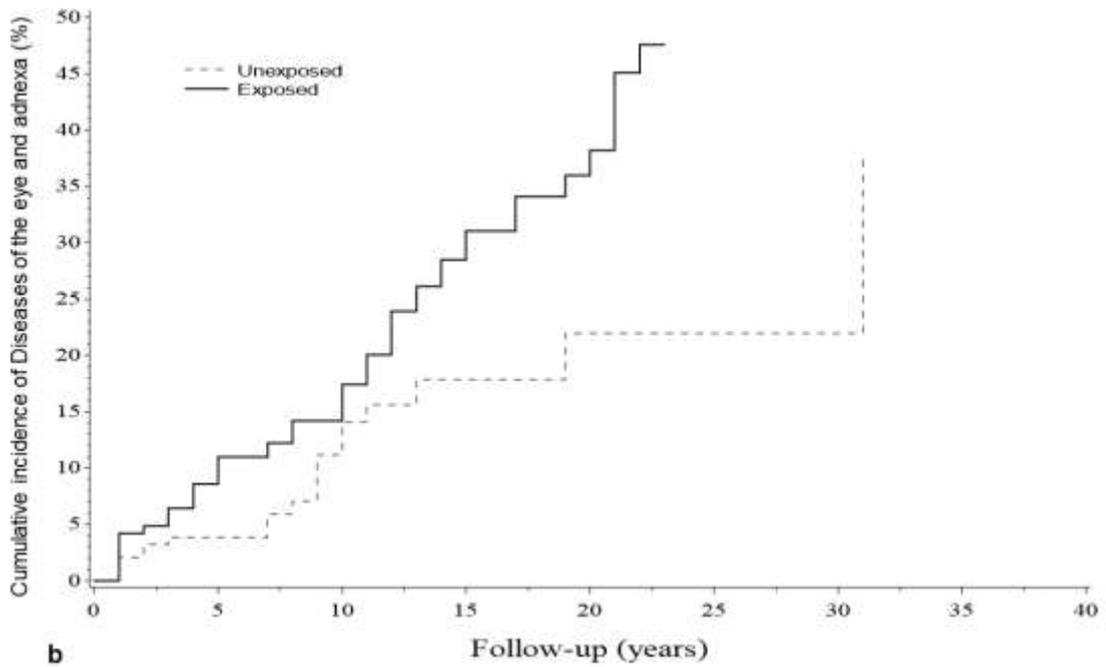


Figure 14 : Courbes d'incidence cumulée de maladies des yeux (b), stratifiées par statut d'exposition dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019

Les Rapports de Risques Instantanés (HR) non ajustés et ajustés et les intervalles de confiance (IC) à 95% des maladies des yeux sont présentés respectivement sur les figures 15 et 16.

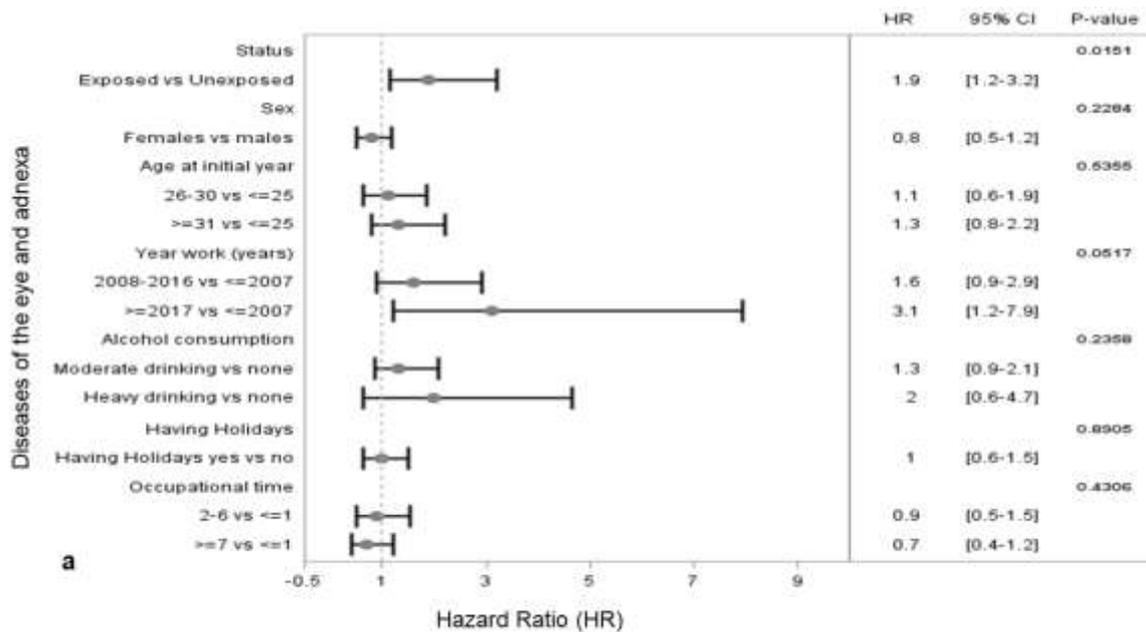


Figure 15 : Rapports de Risque Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des maladies des yeux en analyse univariée (a) d'évènements

Maladies des yeux = cataracte, glaucome et troubles de la vision codées respectivement H26.9, H40.9 et H53.9 selon la CIM-10, 2019.

Statut (status) statut d'exposition aux rayonnements X, exposé (exposed) non exposé (unexposed) ; Sexe des participants (Sex) masculin (males) féminin (females) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [26-30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [\geq 30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [2008-2016] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [\geq 2017] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Consommation d'alcool (Alcohol consumption) aucune consommation (none) consommation modérée (moderate drinking) consommation élevée (heavy drinking) ; Avoir un congé durant la carrière (Having Holidays) oui ou non ; Temps de travail au poste (Occupational time) [2-6] nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année) ; Temps de travail au poste (Occupational time) [\geq 7] nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année).

Rapports de Risques Instantanés (HR) étaient estimés d'un simple modèle de régression de Cox.

Sur le modèle univarié, nous avons constaté que les travailleurs exposés avaient un risque significatif de maladies des yeux (HR = 1,9 [IC 95% : 1,2 ; 3,2]) par rapport aux travailleurs non exposés. Par rapport aux travailleurs qui ont commencé à travailler avant 2007, les travailleurs qui avaient commencé à travailler à partir de 2017 (HR = 3,1 [IC 95% : 1,2 ; 7,9]) avaient un risque élevé de maladies des yeux. Ce résultat a été confirmé par l'analyse stratifiée sur le statut d'exposition au sein du groupe des travailleurs exposés dont l'âge atteint au moment de la déclaration de maladies des yeux était inférieur ou égale à 28 ans (Annexe 4). L'analyse stratifiée sur le regroupement des travailleurs par département et uniquement chez les travailleurs exposés a révélé un risque de survenue de maladies des yeux qui était significativement augmenté pour les travailleurs des départements de l'Ouémé-plateau (HR = 3,1 [IC 95% : 1,3 ; 8,9]) et de l'Atlantique-littoral (HR = 3,4 [IC 95% : 1,5 ; 9,3]) (Annexe 5).

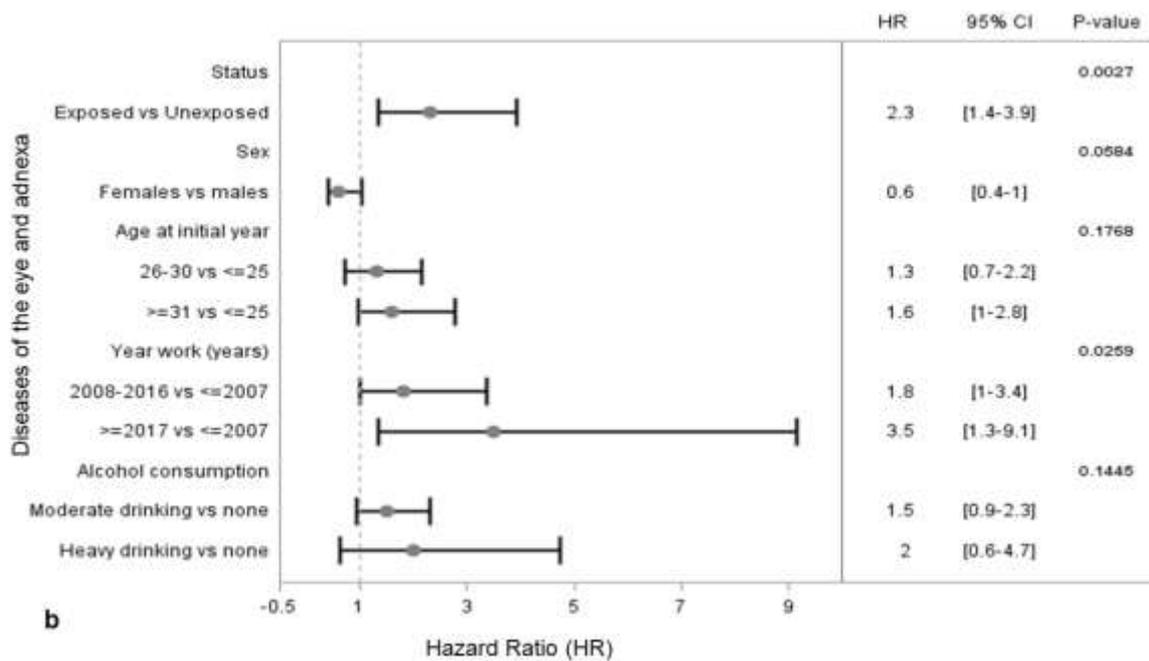


Figure 16 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des maladies des yeux en analyse multivariée (b) d'évènements

Maladies des yeux = cataracte, glaucome et troubles de la vision codées respectivement H26.9, H40.9 et H53.9 selon la CIM-10, 2019.

Statut (status) statut d'exposition aux rayonnements X, exposé (exposed) non exposé (unexposed) ; Sexe des participants (Sex) masculin (males) féminin (females) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [26-30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [\geq 30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [2008-2016] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [\geq 2017] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Consommation d'alcool (Alcohol consumption) aucune consommation (none) consommation modérée (moderate drinking) consommation élevée (heavy drinking).

(figure 14) ajusté sur sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool, période d'année calendaire au premier emploi (année), département (répartition des travailleurs dans les centres) ; Temps de suivi (Entrée = date de premier emploi au poste de travail, Sortie = date d'évènements) pour les évènements et (Entrée = date de premier emploi au poste de travail, Sortie = date de point) pour les non évènements;

L'hypothèse de risque proportionnel est vérifiée pour sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool.

Après ajustement sur le sexe, l'âge à la première année d'emploi, la consommation d'alcool, l'année du premier emploi, les départements du Bénin (localisation des centres d'imagerie médicale au Bénin) les risques de survenue de maladies des yeux étaient significativement augmentés pour les travailleurs exposés (HR = 2,3 [IC 95% : 1,4 ; 3,9]) et pour les travailleurs

ayant commencé à travailler après 2017 (HR = 3,5 [IC 95% : 1,3 ; 9,1]). Alors qu'une réduction du risque de maladies des yeux était à la limite de la significativité pour le sexe (P = 0,058). Etant donné que selon la littérature l'âge est associé à la survenue des maladies des yeux (Chodick et al. 2008), des analyses de sensibilité ont été réalisées pour l'étude de la survenue des maladies des yeux en prenant comme échelle de temps la variable 'âge atteint'. Le rapport de risque instantané (HR) ajusté variait très peu avec un HR = 2,5 (IC 95% : 1,5 ; 4,3) (Annexe 6) contre 2,3 [IC 95% : 1,4 ; 3,9]) (Figure 16) précédemment estimé avec le 'suivi'.

3.3.4 Incidence cumulée et facteur de risque pour les masses sous-cutanées

Les incidences cumulées de la masse sous-cutanée dans l'ensemble de la cohorte et par changement du statut d'exposition ont été présentées respectivement sur les figures 17 et 18.

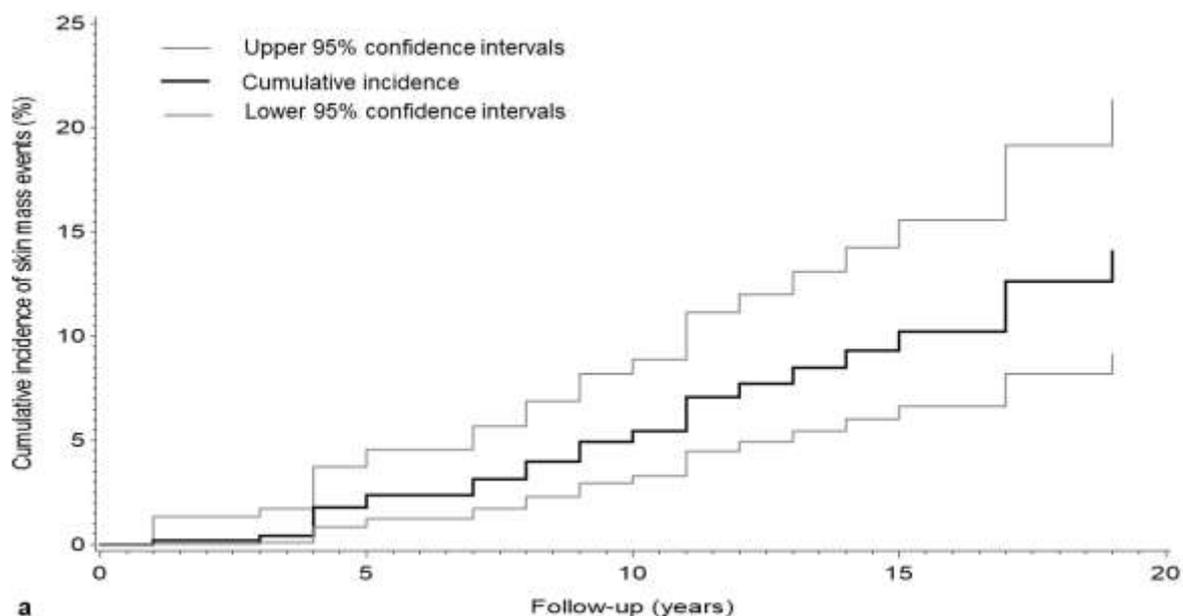


Figure 17 : Courbe d'incidence cumulée (a) de masses sous-cutanées dans la cohorte (exposé et non exposé) entre 1972 et 2019

Masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10ème révision (CIM-10, 2019).

L'incidence cumulée globale à 4 ans de suivi après la première année d'emploi était de 1,8 % (IC 95% : 0,9 ; 3,7) (Figure 17) et les travailleurs exposés présentaient un risque plus élevé de

développer une masse sous-cutanée à 4 ans de suivi après la première année d'emploi, l'incidence cumulée était de 2,1 % (IC 95% : 0,9 ; 5,0) alors que pour les travailleurs non exposés, elle était de 1,2 % (IC 95% : 0,3 ; 5,0) (Figure 18).

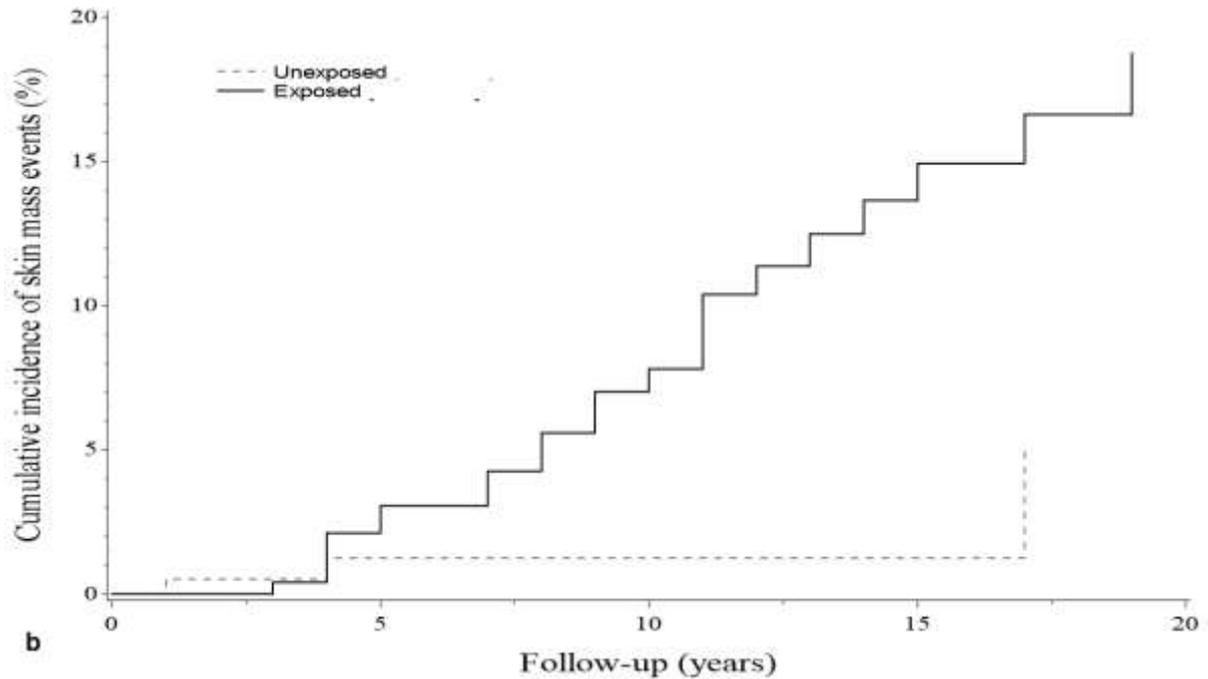


Figure 18 : Courbes d'incidence cumulée (b) de masses sous-cutanées dans la cohorte (exposé et non exposé) stratifiées par statut d'exposition entre 1972 et 2019

Masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10^{ème} révision (CIM-10, 2019).

Les HR non ajustés, ajustés et les IC à 95% de la masse sous-cutanée sont présentés respectivement sur les figures 19 et 20. Sur le modèle univarié, nous avons constaté que les travailleurs exposés avaient un risque significatif de survenue de masse sous-cutanée (HR = 3,8 [IC 95% : 1,4 ; 14,2]) et la forte consommation d'alcool (HR = 8,6 [IC 95% : 2,6 ; 24,4]) augmentent également de manière significative le risque de survenue d'une masse sous-cutanée (Figure 19). L'analyse faite au sein de la cohorte pour les travailleurs dont l'âge atteint au moment de la déclaration des masses sous-cutanées était inférieur ou égale à 28 ans (Annexe 4).

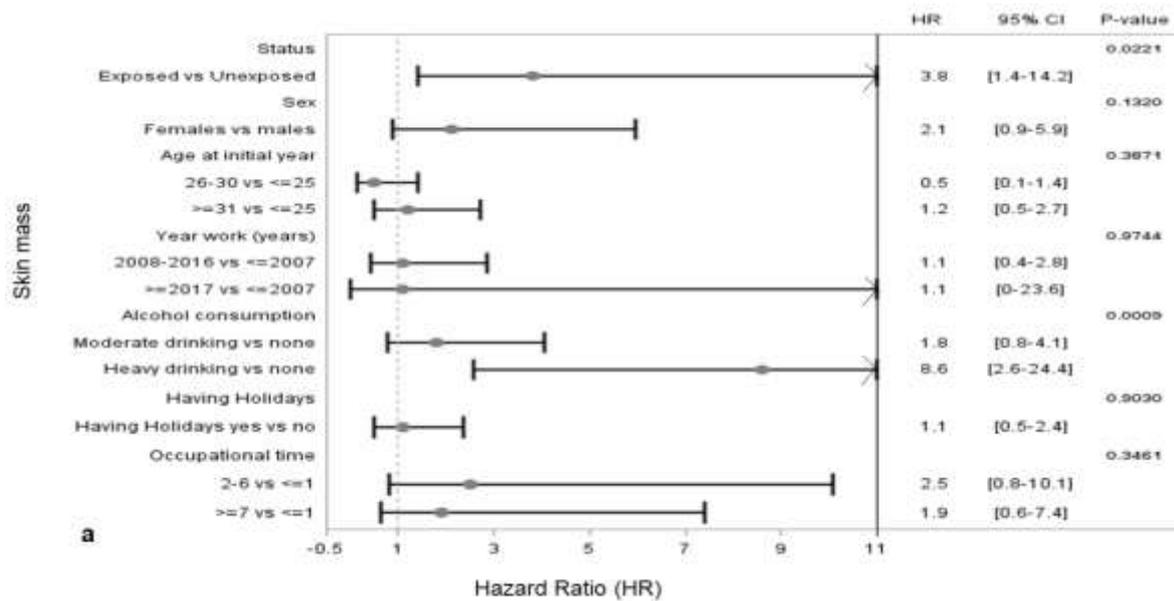


Figure 19 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des masses sous-cutanées en analyse univariée (a) d'évènements

Masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10ème révision (CIM-10, 2019).

Statut (status) statut d'exposition aux rayonnements X, exposé (exposed) non exposé (unexposed) ; Sexe des participants (Sex) masculin (males) féminin (females) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [26-30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [\geq 30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [2008-2016] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [\geq 2017] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Consommation d'alcool (Alcohol consumption) aucune consommation (none) consommation modérée (moderate drinking) consommation élevée (heavy drinking) ; Avoir un congé durant la carrière (Having Holidays) oui ou non ; Temps de travail au poste (Occupational time) [2-6] nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année) ; Temps de travail au poste (Occupational time) [\geq 7] nombre de temps passé au poste comme travailleurs exposés ou non exposés (année).

Rapports de Risques Instantanés (HR) étaient estimés d'un simple modèle de régression de Cox.

Après ajustement sur le sexe, l'âge à la première année d'emploi, la consommation d'alcool, l'année du premier emploi, les risques de survenue de masse sous-cutanée étaient significativement augmentés pour les travailleurs exposés (HR = 3,3 [IC 95% : 1,2 ; 12,7]) et pour les travailleurs qui consommaient beaucoup d'alcool (HR = 7,6 [IC 95% : 2,2 ; 22,5]) (Figure 20).

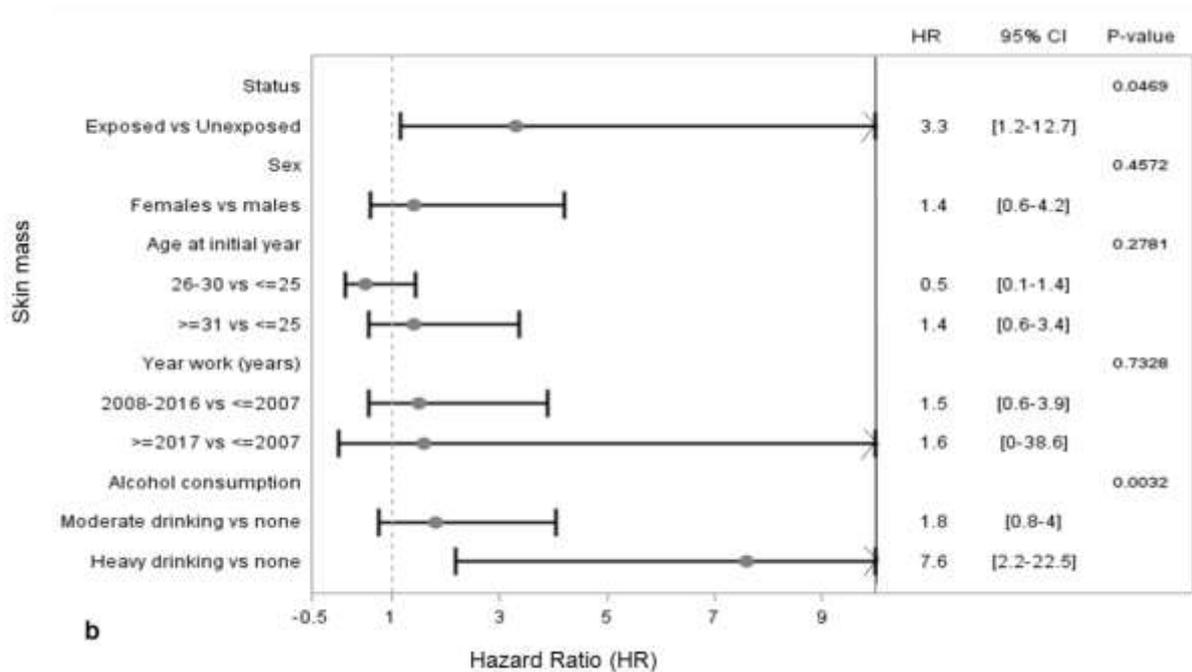


Figure 20 : Rapports de Risques Instantanés (Hazard Ratio abrégé HR en anglais) des masses sous-cutanées en analyse multivariée (b) d'évènements

Masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10ème révision (CIM-10, 2019).

Statut (status) statut d'exposition aux rayonnements X, exposé (exposed) non exposé (unexposed) ; Sexe des participants (Sex) masculin (males) féminin (females) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [26-30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Age à la première année d'emploi (Age at initial year) [\geq 30] classe d'âge à la première année d'emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [2008-2016] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Année d'emploi (Year work) [\geq 2017] période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Consommation d'alcool (Alcohol consumption) aucune consommation (none) consommation modérée (moderate drinking) consommation élevée (heavy drinking).

(figure 18) ajusté sur sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), Consommation d'alcool, période d'année calendaire au premier emploi (année) ; Temps de suivi (Entrée = date de premier emploi au poste de travail, Sortie = date d'évènements) pour les évènements et (Entrée = date de premier emploi au poste de travail, Sortie = date de point) pour les non évènements ;

L'hypothèse de risque proportionnel est vérifiée pour classe d'âge à la première année d'emploi (année), période d'année calendaire au premier emploi (année).

3.4 DISCUSSION

A notre connaissance, il s'agit de la première évaluation du risque de maladies non cancéreuses chez les travailleurs de la radiologie médicale au Bénin. Nos analyses ont montré des associations entre l'exposition aux rayonnements X des travailleurs médicaux en radiologie et les maladies des yeux et la masse sous-cutanée. Dans le même temps, bien que sur peu de sujets, la consommation excessive d'alcool avait un risque accru de survenue de masse sous-cutanée.

3.4.1 Maladie des yeux

Les maladies des yeux (HR = 2,3 [IC 95% : 1,4 ; 3,9]) étaient significativement associées à l'exposition aux rayonnements ionisants (Figure 16). Il a été montré que l'exposition aux rayonnements ionisants peut être nocive pour le cristallin et augmenter le risque à long terme de formation de cataracte (Chodick et al. 2008). Certes, plusieurs autres études ont montré l'association entre la cataracte (Hiller et al. 1986; Picano et al. 2012; Little 2013), les opacités du cristallin (Ainsbury et al. 2021) et l'exposition prolongée aux rayonnements ionisants. Par ailleurs, des études épidémiologiques, il y a de nombreuses années, ont établi un lien entre l'exposition au soleil (rayonnements ultraviolets) et le développement de la cataracte (Wright and Norval, 2021). Bien qu'il existe plusieurs autres affections oculaires dans ce résultat non décrites par la littérature et reconnues comme radio-induites, bon nombre d'entre elles pourraient être liées à une opacification du cristallin et qui pourraient impliquer une cataracte dans ses stades avancés.

Les travailleurs qui ont commencé à travailler après 2017 (HR = 3,5 [IC 95% : 1,3 ; 9,2]), ont un risque significativement plus élevé de maladies des yeux. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les travailleurs jeunes réalisaient plus d'exams que les travailleurs à âges avancés, qui généralement sont affectés aux travaux administratifs dans les centres. La période de latence médiane de huit (08) ans (Tableau 9) montrée dans notre étude n'était pas totalement similaire

à celles rapportées par la littérature. Selon Chodick (Chodick et al. 2008), la période de latence pour la formation de la cataracte est probablement plus longue pour des doses plus faibles et peut atteindre 30 à 45 ans (Wilde and Sjostrand, 1997). Certains auteurs concluent que, parmi les survivants de la bombe atomique exposés à un Gray (forte dose) ou plus, des cataractes radio-induites sont apparues avec une période de latence moyenne approximative pour le développement des opacités du cristallin de 2 à 3 ans (Choshi et al. 1983), selon la dose à l'œil (Chodick et al. 2008). De plus, l'irradiation à haut débit de dose était associée à une courte latence (Ainsbury et al. 2021). Cela suggère que la période relativement élevée de latence constatée dans cette étude pourrait bien être liée à des expositions de faibles doses des travailleurs.

3.4.2 Masses sous-cutanées

L'exposition aux rayonnements ionisants et la consommation d'alcool étaient les principaux facteurs de risque significativement associés à la masse sous-cutanée, à travers cette étude. Selon la masse décrite par les participants, la masse sous-cutanée était une tumeur molle, mobile et indolore. L'association de la masse sous-cutanée avec l'exposition aux rayonnements a été rarement rapportée dans la littérature. Le risque d'avoir une masse sous-cutanée pour les travailleurs exposés était élevé même après ajustement (HR = 3,3 [IC 95% : 1,2 ; 12,7]) et statistiquement significatif (Figure 20). L'apparition de ces masses sous-cutanées était liée également au jeune âge (inférieure ou égale à 28 ans) de ces travailleurs exposés (Annexe 4). La rareté des études de cohorte capables d'établir les liens entre l'exposition aux rayonnements et la masse sous-cutanée a été un frein à la discussion. La masse sous-cutanée décrite par les participants était probablement bénigne comme un lipome. La lipomatose est une affection caractérisée par l'accumulation de tissu adipeux, formant des masses tumorales bénignes ou lipomes (masse sous-cutanée). Les tumeurs dérivées des adipocytes sont couramment observées à divers âges et emplacements sous la peau (Mashima et al. 2021). Le lipome est couramment

observé dans les diagnostics cliniques ordinaires (Mashima et al. 2021). Les causes cliniques de la lipomatose sont à peine comprises. Mais l'étude menée par Iakovleva (1978) lors des examens post-mortem sur 22 chiens a montré des masses suspectes (7 néoformations malignes et 12 bénignes) chez 13 animaux, après avoir été exposés à des rayonnements ionisants (Iakovleva 1978).

Une forte consommation d'alcool (HR = 7,6 [IC 95% : 2,2 ; 22,5]) était significativement associée à un facteur de risque plus élevé d'avoir une masse sous-cutanée (Figure 20). Ces résultats étaient attendus, car Sumi et al. (2019) ont rapporté dans leur étude qu'une consommation hebdomadaire d'alcool plus élevée était fortement et significativement associée à une épaisseur de masse sous-cutanée plus élevée (Sumi et al., 2019). De plus, Hirose et al. (2006) ont rapporté un cas de lipomatose symétrique bénigne (Hirose et al., 2006). Ils ont conclu que la pertinence de l'alcool dans la survenue de la lipomatose symétrique bénigne est fortement suggérée sur la base de l'hépatopathie alcoolique et de l'histoire du développement d'une apparence physique grotesque associée à une consommation accrue d'alcool (Hirose et al., 2006). A l'opposé, selon Kim et al. (2012), la consommation d'alcool est associée à une diminution de la masse sous-cutanée et à une augmentation de l'accumulation de tissu adipeux viscéral (Kim et al., 2012). De même, l'étude de Framingham Heart a révélé que chez les femmes, une consommation d'alcool plus élevée était associée à un volume de masse sous-cutanée abdominale inférieure (Molenaar et al., 2009).

3.4.3 Forces et limites

Cette étude a été l'une des plus importantes entreprises à ce jour sur la morbidité chez les travailleurs en imagerie médicale au Bénin. L'une des forces de l'étude est qu'elle a porté sur la quasi-totalité des travailleurs des centres d'imagerie médicale du pays, ce qui réduit la possibilité de biais de sélection. Ce travail a été fait dans un contexte assez particulier où depuis 1993,

il n'y a plus de suivi dosimétrique au Bénin. Malheureusement, aucune étude épidémiologique n'a pu être réalisée avant 1993 alors qu'un suivi dosimétrique postcolonial était disponible.

Néanmoins, certaines limites de l'étude doivent être considérées. Les cas d'incidence des événements de santé ont été identifiés à partir des questionnaires autoadministrés sans confirmation clinique. Nous avons constitué trois groupes pour la fréquence de consommation d'alcool (aucune, modérée et élevée) et n'avons pas obtenu d'informations sur le volume de consommation d'alcool. Les facteurs de confusion potentiels tels que le régime alimentaire, le niveau d'activité physique et d'exposition aux rayonnements ultraviolets (UV) solaires, et les antécédents familiaux, aussi bien pour les maladies des yeux que pour la survenue des masses sous-cutanées, n'ont pas été collectés. Leur absence pourrait contribuer à une sous-estimation ou à une surestimation des différentes associations trouvées. La différence était statistiquement non significative entre les deux groupes (exposés et non exposés) pour les variables sexe et consommation d'alcool. Ainsi, nous pensons que le biais pourrait être minime.

3.5 CONCLUSION

Cette première étude menée auprès des personnels médicaux en radiologie au Bénin, confirme les résultats connus selon lesquels l'exposition aux rayonnements ionisants est un facteur de risque des maladies des yeux et apporte de nouvelles informations, en fournissant des estimations de risque de survenue de masses sous-cutanées, probablement des tumeurs bénignes qu'il ne faut pas négliger. Il fournira une base pour d'autres études sur le lien entre les rayonnements X à faible dose mesurée et la masse sous-cutanée et les maladies des yeux.

Ces résultats sont importants pour la santé publique et la surveillance dosimétrique dans le cadre de la prévention des maladies professionnelles radio-induites.

4 ÉVALUATION EXPERIMENTALE DE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS X SUR LES LIEUX DE TRAVAIL DANS LES CENTRES DE RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE AU BENIN EN 2019

*Ce travail a été présenté en affiche aux congrès de l' Association internationale de radioprotection (IRPA15) à Seoul en mai 2020 ainsi qu'aux journées scientifiques des professionnels des sciences et techniques d'imagerie médicale (JPSTIM) du Bénin en octobre 2020. Il correspond à un article publié dans la revue *Annal of Work Exposure and Health* en juillet 2021. <https://academic.oup.com/annweh/article-abstract/65/8/988/6320043>*

4.1 INTRODUCTION

L'exposition des patients, des travailleurs, des populations et de l'environnement aux rayonnements provenant d'applications médicales, industrielles et d'enseignement/recherche doit être évaluée et, si nécessaire, contrôlée (International Atomic Energy Agency, 2018). Il y a une augmentation d'année en année de la fréquence des procédures radiologiques (Samer S. Abu Zer et al., 2016). Ainsi, au cours de la dernière décennie, le nombre de personnels de santé exposés dans les services de médecine nucléaire et de radiologie diagnostique a augmenté (Al-Abdulsalam and Brindhaban, 2014; Covens et al., 2012; Linet et al., 2010; Pauwels and Bourguignon, 2012; Smith-Bindman et al., 2012). En 2008, le nombre annuel estimé d'actes radiologiques diagnostiques et interventionnels (y compris dentaires) dans le monde était de 3,6 milliards (Eze et al., 2013; International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2011). En Afrique, l'exposition médicale aux rayonnements ionisants a augmenté avec la large disponibilité des appareils de tomодensitométrie (TDM) et de radiologie conventionnelle (Neossi Guena et al., 2018). La même observation a été faite par Suliman et al. dans leur étude au Soudan (Suliman et al., 2015) et Eze et al. au Nigéria (Eze et al., 2011). Par conséquent, il est nécessaire d'assurer un milieu de travail sain pour le personnel médical.

Au Bénin, l'imagerie médicale se résume principalement à la radiologie standard, à la tomодensitométrie, à la mammographie et à la radiographie dentaire. Entre 2015 et 2019, le nombre d'appareils radiologiques est passé de 25 à 36 dans les centres publics (Dpmed-Ministry

of Health, 2019), avec une augmentation conséquente des actes radiologiques. Malheureusement, le développement de ces équipements radiologiques s'est déroulé dans un environnement non réglementé. Lors des examens radiographiques, les techniciens en radiologie se placent derrière un écran composé d'un mur en béton ordinaire ou d'un matériel plombé (du plancher à la limite de la poitrine) et d'une vitre en plomb (de la limite de la poitrine vers le plafond), de protection contre les rayonnements, censé garantir que le niveau de référence de 7,50 μSv sur une heure ne soit pas dépassé sur les lieux de travail (zone surveillée) (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014). C'est en raison de la présence des organes à risque des régions de la tête (les yeux), du cou (la thyroïde) et du thorax (les seins) (Memon et al., 2010; Sun et al., 2016; Wang et al., 2015, 2002) dans le champ des écrans de vitre des salles de radiologie, que nous avons focalisé notre étude sur l'évaluation de l'exposition au poste de travail (zone surveillée), derrière ces écrans de vitre à partir duquel les techniciens en radiologie observent les patients. Comme les portes des salles d'examen sont généralement non loin des salles d'attente au Bénin, et sont utilisées à la fois par les agents de santé et les membres du public, il était également important d'évaluer les niveaux de dose auxquels le public est exposé derrière les portes du couloir. Le niveau de référence requis pour les membres du public est de 0,05 μSv sur une heure (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014). En mars 2018, le Bénin a adopté une loi sur la radioprotection et la sûreté nucléaire (Government of Benin, 2018) et l'Autorité de Réglementation est fonctionnelle depuis le 20 août 2020 (Government of Benin, 2020). Par conséquent, l'installation des appareils de radiologie est réglementée depuis août 2020.

Le but de cette étude a été d'évaluer les niveaux d'exposition ambiants aux rayonnements X (équivalents de dose ambiants) dans les centres d'imagerie médicale et d'observer si les niveaux d'exposition sont inférieurs aux niveaux de référence requis (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014).

4.2 MATÉRIELS ET MÉTHODE

4.2.1 Collecte et traitement des données

Une étude transversale a été réalisée de juin 2019 à février 2020 dans les centres d'imagerie médicale du Bénin (Figure 21). Ces centres publics et privés ont volontairement accepté de participer à cette étude. Des informations préliminaires concernant le type et l'emplacement des différents hôpitaux ont été obtenues auprès du Ministère de la Santé du Bénin.

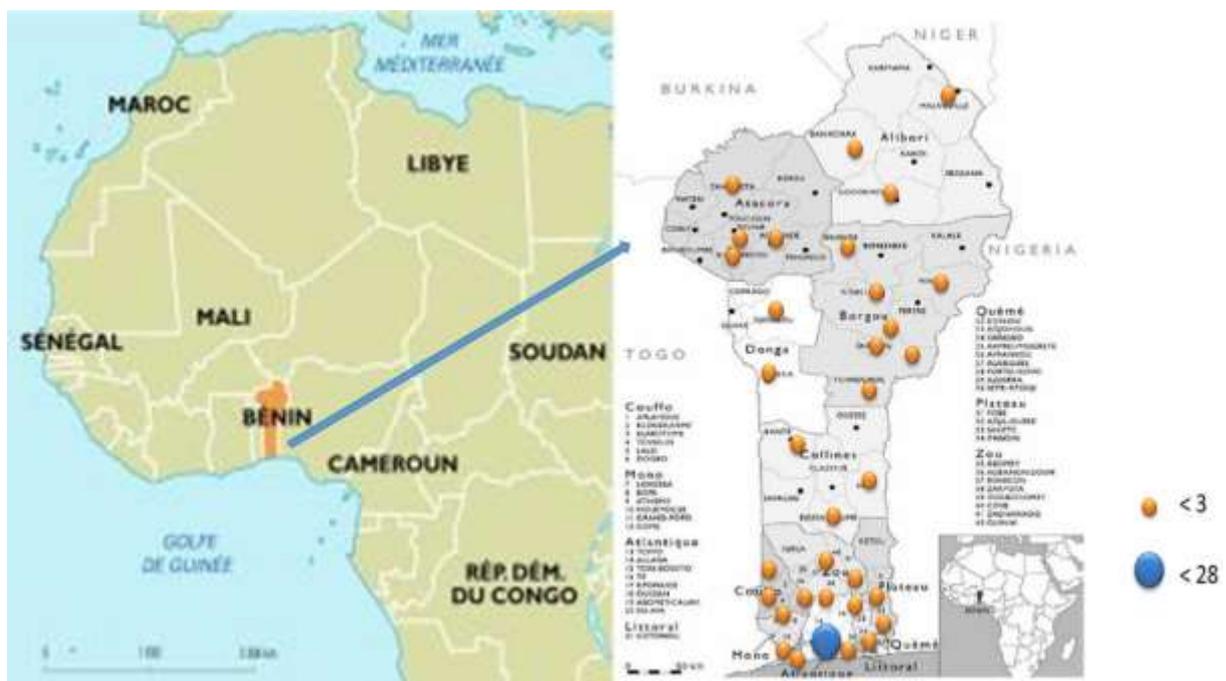


Figure 21 : Répartition des centres de radiologie sur le territoire national du Bénin.

Certains centres ont été exclus pour des problèmes techniques et des incompréhensions : (i) certains directeurs d'hôpitaux pensaient qu'il s'agissait d'un contrôle des autorités ministérielles (n=2) ; (ii) d'autres avaient construit les salles de radiologie mais ne les avaient pas encore équipées (n=2) et, (iii) enfin certains centres avaient des machines en réparation (n=4). Seuls les appareils à rayonnements X fonctionnels ont été retenus dans cette étude des salles de radiographie, de thorax (en position debout) et de tomodensitométrie. Les résultats du processus d'identification et de sélection sont affichés dans un diagramme décrit à la figure 22.

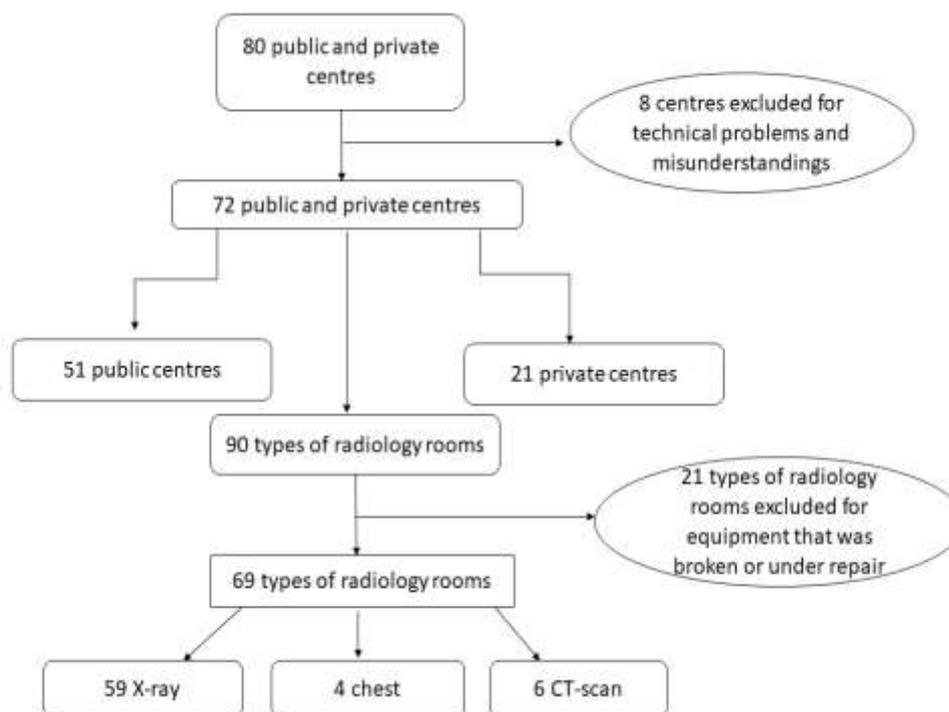


Figure 22 : Diagramme de sélection des types de salles de radiologie au Bénin

X-ray, salle de radiologie standard ; chest, salle de radiologie spécifique à la radiographie pulmonaire ; CT-scan, salle de tomodensitométrie.

Avant de mesurer les équivalents de dose de rayonnement dans ces différentes salles d'examen, le questionnaire 2 (Annexe 7) conçu en lien avec les objectifs de l'étude a été utilisé, pour obtenir différentes informations auprès des responsables de service sur les caractéristiques des salles d'examen, telles que (i) dimensions des salles d'examen en centimètres (cm), (ii) spécifications des appareils à rayonnements X (tension aux bornes du générateur, épaisseur du matériel de filtration⁴...) et (iii) nombre d'examens par an.

⁴ Un matériel de type aluminium ou cuivre est interposé à la fenêtre de sortie (béryllium) des rayonnements X de freinage afin de couper la composante basse énergie du spectre et donc de « durcir » le spectre moyen nécessaire à la réalisation des images en radiologie (Antoni and Bourgois, 2013).

4.2.2 Considération éthique

Cette recherche n'était pas centrée sur des sujets humains, mais l'accord des responsables hospitaliers avait été demandé et obtenu avant d'effectuer les mesures de dose de rayonnement dans les centres d'imagerie médicale.

4.2.3 Mesures des doses au poste de travail

Les deux instruments suivants ont été utilisés : (i) un mètre pour mesurer les dimensions de la pièce et (ii) un radiamètre AT1123 (Figure 23) capable de mesurer des doses issues d'un champ de rayonnements X courts, pulsés ou continus et gamma/bêta (50 nSv à 10 Sv).



Figure 23 : Radiamètre AT1123

Le radiamètre a été calibré le 14 mai 2019 (Annexe 8) et a été utilisé pour mesurer les niveaux d'exposition (H_i^* (10)) dans les salles fonctionnelles. L'équivalent de dose ambiant (H_i^* (d)) en un point dans un champ de rayonnements est défini comme l'équivalent de dose ambiant qui serait produit par le champ correspondant dans la sphère ICRU (Figure 8) à une profondeur (d)

(en mm) (Chinangwa et al., 2017; International Commission on Radiation Units and Measurements, 1985). Toutes les mesures ont été effectuées par le même opérateur.

Sur chaque site, la première mesure était le brut de fond. Le corps du patient a été simulé par un fantôme en plexiglas rempli d'eau (polyéthylène haute densité (PEHD), 0,95 g/cm³), d'un volume de 26,48 L, en lieu et place du fantôme régulier en polyméthacrylate de méthyle (PMMA, 1,05 g/cm³) « Corps humain » utilisé habituellement.

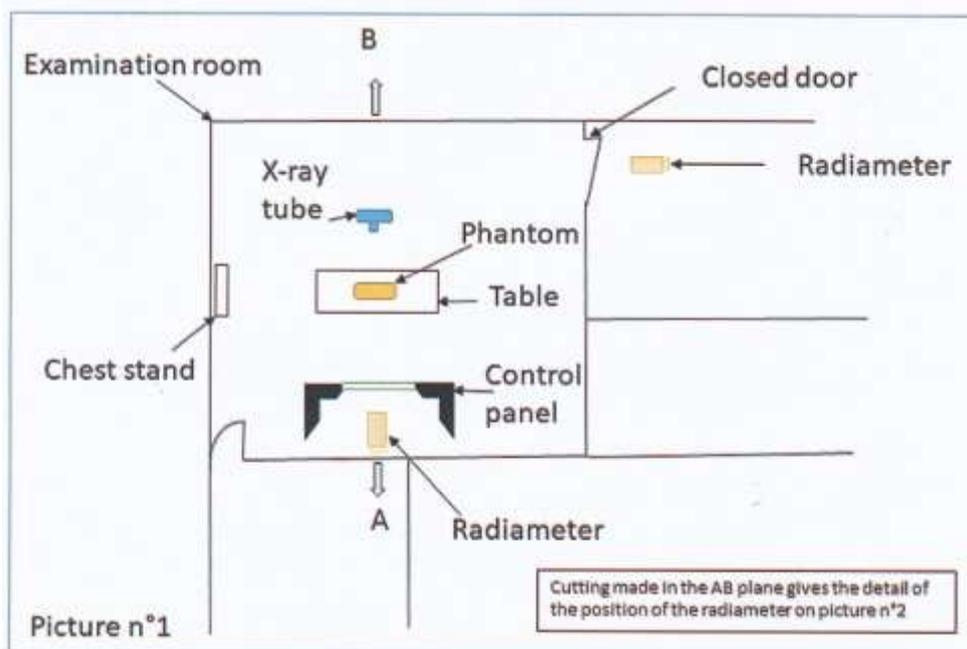


Figure 24 : Positionnement du radiamètre au cours des mesures au poste de travail et dans le couloir

Les mesures ont été réalisées (1) au poste de travail du technicien en radiologie derrière la vitre en plomb des zones surveillées, et (2) dans le couloir derrière les portes en plomb des salles d'examen (Figures 24 et 25).

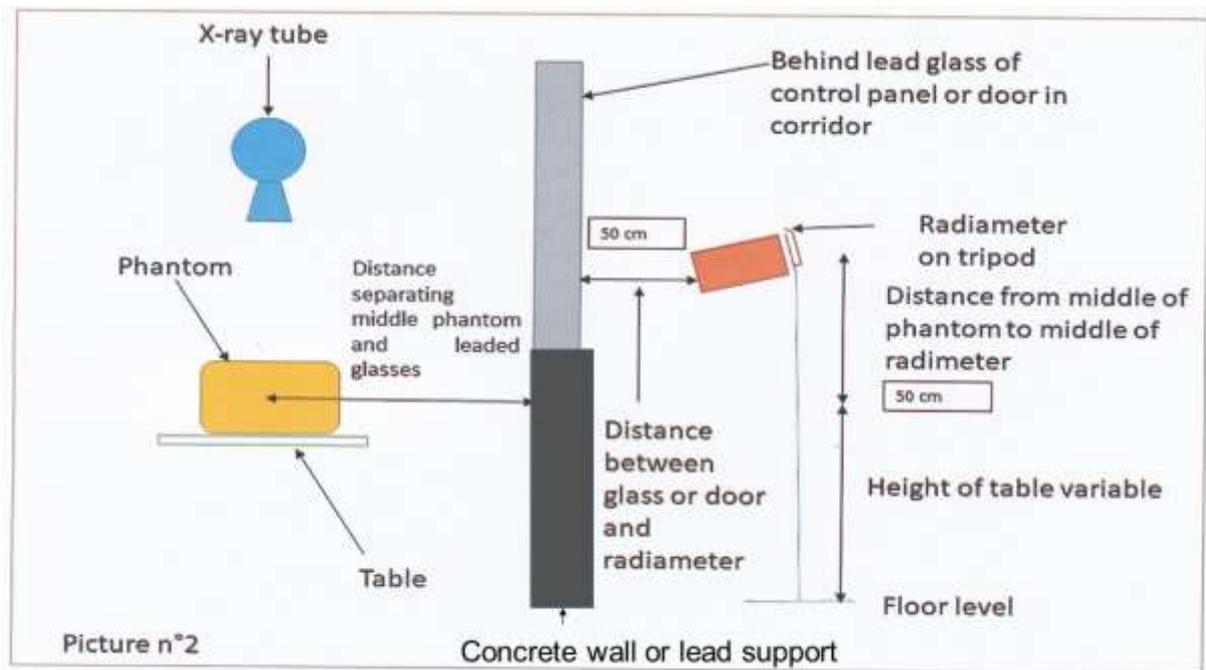


Figure 25 : Positionnement du radiamètre par rapport à l'écran de vitre plombée ou les portes des salles d'examens

Les mesures ont été réalisées à hauteur des vitres en plomb correspondant au niveau habituel de la poitrine des travailleurs exposés professionnellement (Figures 26 et 27), comme défini dans cette étude et recommandé par l'AIEA (International Atomic Energy Agency and International Labour Office, 2018).



Figure 26 : Positionnement du radiamètre derrière l'écran en verre lors de la mesure des équivalents de dose ambiants

Les examens lombaire, thoracique et tomodensitométrie abdomino-pelvien ont été choisis comme référents en raison de leurs grands volumes de diffusion (rayonnement diffusé) par rapport à ceux d'autres examens réalisés à la même distance (Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2010), et leur fréquence de réalisation.

Les conditions de réalisation de ces examens sont décrites dans les annexes 9 et 10. Les paramètres d'acquisition d'images utilisés étaient milliampères.secondes (mAs) et kilovoltage (kV), car ce sont les paramètres que les techniciens en radiologie utilisent habituellement lors des examens de référence (International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1975; Ministry of culture and communication, 2005; Zaichick, 2013). Les paramètres d'acquisition d'images sont résumés également aux annexes 9 et 10.



Figure 27 : Positionnement du radiamètre derrière la porte du couloir lors de la mesure des équivalents de dose ambiants

Les débits d'équivalents de dose et les temps d'exposition ont été mesurés pour un examen sur chaque site (Annexes 11, 12 et 13). Afin d'obtenir des débits d'équivalents de dose proches de la réalité, un facteur de correction (T) a été calculé pour les différents types d'examens de référence (Annexes 14 et 15), comme le rapport entre le débit d'équivalent de dose patient et fantôme mesuré dans les mêmes conditions expérimentales (Annexes 16 et 17).

Equation permettant de déterminer les facteurs de correction (T) :

$$T = \frac{\text{Débit d'équivalent de dose patient}}{\text{Débit d'équivalent de dose fantôme}}$$

Où

T est le facteur de correction (sans unité) ;

Débit d'équivalent de dose patient en mSv ;

Débit d'équivalent de dose fantôme en mSv.

Les valeurs du facteur de correction (T) obtenues étaient de $0,63 \pm 0,24$ pour la radiographie

thoracique et de $1,26 \pm 0,30$ pour la radiographie lombaire et la tomodensitométrie abdomino-pelvien. Les débits d'équivalent de dose des patients ou des fantômes utilisés pour l'estimation du facteur de correction sont décrits dans les annexes 18 et 19.

4.2.4 Formule utilisée

Il est possible, sur la base du questionnaire 2 (Annexe 8), d'estimer le nombre moyen d'examens (radiographie lombaire et thoracique, ainsi que tomodensitométrie abdomen-bassin) par heure. Ces différents nombres sont résumés en annexes 10 et 11. Les débits d'équivalents de dose ont été intégrés sur une (01) heure pour obtenir un équivalent de dose ($H_{ih}^*(10)$), qui a été estimé par la formule suivante :

$$(H_{ih}^*(10)) = (H_i^*(10)) \times t \times n,$$

Où

$(H_i^*(10))$ en $\mu\text{Sv/h}$ sont les débits d'équivalent de dose estimés après avoir affecté le facteur de correction (T) aux débits d'équivalent de dose mesurés ;

t : temps d'exposition en heure (hr) par examen ;

n : nombre d'examens réalisés en une (01) heure.

Cette formule a été utilisée pour comparer les niveaux d'exposition estimés aux postes de travail, dans les couloirs aux critères de radioprotection fixés précédemment.

4.2.5 Analyses statistiques

$(H_{ih}^*(10))$ a été comparé aux niveaux de référence de $7,50 \mu\text{Sv}$ par heure pour les zones surveillées (zones réglementées) et de $0,05 \mu\text{Sv}$ par heure pour les lieux publics (zones non réglementées) (voir annexe 20 pour des explications sur les calculs des niveaux de référence) (International Atomic Energy Agency and International Labour Office, 2018). Les données recueillies par questionnaire et instruments dosimétriques ont été analysées, à l'aide de logiciels statistiques (SAS® version 9.4, R-Studio © 2009-2019, version 1.2.5019, et du logiciel IH STAT).

Des tests bilatéraux ont été effectués, et une valeur $P \leq 0,05$ était considérée comme statistiquement significative. Selon la distribution de la dose, des tests paramétriques et non paramétriques ont été effectués pour obtenir des comparaisons et des corrélations entre différentes valeurs.

4.3 RESULTATS

4.3.1 Description des centres de radiologie au Bénin

Sur 80 centres publics et privés, 72 ont participé à cette étude. Au total, 73 salles de radiographie, 4 thoraciques et 13 tomodensitométries ont été recensées dans ces centres, dont 59 salles de radiographie, 4 thoraciques et 6 tomodensitométries ont été évaluées ; tous étaient opérationnels et le taux de participation était de 80,82 %, 100,00 % et 46,15 %, respectivement (Tableau 10). Sur la base des registres du centre, nous avons enregistré, pour l'année 2019, 181140 et 11472 examens pour des actes de radiologie standard (dont la radiographie thoracique) et de tomodensitométrie, respectivement.

Tableau 10 : Type de centres, équipements radiologiques et salles de radiologie au Bénin

	Général ^a	Participants ^b	(%) ^c
Type de centres	80	72	90.00
Public	53	51	96.22
Privé	27	21	77.78
Équipement radiologique	115	69	60.00
Oui	90	69	76.67
Non ^d	25	0	0
Type de salles de radiologie	90	69	76.66
Radiologie standard	73	59	80.82
Radiographie pulmonaire	04	04	100.00
Tomodensitométrie	13	06	46.15

^aStatistiques des centres, salles et équipements radiologiques ; ^bCentres et salles d'examens qui ont participé à l'étude ; ^cRatio participants / total des centres et équipements du Bénin ; ^dÉquipement hors d'usage ou sous réparation.

4.3.2 Résultats des équivalents de dose ambiants mesurés

Le radiamètre AT1123 nous a permis d'effectuer différentes mesures derrière les écrans (vitres plombées et portes). Pour l'équivalent de dose estimé derrière les vitres plombées au poste de travail, les doses moyennes étaient de 2,39, 0,09 et 228,39 μSv par heure pour les salles de radiographie, thoracique et tomodensitométrie, respectivement. Comme attendu, ces équivalents de dose aux postes de travail sont de plus en plus grands en allant des salles de radiographie thoracique aux salles de tomodensitométrie. Des observations similaires 0,94 ; 0,04 et 9,21 μSv par heure ont été faites sur les équivalents de dose obtenus dans les couloirs attenants aux salles de radiographie, thoracique et tomodensitométrie, respectivement (Tableau 11).

Tableau 11 : Résumé statistique des équivalents de dose ambiants ($H_{ih}^*(10)$) en μSv par heure pour les différentes salles d'examens et comparés aux niveaux de référence

Type de salle	Point de mesure	N	Moyenne (μSv par heure)	Médiane (μSv par heure)	[Min ; Max] (μSv par heure)	p-value (entre moyenne poste de travail et couloir)	Niveau de référence (μSv par heure)	p-value ^f (entre moyenne poste de travail ou couloir et niveau de référence)	(%) ⁱ
Radiologie standard	Poste de travail ^g	59	2,39	0,13	0,00 ; 75,67	$< 0,0001^{(e)}$	7,50	$< 0,0001$	6,78
	Couloir ^h	57	0,94	0,02	0,00 ; 24,72		0,05	0,06	33,90
Radiographie pulmonaire	Poste de travail ^g	4	0,09	0,07	0,00 ; 0,21	$0,11^{(ee)}$	7,50	-	0,00
	Couloir ^h	2	0,04	0,04	0,00 ; 0,08		0,05	-	50,00
Tomodensitométrie	Poste de travail ^g	6	228,39	28,65	0,39 ; 869,75	$0,16^{(ee)}$	7,50	-	83,33
	Couloir ^h	6	90,82	68,04	0,00 ; 245,33		0,05	-	83,33
Toutes les salles	Poste de travail ^g	69	21,91	0,18	0,00 ; 869,75	$< 0,0001^{(e)}$	7,50	$< 0,0001$	13,04
	Couloir ^h	65	9,21	0,02	0,00 ; 245,33		0,05	0,06	40,00

^(e)p-value obtenu de t-test et comparaison faite entre équivalent de dose au poste de travail et couloir avec la distribution lognormal ^(ee)p-value de comparaison obtenu avec test non-paramétrique de Wilcoxon entre équivalent de dose au poste de travail et le couloir ; ^fp-value obtenu de t-test et comparaison entre moyenne et niveau de référence avec la distribution lognormal de la moyenne ; ⁱ **Pourcentage d'équivalent de dose estimé > au niveau de référence (μSv par heure) ; ^gPoint situé derrière la vitre plombée au poste de travail ; ^hPoint situé derrière la porte des salles d'examens à l'extérieur dans le couloir.**

La comparaison effectuée entre équivalent de dose estimé par heure au poste de travail et couloir dans les salles de radiologie a montré qu'ils étaient significativement différents (p -value $< 0,0001$). En revanche, les équivalents de dose estimés par heure aux niveaux des salles de radiographie thoracique et de tomodensitométrie ne présentaient pas de différence significative pour les mêmes points considérés (poste de travail et couloir). Pour toutes les salles, il y avait une forte corrélation statistiquement significative entre les équivalents de dose estimés par heure au poste de travail et le couloir ($r = 0,72$, p -value $< 0,0001$).

Au poste de travail, certains équivalents de dose estimés par heure étaient supérieurs aux niveaux de référence, 6,78 % et 83,33 % (Tableau 11) pour les salles de radiographie et de tomodensitométrie, respectivement. Les équivalents de dose estimés par heure au couloir des salles de radiographie et de tomodensitométrie étaient supérieurs aux niveaux de référence, respectivement 33,90 % et 83,33 % (Tableau 11). Pour les salles de radiographie pulmonaire, la moitié des équivalents de dose estimés par heure au niveau du couloir était supérieure aux niveaux de référence. Une différence statistiquement significative a été notée entre l'équivalent de dose estimé par heure au poste de travail des salles de radiologie ($P < 0,0001$), de toutes les salles d'examen ($P < 0,0001$) et les niveaux de référence.

Dans l'ensemble, pour les 69 postes de travail et les 65 couloirs, 13,04 % et 40,00 % (Tableau 11) des équivalents de dose estimés par heure étaient respectivement supérieurs aux niveaux de référence. Nous avons noté une corrélation négative ($r = -0,15$) entre la superficie des salles d'examen et les équivalents de dose estimés par heure au poste de travail, qui était statistiquement non significative ($P = 0,22$) (Tableau 12). La même corrélation négative ($r = -0,28$) a été trouvée entre la distance séparant le milieu du fantôme et la vitre plombée, et les équivalents de dose estimés par heure au poste de travail. En revanche, cette corrélation négative était statistiquement significative.

4.4 DISCUSSION

Notre étude visait à évaluer les niveaux d'exposition au poste de travail dans les salles de radiologie standard et de tomodensitométrie au Bénin. Cette étude nous a amené à nous pencher sur la dosimétrie ambiante, qui fait partie de l'évaluation de la sécurité au travail. Cette évaluation de la sécurité au travail est essentielle pour une surveillance dosimétrique efficace et à des fins épidémiologiques. Elle comprend, outre la dosimétrie d'ambiance, la dosimétrie individuelle et l'étude des dysfonctionnements plausibles, pouvant entraîner une irradiation accidentelle (Antoni and Bourgois, 2013; Bourgois and Antoni, 2019). L'objectif de cette étude était d'évaluer les équivalents de dose horaires dans les zones réglementées, notamment les postes de travail (zone surveillée) des différentes salles de radiologie standard et de tomodensitométrie et de les comparer aux valeurs réglementaires. La classification des travailleurs ne sera pas discutée dans ce chapitre.

En raison de problèmes techniques et de mauvaises compréhensions sur le but de l'étude, huit centres répertoriés dans les résultats n'ont pas pu participer à cette étude. Parmi les résultats, nous avons observé que les équivalents de dose au poste de travail sont de plus en plus grands en allant des salles de radiographie thoracique aux salles de tomodensitométrie. Cette augmentation des équivalents de dose se justifie par le fait que les charges de travail en milliampères.secondes utilisées augmentent également en allant des salles de radiographie thoracique à celles de tomodensitométrie.

4.4.1 Comparaison des niveaux d'équivalent de dose ambiants à ceux de la littérature

Les équivalents de dose moyens/médians (min ; max) par heure observés dans les salles de radiographie et de tomodensitométrie étaient de 2,39/0,13 (0,00 ; 75,67) et 228,39/28,65 (0,39 ; 869,75) μSv par heure respectivement, pour les mesures effectuées au poste de travail. Ces chiffres étaient élevés par rapport à ceux publiés par Achuka et al. au Nigéria (Achuka et al., 2019), qui étaient en moyenne respectivement de 1,62 et 2,65 μSv par heure. Nos chiffres dans

les salles de radiologie standard étaient élevés par rapport aux équivalents de dose moyens publiés par d'autres auteurs, notamment 1,61 μSv par heure (Salama et al., 2016) en Arabie Saoudite, 0,95 μSv par heure (Haider et al., 2014) au Bangladesh, 0,82 μSv par heure (Skam et al., 2017) au Nigéria dans les installations de l'État de Katsina et 0,024 μSv par heure (Skam et al., 2017; University of Maiduguri et al., 2017) au Nigéria dans trois centres de radiodiagnostic du sud-est. En ne considérant que les équivalents de dose médians au niveau du poste de travail, ceux des salles de radiologie standard de cette étude étaient inférieurs à 1,62 μSv par heure, soit la moyenne publiée par Achuka et al. (Achuka et al., 2019) au Nigéria. Nos valeurs moyennes et médianes au poste de travail pour les salles de radiologie standard étaient inférieures à 3,10 μSv par heure publiée par Chinangwa et al. au Malawi (Chinangwa et al., 2017). Les moyennes relativement élevées dégradées par les valeurs extrêmes s'expliquent par le fait que certaines vitres plombées n'atténuaient pas correctement les débits d'équivalent de dose à cause des ouvertures présentes autour des vitres plombées ou de leur qualité. De plus ces salles d'examen avaient une surface inférieure à 12 m² et la distance séparant le paravent plombé et la table d'examen était inférieure à 2 mètres. Ceci peut en partie s'expliquer également par le fait que les appareils d'imagerie médicale ne soient pas calibrés, puisque l'acquisition d'appareils usagés ou par don peut impliquer la génération de débits d'équivalent de dose élevés. Cependant, le pourcentage de non-conformité des vitres plombées des salles de radiologie était relativement faible, soit 6,78 % contre les 15 % publiés par Haider et al. au Bangladesh (Haider et al., 2014). Mais, la loi nationale au Bangladesh exige 1,00 μSv par heure au lieu de 7,50 μSv par heure comme niveau de référence exigé à l'international et au Bénin dans les actes réglementaires. Dans l'étude de Haider et al., 30% des portes étaient non conformes comparées au niveau de référence contre 33,90% dans notre étude pour les salles de radiologie standard. Nous notons que les différents auteurs cités dans notre étude n'ont pas précisé le nombre d'examens réalisés dans chaque salle, ce qui peut influencer l'équivalent de dose. De plus, leur

population d'étude variait entre trois et 13 contre 69 dans notre étude.

Tableau 12 : Corrélation entre équivalents de dose ambiants en μSv par heure estimés au poste de travail et les surfaces des salles d'examens en cm^2 ou les distances en cm

	N	Moyenne	[Min ; max]	Corrélation / p-value ¹
Surface des salles d'examens (cm^2)	69	25.80	6.00 ; 51.53	-0.15 / 0.22
Equivalent de dose par heure (μSv)	69	2.39	0.00 ; 75.67	
Distance du fantôme à la vitre plombée (cm)	69	270.15	90 ; 542	-0.28 / 0.02
Equivalent de dose par heure (μSv)	69	2.39	0.00 ; 75.67	

¹p-value de corrélation obtenue de test non-paramétrique de Spearman entre équivalent de dose au poste de travail et surface des salles d'examens ou distance du milieu du fantôme à la vitre plombée

La forte corrélation positive entre les vitres plombées et les portes ($r = 0,72$), statistiquement significative ($p < 0,0001$) prouve qu'il existe une forte liaison positive entre les doses reçues aux vitres plombées et celles des portes. Les faibles corrélations négatives (respectivement $r = -0,15$ et $r = -0,28$) (Tableau 12) observées entre l'équivalent de dose par heure et la surface des salles d'examen, d'une part, et entre l'équivalent de dose par heure et la distance séparant le milieu du fantôme et les vitres plombées, d'autre part, montrent qu'une distance accrue séparant la source (rayonnement diffusé) et la zone de contrôle est associée à une diminution de l'équivalent de dose. L'équivalent de dose par heure est proportionnel à l'inverse du carré de la distance qui sépare la source (rayonnement diffusé) et le point de mesure (Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2010). Les directeurs d'hôpitaux pourraient installer des appareils à rayonnements X dans des pièces plus grandes. Les tables d'examens et les postes de travail doivent être placés aussi loin que possible, les uns des autres.

4.4.2 Forces et limites

Cette étude de métrologie est la première qui a été menée au Bénin dans laquelle les gestionnaires hospitaliers, les chefs des services d'imagerie médicale et les travailleurs exposés

étaient impliqués. Nous avons précisé le nombre d'examens pouvant être pratiqués dans chaque salle, générant l'équivalent de dose le plus élevé par heure. Ce nombre d'examens influe grandement sur l'équivalent de dose. De plus, notre échantillon était important par rapport à d'autres études. Cependant, cette étude est limitée par le fantôme utilisé qui n'est pas celui habituellement utilisé dans d'autres pays. Cela peut surestimer ou sous-estimer l'équivalent de dose. En conséquence, nous avons utilisé un facteur de correction (T), afin d'obtenir un équivalent de dose proche de la réalité. Un léger biais de sélection peut être évoqué étant donné que nous n'avons pas pu effectuer les mesures dans tous les centres. Cependant ce risque est faible puisque seulement 2,5 % des centres ont refusé de participer à l'étude.

4.5 CONCLUSION

Au total, sur 69 postes de travail (derrière des vitres au plomb) et 65 couloirs (derrière des portes) étudiés, 60 ont été classés en zone surveillée et 39 en zone publique. L'optimisation du temps d'irradiation des patients peut réduire l'équivalent de dose pour les travailleurs, tout comme le contrôle qualité de toutes les machines de radiologie au Bénin. Les équivalents de dose enregistrés sont parfois élevés. Ces résultats ont démontré que les écrans actuels, notamment la vitre en plomb séparant la salle d'examen et le poste de travail, et les portes entre la salle d'examen et le couloir, sont insuffisants pour limiter les expositions aux rayonnements, surtout dans le cas de la tomodensitométrie. Les écrans doivent être améliorés et un programme de dosimétrie doit être mis en place pour surveiller les expositions des travailleurs et du public. Une autre étude utilisant le dosimètre serait utile pour compléter ce travail.

5 ESTIMATION RETROSPECTIVE DE LA DOSE CUMULEE D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE REÇUE PAR LES TRAVAILLEURS DE LA RADIOLOGIE DIAGNOSTIQUE AU BENIN, 1972-2019

Ce travail a été préparé pour être soumis en tant qu'article original dans la revue "International Archives of Occupational and Environmental Health"

5.1 INTRODUCTION

Les multiples applications des rayonnements ionisants dans le domaine de la médecine entraînent un nombre croissant de personnes exposées sur le plan professionnel (Xu et al., 2018). Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a publié dans son rapport (soixante-septième et soixante-huitième sessions), une évaluation annuelle de l'exposition professionnelle entre 2010 et 2014. Le nombre annuel de travailleurs exposés dans le monde à des sources naturelles et artificielles de rayonnements ionisants est d'environ 24 millions, dont plus de 11,4 millions (United Nations, 2021) pour les sources artificielles uniquement. Parmi les travailleurs exposés aux sources artificielles se trouve le personnel du secteur médical qui était prédominant et représentait environ 80 % du total (9 millions) (United Nations, 2021). La dose efficace annuelle moyenne estimée pour cette période dans le secteur médical était d'environ 0,5 mSv (United Nations, 2021).

En France, la dose efficace annuelle moyenne était de 0,25 mSv en 2020 pour le secteur médical, vétérinaire et recherche, avec plus de 94 % des travailleurs suivis qui ont reçu une dose annuelle inférieure à 1 mSv (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2021).

Sur le continent africain, les doses efficaces annuelles moyennes variaient de 0,44 à 8,20 mSv (1990 à 2000) (Gbetchedji et al., 2020) (Osei, 1997) dans toutes les spécialités des secteurs médicaux, tandis qu'au niveau de la radiologie diagnostique, elles variaient de 0,07 à 4,37 mSv

(2005 à 2011) (Gbetchedji et al., 2020; Hasford et al., 2012).

L'existence des données dosimétriques des travailleurs permet de suivre le niveau d'exposition des travailleurs au poste de travail et d'établir les relations entre ces niveaux d'exposition et les potentiels effets sanitaires développés par les travailleurs (Eheman and Tolbert, 1999; Simon et al., 2006; Zhang et al., 1998). Lorsque ces données dosimétriques n'existent pas dans un pays, le développement des modèles de reconstruction physique des doses (Alramlawi et al., 2015; Xu et al., 2018; Zhang et al., 1998) ou par modèle de régression (Choi et al., 2016; Simon et al., 2006) selon les données disponibles sur les appareils et les historiques au poste de travail est possible.

Au Bénin, depuis 1970 où la radiologie a été introduite, la surveillance dosimétrique des travailleurs n'a été disponible que sur une période de 23 ans. Malheureusement, ces données n'étaient pas disponibles. De 1993 à nos jours aucune surveillance dosimétrique n'a été encore disponible au Bénin. La majorité des expositions professionnelles provient des applications médicales du domaine de la radiologie standard et de la tomodensitométrie qui utilisent 95% des appareils émetteurs de rayonnements ionisants (Dpmed-Ministry of Health, 2019). Les applications de la fluoroscopie ou de la radiologie interventionnelle sont très rares voire quasi inexistantes depuis plusieurs années.

Cette étude visait donc à mettre en place des modèles pour estimer de manière rétrospective les doses individuelles de rayonnement reçues par les techniciens de la radiologie diagnostique au Bénin au cours de la période de 1972 à 2019.

5.2 MATERIELS ET METHODE

5.2.1 Population d'étude

La population d'étude inclut 335 techniciens en radiologie qui ont été sélectionnés lors de l'étude sur la morbidité développée au chapitre 3. Aucune information de surveillance dosimétrique n'a pu être collectée à propos de leur exposition depuis le début de leur vie professionnelle jusqu'en 2019. Parmi les 335 techniciens en radiologie inclus dans l'étude, 138 présents au poste entre février et mars 2020 ont participé à notre enquête transversale pour la collecte des données d'exposition individuelle à titre expérimental. Nous avons exclu ceux qui n'ont pas pu fournir des informations complètes sur l'heure (n=3), la charge de travail bimensuelle (n=2) ou qui travaillaient dans des salles n'ayant pas de vitres plombées dans la salle d'examens (n=5).

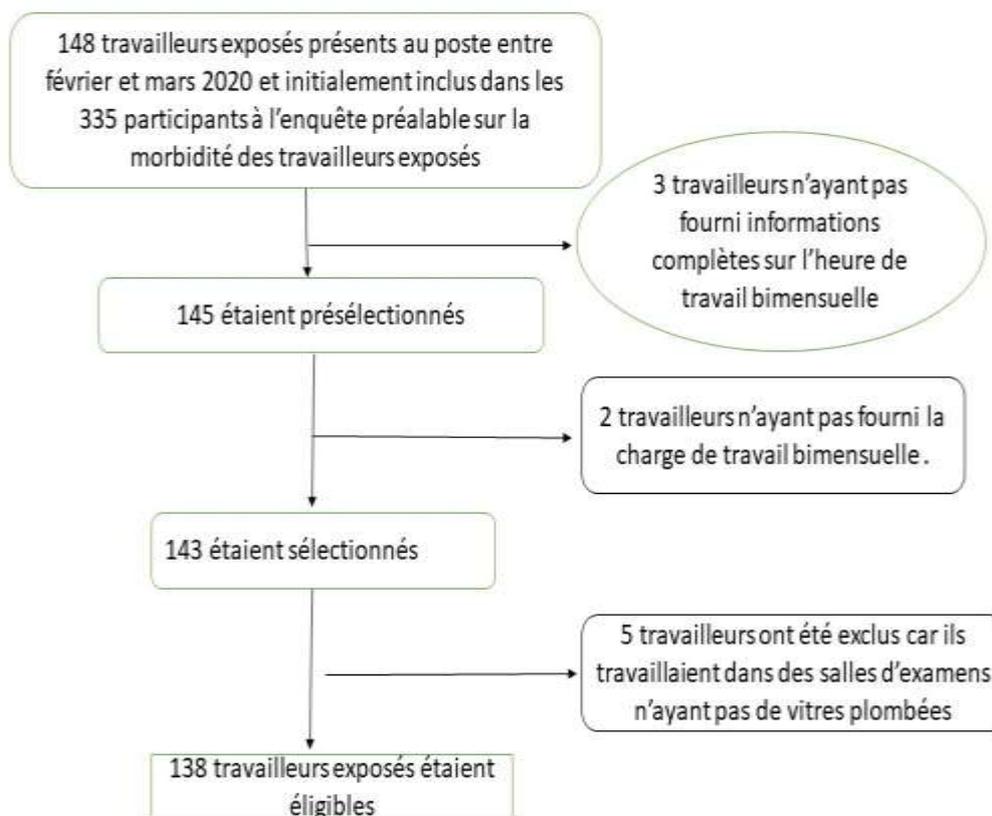


Figure 28 : Processus de sélection des participants à l'enquête transversale (février à mars 2020) pour l'estimation des paramètres du modèle de régression linéaire

A la fin du processus de sélection, 138 travailleurs ont été inclus dans la base de données expérimentales devant servir à estimer les paramètres de régression (Figure 28).

5.2.2 Informations dosimétriques utilisées

Des dosimètres d'ambiance de type TLD (Dosimètres thermo-luminescents) ont été posés dans les salles d'examens selon le schéma de la figure 29 sur une durée de deux mois.

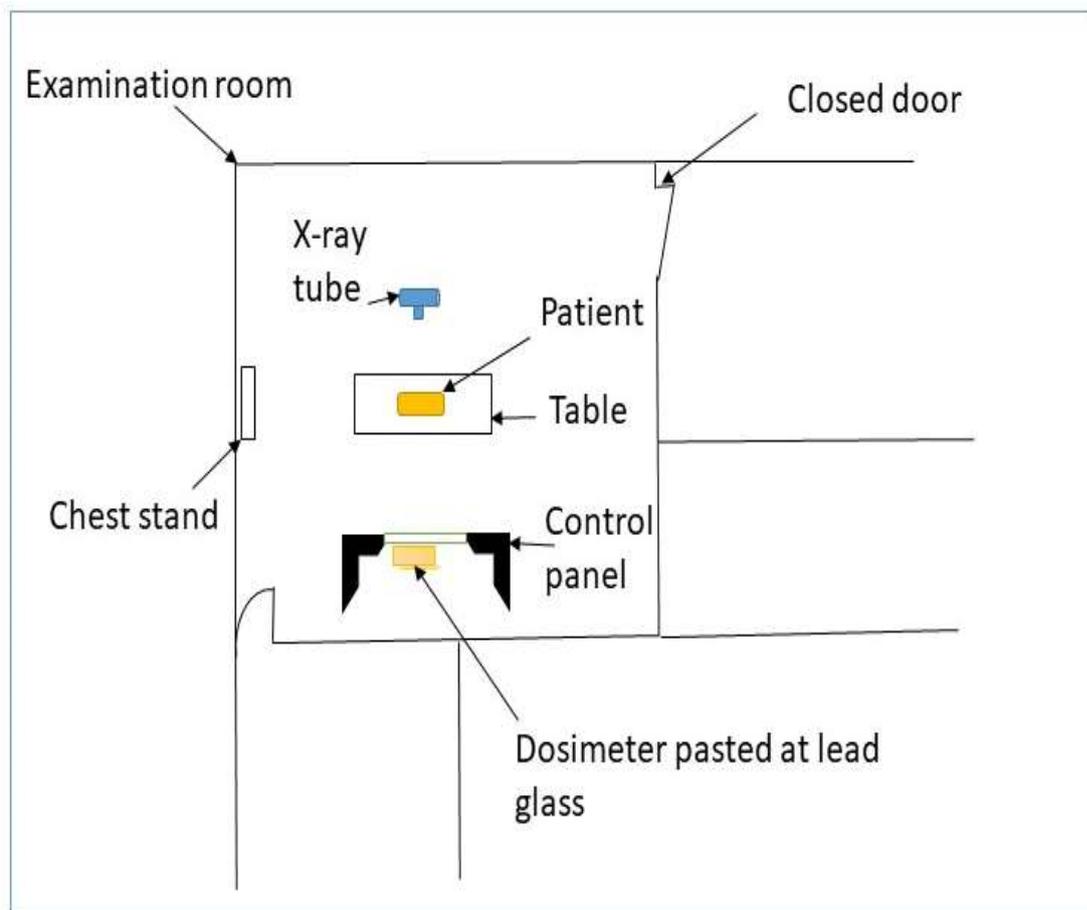


Figure 29 : Schéma montrant la position du dosimètre au cours de l'exposition des patients pour les explorations diagnostiques

5.2.2.1 Estimation de la dose efficace (individuelle) bimensuelle

La dose efficace bimensuelle des travailleurs par centre a été estimée à partir des charges de travail correspondant au nombre d'examens effectués par chaque travailleur exposé qui est proportionnel à l'équivalent de dose ambiant (Brunette, 2005) et décrit dans la formule

suivante :

$$\text{Dose efficace bimensuelle/c (a)} = \frac{\text{Charge de travail par travailleur} \times \text{Equivalent de dose ambiant mesuré au poste de travail}}{\text{Charge de travail totale estimée au poste de travail pour tous les travailleurs}}$$

(formule 1)

Où

La dose efficace bimensuelle/c (a) est la dose efficace (individuelle) bimensuelle par centre ;

La charge de travail par travailleur est en mA.seconde ;

L'équivalent de dose ambiant mesuré au poste de travail par le dosimètre d'ambiance en mSv ;

La charge de travail totale en mA.seconde estimée au poste de travail qui est la somme de toutes les charges de travail des travailleurs ayant opéré dans la salle pendant la durée des deux mois.

5.2.2.2 Estimation de la dose efficace (individuelle) annuelle à partir de la dose efficace (individuelle) bimensuelle

La dose efficace annuelle a été estimée par la formule suivante :

$$\text{Dose efficace annuelle/centre (b)} = \text{Dose efficace bimensuelle/centre (a)} \times 6$$

(formule 2)

Où

La dose efficace annuelle/centre (b) est la dose efficace annuelle par centre ;

La dose efficace bimensuelle/centre (a) est la dose efficace bimensuelle par centre ;

L'unité 6 correspond au nombre de mesure bimensuelle estimée dans une année.

5.2.3 Considération éthique

Cette étude a été examinée et approuvée par le comité d'éthique de la recherche de l'Institut de Biologie Appliquée (ISBA) de Cotonou.

5.2.4 Collecte des données

Nous nous sommes basés sur le même questionnaire 1 (Annexe 1) utilisé dans le cadre de l'étude sur la morbidité chez les travailleurs exposés (de 1972 à 2019), population cible, pour extraire des informations concernant le nombre d'heures de travail par jour, les dates de prises de service dans les différents hôpitaux et la durée des congés (informations passées sur la carrière). Des informations liées au type et au nombre d'examens réalisés pendant la période de 1972 à 2019 par les travailleurs n'étaient pas disponibles. Car les travailleurs ne s'en souvenaient plus. Chaque salle d'examens et chaque hôpital avait été identifié par un numéro pour être apparié à chaque travailleur indexé également par un numéro unique et ayant travaillé dans cet hôpital.

Un deuxième questionnaire (Annexe 7) avait été utilisé pour extraire les données concernant les caractéristiques des appareils de radiologie et de tomодensitométrie en fonctionnement ou non sur tout le territoire national béninois, notamment le kilovoltage et l'épaisseur du matériel de filtration du tube à rayonnements X. Pour les anciens appareils au-delà de 1985 (n=7) dont les caractéristiques n'étaient plus disponibles, une imputation par valeur moyenne avait été faite pour remplacer les valeurs manquantes (le kilovoltage et l'épaisseur du matériel de filtration du tube à rayonnements X).

Etant donné que le Bénin ne disposait pas de centre de dosimétrie, des dosimètres thermoluminescents (TLD) posés au poste de travail, de février à mars 2020 ont été fournis et lus par l'Institut de Radioprotection du Ghana (RPI/GAEC) (Hasford et al., 2012). Des informations sur le nombre d'heures effectués au poste, le type et le nombre d'examens (charge de travail en mAs) ont été extraits du questionnaire 3 développé en annexe 21 et soumis aux 138 participants à l'enquête transversale. La durée de travail au poste en heure par centre avait été estimée suivant la note explicative développée en annexe 22. Chaque travailleur participant à l'enquête transversale avait été déjà enregistré sous un numéro unique sur la liste des 335 participants au

cours de l'enquête longitudinale pour éviter la double inscription. Les doses efficaces annuelles par centre pour les 138 participants à l'enquête transversale, déduites des équivalents de dose ambiants à partir des dosimètres, étaient utilisées comme jeu de données pour développer notre modèle d'estimation rétrospective des doses efficaces par travailleur par centre.

5.2.5 Construction du modèle

L'utilisation des paramètres de régression linéaire dans les modèles d'estimation rétrospective de dose a été développée par plusieurs auteurs en Corée et au Japon (Choi et al., 2016; Yoshinaga et al., 1998). L'indisponibilité des informations liées à la charge de travail (type et nombre d'exams effectués) pendant la période de 1972 à 2019, ne nous avait pas permis de développer le modèle physique de Zang et al en Chine (Zhang et al., 1998) qui repose principalement sur la charge de travail.

5.2.5.1 *Analyse comparative des équivalents de dose ambiants bimensuels recueillis dans les salles d'examen*

Nous avons comparé la moyenne des équivalents de dose ambiants bimensuels entre les hôpitaux du secteur public (0,0081 mSv) et ceux du secteur privé (0,0074 mSv) d'une part et entre les travailleurs de sexe masculin (0,0081 mSv) et ceux du sexe féminin (0,0075 mSv) d'autre part (Annexe 23). Il n'y avait aucune différence statistiquement significative entre ces équivalents de dose. Par conséquent, nous n'avons pas eu besoin d'effectuer quatre modèles d'estimation rétrospective adapté à chaque type de groupe d'hôpitaux ou à chaque type de sexe.

5.2.5.2 *Présentation du modèle de régression*

En se basant sur les données dosimétriques expérimentales (doses efficaces annuelles des 138 participants à l'enquête transversale) et les modèles de régression linéaire brute et ajustée, nous avons retenu le modèle ci-dessous pouvant estimer les paramètres considérés. Ils sont décrits dans l'équation suivante :

Dose efficace annuelle/centre (b) = β_0 + β_1 (heure de travail par travailleur) + β_2 (épaisseur du matériel de filtration du tube)

(Formule 3)

Où

Dose efficace annuelle/centre est la dose efficace (individuelle) annuelle par centre ;

β_0 est le terme constant, la dose efficace annuelle/centre lorsque l'heure de travail par travailleur est égal à zéro et la valeur de l'épaisseur du matériel de filtration du tube à rayonnements X est égal à zéro ;

β_1 est le prédicteur de l'heure de travail par travailleur dans chaque centre ;

β_2 est le prédicteur de l'épaisseur du matériel de filtration du tube à rayonnements X.

Les valeurs des paramètres β_0 , β_1 et β_2 ont été utilisées pour estimer la dose efficace annuelle des travailleurs (n=335) de la population cible de 1972 à 2019 à partir des informations annuelles par centre sur l'heure de travail et l'épaisseur du matériel de filtration du tube.

5.2.6 Analyses statistiques

Les données dosimétriques mesurées et estimées ont été analysées, en utilisant les logiciels statistiques SAS® version 9.4 et R-Studio © 2009–2019, version 1.2.5019. Des tests bilatéraux ont été effectués et une valeur $P \leq 0,05$ était considérée comme statistiquement significative. Selon la distribution de la dose, des tests paramétriques et non paramétriques ont été effectués pour obtenir des données de comparaisons entre différentes valeurs. Un modèle de régression linéaire a été réalisé pour l'estimation des paramètres des prédicteurs : heure de travail par travailleur par centre et épaisseur du matériel de filtration du tube.

5.3 RESULTATS

5.3.1 Description de la population cible (n=335)

Les caractéristiques des travailleurs exposés de la population cible (n=335) au moment de l'enquête ont été décrites dans le tableau 13 ci-dessous. L'âge moyen au moment de l'enquête menée auprès des travailleurs exposés était de 34,9 ans (extrêmes, 22 ; 82 ans) (Tableau 13), et 59,7 % étaient des femmes. Plus de la moitié des travailleurs ont démarré leur premier emploi après 2000 (Tableau 13). La plupart des travailleurs ayant participé à l'étude expérimentale proviennent du secteur public (98/138).

Tableau 13 : Caractéristiques de la population des travailleurs inclus dans la cohorte expérimentale (n=138) et ceux non inclus (n=197) dans ladite cohorte au moment de l'enquête transversale en 2020

Variables	Cohorte totale (N=335)		Travailleurs inclus dans la cohorte expérimentale (N=138)		Travailleurs non inclus dans la cohorte expérimentale (N=197)	
	N	(%)	N	(%)	N	(%)
Sexe						
Masculin	135	40,3	88	63,7	47	23,9
Féminin	200	59,7	50	36,3	150	76,1
Age au moment de l'enquête (année)						
≤ 30	77	22,9	35	25,4	42	21,3
31-41	52	15,5	22	15,9	30	15,2
≥ 42	206	61,5	81	58,7	125	63,5
Type d'établissement						
Public	190	56,7	98	71,1	92	46,7
Privé	145	43,3	40	28,9	105	53,3
	Moyenne	min ; max	Moyenne	min ; max	Moyenne	min ; max
Age moyen au moment de l'enquête (année)						
Total sexe	34,9	22;82	33,4	22 ; 63	35,7	22 ; 82
Masculin	31,2	22 ; 59	34,4	22 ; 59	34,4	22 ; 57
Féminin	37,4	22 ; 82	31,7	23 ; 52	36,7	22 ; 82
	Médiane	min ; max	Médiane	min ; max	Médiane	min ; max
Année calendaire au premier emploi (année)	2000	1972 ; 2019	2013	1984 ; 2019	2003	1972 ; 2019

5.3.2 Description de la population expérimentale (n=138)

Pour les travailleurs exposés inclus dans la population expérimentale (n= 138), l'âge moyen au moment de l'enquête était de 33,4 ans (extrêmes, 22 ; 63 ans) (Tableau 13), et 36,3 % étaient des femmes. La majorité (58,7 %) avait un âge supérieur ou égal à 31 ans (Tableau 13).

5.3.3 Comparaison des deux populations (expérimentale et cible)

L'âge moyen au moment de l'enquête était de 33,4 ans et n'était pas significativement différent (P = 0,31) de l'âge moyen des travailleurs exposés de la population cible (Tableau 14).

Tableau 14 : Comparaison des caractéristiques de la population cible à celles de la population expérimentale selon l'âge (année) et le sexe à la date de l'enquête

	Public et Privé		Secteur public		Secteur privé	
	Mean (n)	SD	Mean (n)	SD	Mean	SD
Population expérimentale	33,4 (138)	9,0	32,8 (98)	8,5	34,9 (40)	10,1
Population cible	34,9 (335)	10,5	34,9 (241)	10,4	35,0 (94)	10,6
P-value*		0,31		0,18		0,81
	n(%)		n(%)		n(%)	
	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin
Population expérimentale	88 (63,77)	50 (36,23)	58 (59,18)	40 (40,82)	30 (75,00)	10 (25,00)
Population cible	135 (40,30)	200 (59,70)	105 (43,57)	136 (56,43)	30 (31,91)	64 (68,09)
P-value**		0,64		0,45		0,11

* test de Chi2 entre population expérimentale et population cible ; **test de Wilcoxon entre population expérimentale et population cible ; SD = écart type

Les hommes avaient participé massivement (63,77%) à l'enquête transversale, mais comparé au taux de participation des hommes à l'enquête longitudinale (40.30%), cette différence n'était pas statistiquement significative (P = 0,64) (Tableau 14).

5.3.4 Equivalents de dose ambiants mesurés dans les salles d'examens (62) sur deux mois, doses efficaces bimensuelles et annuelles reçues par les travailleurs (138)

La médiane des équivalents de dose ambiants mesurés dans 62 sur 69 salles d'examen répertoriées au départ (radiographie et tomographie) était de 0,03 mSv avec 0,75 mSv au maximum (Tableau 15). La médiane des doses efficaces correspondant à la surveillance bimensuelle au poste de travail pour les travailleurs ayant participé à l'enquête transversale était

de 0,0064 mSv sans dépasser 0,0255 mSv (Tableau 15). Les doses efficaces bimensuelles rapportées à une année (doses efficaces annuelles) ont montré une médiane de 0,04 mSv avec un maximum estimé à 0.1528 mSv (Tableau 15).

Tableau 15 : Résumés statistiques des variables explicatives du modèle et des doses efficaces bimensuelles, annuelles reçues par les travailleurs (n=138).

Résumés statistiques			
	Médiane	Min	Max
Charge de travail (mA.seconde)	2366	16	40652
Epaisseur du matériel de filtration (mm)	2	0.7	5.5
Durée de travail au poste (heures)	10	1	164
Equivalent de dose ambiant mesuré dans les salles d'examens sur deux mois (mSv)	0.03	0.00001	0.75
Dose efficace bimensuelle au poste de travail (mSv)	0.0064	0.00023	0.0255
Dose efficace annuelle estimée au poste de travail (mSv)	0.04	0.0014	0.1528

5.3.5 Paramètres de régression linéaire estimés

Les prédicteurs du modèle de régression sont résumés dans le tableau 16 ci-dessous et seront utilisés pour estimer de manière rétrospective la dose efficace annuelle reçue par les travailleurs de 1972 à 2019. Tous les prédicteurs et le terme constant estimés étaient statistiquement significatifs ($P < 0,05$) (Tableau 16).

Tableau 16 : Paramètres des variables explicatives du modèle de regression linéaire des doses efficaces annuelles reçues par les travailleurs exposés (n=138)

Désignation des paramètres			
	β_0	β_1	β_2
Paramètres estimés	0.0469098	0.00011	0.000639
P-value	<.0001	0.03	0.01

5.3.6 Evolution de la dose efficace annuelle et cumulée (individuelle) entre 1972 et 2019

Pour tous les participants (n=335) à l'enquête longitudinale de 1972 à 2019, la dose médiane efficace annuelle estimée croit de 1,48 mSv à 2,25 mSv entre 1972 et 1992 (Figure 30) et décroît ensuite de 2,25 mSv en 1992 à 0,11 mSv en 2019 (Figure 30).

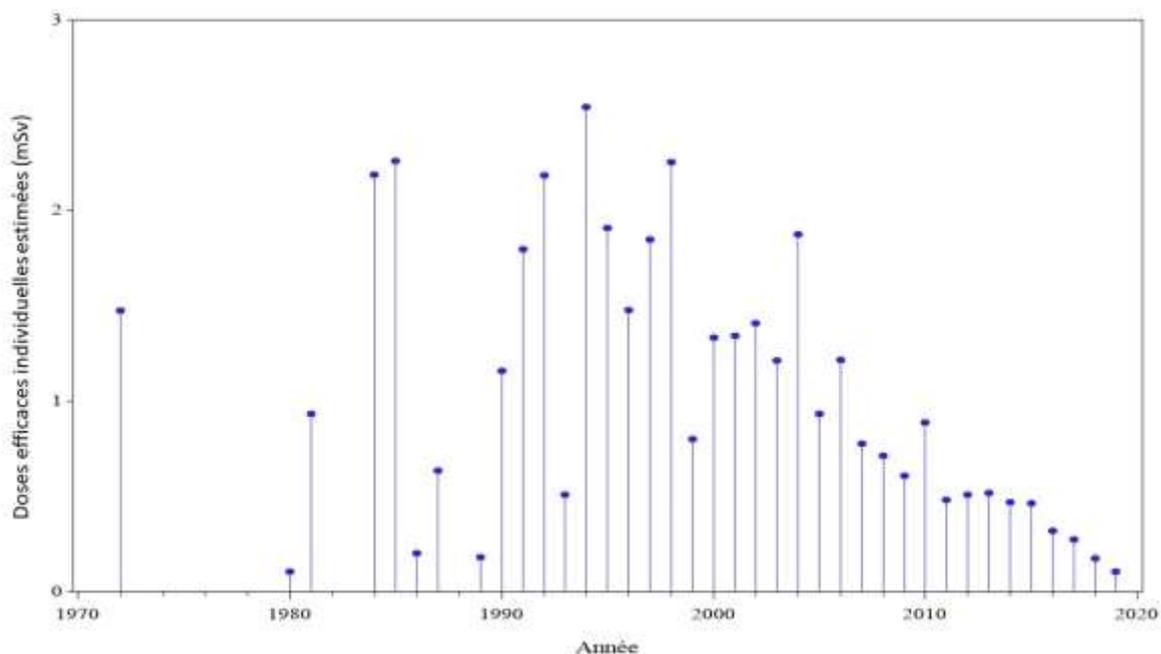


Figure 30 : Distribution des doses efficaces annuelles par travailleurs estimées dans les différents centres de radiologie entre 1972 et 2019

La médiane des doses efficaces cumulées était de 1,30 mSv avec un maximum de 7,03 mSv estimée de manière rétrospective sur la période de 1972 à 2019. La durée médiane d'heures cumulées de travail au poste était de 2100 heures sur la même période (Tableau 17).

Tableau 17 : Résumés statistiques de l'épaisseur du matériel de filtration, dose efficace cumulée reçue par tous les travailleurs (n=335) sur la durée cumulée de travail au poste entre 1972 et 2019

Résumés statistiques			
	Médiane	Min	Max
Epaisseur du matériel de filtration (mm)	2	0.7	3.2
Durée cumulée de travail au poste entre 1972 et 2019 (heures)	2100	24	57420
Dose efficace cumulée au poste de travail entre 1972 et 2019 (mSv)	1.30	0.06	7.03

La majorité des travailleurs (184/335) (Tableau 18) avait reçu une dose efficace cumulée qui était de 0,43 mSv. Seuls six (6) travailleurs ont reçu une dose efficace cumulée supérieure à 6 mSv. Près de la moitié (151/335) (Tableau 18) des travailleurs avait reçu une dose efficace cumulée supérieure à 1 mSv, limite inférieure de l'intervalle des doses professionnelles (1 à 20 mSv/an).

Tableau 18 : Classes de doses efficaces cumulées (mSv) estimées entre 1972 et 2019

Classe de dose (mSv)	n (%)	Médiane	Min ; max
< 1	184 (54.9)	0.43	0.06 ; 0.99
1-6	145 (43.3)	2.23	1.00 ; 5.88
> 6	6 (1.8)	6.68	6.34 ; 7.03
Totale	335 (100)	0.82	0.06 ; 7.03

5.4 DISCUSSION

Les doses efficaces médianes annuelles estimées (1,48 à 2,25 mSv) avaient des tendances temporelles à la hausse de 1972 à 1992 et connaissaient une baisse après 1992 (2,25 à 0,11 mSv).

5.4.1 Analyse des doses efficaces médianes annuelles (individuelles)

Les tendances temporelles à la baisse des doses efficaces annuelles estimées dans cette étude sur la période de 1992 à 2019 (2,25 à 0,11 mSv), concordaient avec les résultats d'études de reconstitution historique précédentes menées sur la population de travailleurs médicaux en Corée (Choi et al., 2016), aux États-Unis (Simon et al., 2006), en Chine (Zhang et al., 1998) et le Japon (Yoshinaga et al., 1998). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la plupart des appareils provenaient probablement des pays asiatiques à cause de leur coût abordable comparativement à ceux venus des pays de l'Europe ou d'Amérique. Les doses efficaces médianes annuelles estimées dans cette étude étaient en dessous de celles de Choi et al, en Corée (Choi et al., 2016), 9,45 à 1,26 mSv (1971 à 1995). Par contre ces doses efficaces médianes annuelles estimées entre 1992 et 2019 étaient supérieures à celles de Xu et al, en Chine (Xu et al., 2018) et de (Zhang et al., 1998). De 1972 à 1992, on note une tendance temporelle à la hausse des doses efficaces médianes annuelles qui passent de 1,48 à 2,25 mSv. Selon Choi et al, en Corée (Choi et al., 2016) la dose efficace médiane annuelle estimée entre la période de 1977 et 1984, reçue par les techniciens de la radiologie des hôpitaux des Etats Unis d'Amérique était de 2 mSv pendant que la dose efficace médiane annuelle estimée pour la même période chez les techniciens de la radiologie en Corée, allait de 3,5 à 5,9 mSv. Ces doses efficaces médianes annuelles estimées en Corée sont supérieures, comparées à celles trouvées dans cette étude sur la même période pratiquement. Cette différence pourrait être due à la charge de travail plus élevée en Corée, vu la densité de la population. Les tendances temporelles obtenues avec un pic en 1992 sont similaires à celles de Simon et al, (Simon et al., 2006) où l'on note deux pics en 1967 et 1976. Les faibles doses efficaces médianes estimées entre la période de 1972 à 1992 peuvent s'expliquer par le fait que notre étude n'avait pris en compte que la radiologie standard et la tomographie, or il est reconnu que pendant cette période les hôpitaux utilisaient beaucoup la fluoroscopie où les doses sont plus élevées. La

hausse des doses efficaces médianes annuelles estimées en 1992 pourrait être due à l'acquisition en cette période d'appareils moins calibrés et leur retrait du service avec le temps aurait fait diminuer les doses efficaces médianes annuelles. Cette discontinuité peut être due également en partie à des erreurs d'estimation rétrospective de la dose efficace annuelle. De plus, les travailleurs de cette période auraient peut être déclaré des heures de travail élevées pouvant influencer les estimations.

5.4.2 Forces et limites

Ce modèle d'estimation rétrospective des doses efficaces professionnelles basé sur l'historique de l'exposition passée et peut être utile pour estimer les doses de rayonnements professionnelles au Bénin et dans des pays n'ayant pas encore de suivi dosimétrique opérationnel. Cependant, il présente des limites. Les estimations des doses efficaces annuelles pour les travailleurs dans les salles de fluoroscopie entre 1972 et 2019 n'ont pas pu être effectuées. Les biais de mémoire peuvent influencer le modèle d'estimation rétrospective des doses efficaces professionnelles car les informations ont été recueillies en 2019 sur des expositions ayant eu lieu depuis 1972. Des biais de classification pourraient être également considérés car certains travailleurs pourraient être classés à tort dans un groupe, du fait des conséquences des biais de mémoire et de l'estimation de la dose individuelle des participants de la population expérimentale basée uniquement sur des équivalents de dose ambiants (dosimétrie d'ambiance) et non des doses efficaces individuelles (dosimétrie individuelle) issues d'un suivi dosimétrique. Les appareils de radiologie de cette période ont peut être été dégradés et ce changement n'a pas pu être pris en compte.

Notre modèle n'a pas pu intégrer les informations relatives à la charge de travail (nombre d'exams effectués par chaque travailleur) qui est un déterminant dans l'estimation de la dose. Il était difficile aux travailleurs de se souvenir du nombre d'exams effectués par mois ou par année et ces données n'étaient pas disponibles dans une banque de données au niveau national.

La répétition des procédures radiologiques n'avait pas été également prise en compte. Une surestimation ou une sous-estimation de la dose efficace annuelle pourrait être possible. Dans cette étude, il n'était pas possible de valider le modèle car aucune donnée de suivi dosimétrique individuel n'était disponible au Bénin jusqu'à la date de l'étude.

5.5 CONCLUSION

Sur la période de 1972 et 2019 aucun travailleur exposé n'a dépassé annuellement les limites de 20 mSv par an. Le maximum des doses efficaces cumulées était de 7,03 mSv et la médiane maximale des doses efficaces annuelles était de 2,25 mSv sur cette période. En dose efficace cumulée entre 1972 et 2019, six (06) travailleurs avaient une dose efficace cumulée supérieure à 6 mSv. Le niveau d'exposition professionnelle au Bénin entre 1972 et 2019 reste relativement acceptable malgré l'absence d'une réglementation du domaine de l'utilisation sûre et sécurisée des rayonnements ionisants.

Ces doses efficaces annuelles même en deçà de la limite annuelle professionnelle (20mSv/an) constituent une base pour les études épidémiologiques afin d'étudier la relation entre les doses efficaces de rayonnements faibles et les éventuels effets sanitaires associés. Une surveillance dosimétrique individuelle des travailleurs des services de radiologie et des autres utilisateurs des rayonnements ionisants s'avère nécessaire pour maintenir une veille permanente des niveaux d'exposition professionnelle au Bénin.

6 ETUDE DE L'ASSOCIATION ENTRE LES NIVEAUX D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS A FAIBLE DOSE ET LE RISQUE DES MALADIES DES YEUX, ET MASSES SOUS-CUTANÉES

6.1 INTRODUCTION

Il avait été mis en évidence dans le chapitre 3 de notre thèse des liens entre le statut « exposé ou non exposé » et certains évènements de santé tels que les maladies des yeux et la masse sous-cutanée. Par ailleurs, des doses efficaces cumulées auxquelles les travailleurs étaient soumis entre 1972 et 2019 ont été estimées de manière rétrospective au chapitre 5. Comme cela a été dit dans l'introduction générale, bien que très informative, la cohorte des survivants japonais des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki présente des limites, du fait de la nature ponctuelle et brève (ou « flash ») de l'exposition des survivants aux rayonnements ionisants qui ne reflète pas la nature des expositions professionnelles, répétées dans le temps sur plusieurs années ou dizaines d'années. Une étude internationale dénommée INWORKS (*International Nuclear Worker Study*) a été mise en place en 2013, incluant trois cohortes de travailleurs de l'industrie nucléaire de France, Etats-Unis et Grande-Bretagne (Richardson et al., 2015). Les premiers résultats d'INWORKS ont confirmé une augmentation du risque de cancer et de maladies non cancéreuses (maladies de l'appareil circulatoire) en fonction de la dose cumulée de rayonnements ionisants dans cette population de plus de 308 000 travailleurs dont l'exposition professionnelle a été reconstituée individuellement sur l'ensemble de leur carrière.

L'objectif du présent chapitre a été d'étudier la relation dose-effet entre les doses efficaces cumulées et les évènements de santé étudiés chez les travailleurs exposés aux rayonnements X en radiologie diagnostique dans les centres d'imagerie médicale au Bénin de 1972 à 2019.

6.2 METHODE

6.2.1 Collecte et traitement des données

Les informations détaillées sur les caractéristiques de la population d'étude et les méthodes d'enquête ont été présentées au chapitre 3. La dose efficace cumulée a été catégorisée en trois groupes : 0,]0 - 1], et > 1 mSv, sur la base des limites annuelles réglementaires (International Atomic Energy Agency, 2016) de l'intervalle des doses professionnelles pour le corps entier. La première catégorie de dose est la catégorie de référence, c'est-à-dire pour laquelle la dose est égale à 0 pour les travailleurs non exposés. Cependant, aussi bien les travailleurs exposés que les travailleurs non exposés sont tous exposés à la radioactivité naturelle (sous-sol, cosmique et provenant de l'alimentation) et les rayonnements ultraviolets du rayonnement solaire. Malheureusement au Bénin, l'évaluation de la dose efficace moyenne de la radioactivité naturelle n'a pas encore été faite.

6.2.2 Analyses statistiques

Selon la distribution des doses efficaces cumulées, des tests paramétriques et non paramétriques ont été effectués pour comparer les doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux ou de masses sous-cutanées et celles des travailleurs n'ayant rien déclaré. Des tests bilatéraux ont été effectués et une valeur $P \leq 0,05$ était considérée comme statistiquement significative.

En premier lieu, à l'aide d'un modèle de Cox multivarié ajusté sur le sexe, la catégorie d'âge au premier emploi, la catégorie d'année calendaire au premier emploi et le département (regroupement des centres par département), en utilisant le 'suivi' comme échelle de temps, les rapports de risques instantanés (HR) et les intervalles de confiance (IC) à 95% ont été estimés.

Un modèle de Poisson a été ensuite utilisé pour étudier la forme de la relation dose-effet entre les évènements de santé et les doses efficaces cumulées. Il s'agit d'un modèle linéaire en Excès de Risque Relatif (ERR). Ce modèle s'écrit (Gilbert, 1983) :

$$RR(d) = 1 + \beta d$$

Où

$RR(d)$ est le risque relatif associé à la dose efficace cumulée ; Le RR exprime le rapport entre l'incidence de l'évènement de santé dans le groupe exposé et celle du même évènement dans le groupe non exposé (Breslow and Day, 1996).

d la dose efficace cumulée en mSv ;

β est le paramètre représentant l'ERR par unité de dose (mSv). C'est donc l'estimation de ce paramètre qui nous intéresse.

Le logiciel SAS® version 9.4 a été utilisé pour l'implémentation des différents modèles. Toutefois, pour la régression de Poisson un module spécifique de SAS, développé par Richardson et al (Richardson, 2008) a été mis en œuvre pour l'estimation de l'ERR et son intervalle de Confiance (IC) à 95%. Des ajustements sur le sexe, la catégorie d'âge au premier emploi, la catégorie d'année calendaire au premier emploi et le département (regroupement des centres par département) ont également été pris en compte lors du calcul de l'Excès de Risque Relatif par mSv (ERR/mSv).

6.3 RESULTATS

6.3.1 Comparaison des doses efficaces cumulées entre les travailleurs ayant des évènements de santé et ceux sans évènement de santé

Les doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux ou des masses sous-cutanées sont légèrement plus élevées que celles des travailleurs n'ayant rien

déclaré (Figure 31). De plus, les tests de comparaison ont montré des différences statistiquement significatives entre les doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux ($P = 0,0005$) ou de masses sous-cutanées ($P = 0,0011$) et celles des travailleurs n'ayant rien déclaré (Figure 31).

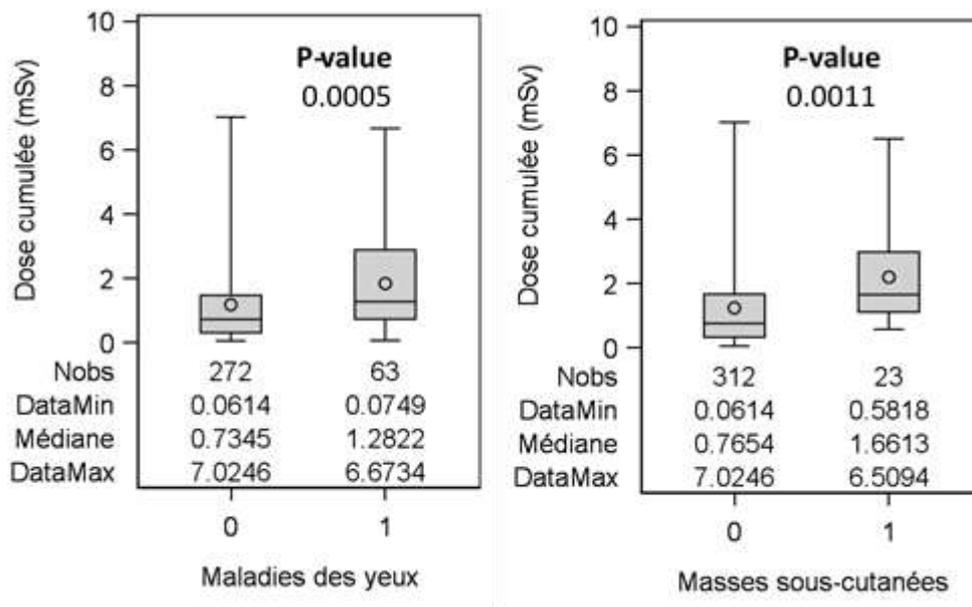


Figure 31 : Comparaisons des doses efficaces cumulées sur la période 1972 à 2019 entre les travailleurs ayant déclaré des événements de santé et ceux sans événements de santé

0 = travailleurs n'ayant pas déclaré d'évènements de santé ; 1= travailleurs ayant déclaré d'évènements de santé

6.3.2 Estimation des risques d'évènements de santé selon les niveaux de dose efficace cumulée

Pour les maladies des yeux, le rapport de risque instantané (HR) associé à l'exposition professionnelle aux rayonnements X était de 2,6 (IC 95% : 1,4 ; 5,0) et 2,1 (IC 95% : 1,2 ; 3,8) pour les intervalles de doses efficaces cumulées de]0 - 1] et supérieures à 1 mSv (Tableau 19), respectivement par rapport à ceux qui n'avaient pas reçu de dose. Le rapport de risque instantané (HR) pour la masse sous-cutanée était de 2,5 (IC 95% : 0,6 ; 11,8) et 3,8 (IC 95% : 1,3 ; 15,1)

pour les mêmes intervalles de dose (Tableau 19), respectivement par rapport à ceux qui n'avaient pas reçu de dose.

Tableau 19 : Distribution des personnes.années et rapport de risque instantané des maladies des yeux et des masses sous-cutanées par classe de dose efficace cumulée d'exposition aux rayonnements X

Intervalle de dose efficace cumulée (mSv)	Médiane de la dose efficace cumulée (mSv)	Personne.année	Cas	HR (IC 95%)*	P-value de tendance
Maladies des yeux					
0	0	1591,1	21	1 (Référence)	
0-1	0,41	835,6	23	2,6 (1,4 ; 5,0)	0,01
>1	1,93	1922,1	40	2,1 (1,2 ; 3,8)	
Masses sous-cutanées					
0	0	1650,2	3	1 (Référence)	
0-1	0,41	896,7	4	2,5 (0,6 ; 11,8)	0,03
>1	1,93	2070,4	19	3,8 (1,3 ; 15,1)	

Estimation des rapports de risques instantanés avec le modèle de Cox. Echelle de temps, le temps de suivi. Modèle ajusté sur sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool, période d'année calendaire au premier emploi (année), département (regroupement des centres par département).

6.3.3 Estimation des excès de risque relatifs (ERR) d'évènements de santé par unité de dose cumulée individuelle (en mSv)

Le tableau 20 présente les analyses de relation dose-effet entre les doses efficaces cumulées d'exposition aux rayonnements X et les maladies des yeux et des masses sous-cutanées. Pour tous les cas de maladies des yeux et de survenue de masses sous-cutanées, un Excès de Risque Relatif (ERR) de 0,2 par mSv (IC 95% : -0,1 ; 0,5) et 0,9 par mSv (IC 95% : -0,9 ; 2,8) non significativement associé aux doses efficaces cumulées de rayonnements X a été estimé.

Tableau 20 : Association entre la dose efficace cumulée et les maladies des yeux ou les masses sous-cutanées : Excès de Risque Relatif par mSv (ERR/mSv) de dose efficace cumulée selon un modèle linéaire, et leur intervalle de confiance (IC) à 95%

Type d'analyse	ERR/mSv (95% d'intervalle de Confiance)	
	maladies des yeux	masses sous-cutanées
Tous les travailleurs	0,2 (-0,1 ; 0,5)	0,9 (-0,9 ; 2,8)

Modèle ajusté sur sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool, période d'année calendaire au premier emploi (année), département (regroupement des centres par département).

6.4 DISCUSSION

Ce chapitre a étudié l'association entre les doses efficaces cumulées de rayonnements X et les évènements de santé mis en évidence au cours du chapitre 3 de cette thèse. En étudiant les effets de l'exposition externe aux rayonnements X sur la santé des travailleurs, un risque significativement plus élevé de maladies des yeux et de masses sous-cutanées a été constaté pour les travailleurs exposés à des niveaux de doses efficaces cumulées de]0 - 1] et supérieures à 1 mSv (Tableau 19) par rapport à ceux qui n'avaient pas reçu de dose.

Nos analyses n'ont cependant pas permis de mettre en évidence un excès de risque relatif par mSv significatif pour les maladies des yeux et pour la masse sous-cutanée.

6.4.1 Relation dose-effet pour les maladies des yeux

L'association entre les doses efficaces cumulées et les évènements de santé n'est pas montrée significativement au cours de cette thèse, notamment pour les maladies des yeux (ERR = 0,2 par mSv [IC 95% : -0,1 ; 0,5]). Contrairement à ceci, les études de Chodick et al aux Etats Unis d'Amérique (P tendance < 0,001) (Chodick et al. 2008), Morina et al, (RR= 1,11 [IC 95% : 1,02 ; 1,51]) (Moriña et al., 2016) en Espagne, ont montré une association croissante de la cataracte avec les différents niveaux de doses efficaces cumulées. La revue systématique effectuée par Little aux Etats Unis d'Amérique (Little, 2013) confirme, par les nombreuses études abordées dans cette revue, l'hypothèse de lien entre les doses efficaces cumulées faibles et la cataracte. Les associations significatives trouvées dans notre thèse, HR = 2,6 (IC 95% : 1,4 ; 5,0) et HR = 2,1 (IC 95% : 1,2 ; 3,8) pour les intervalles de doses efficaces cumulées de]0 - 1] et supérieures à 1 mSv respectivement et les maladies des yeux confirment cependant les effets néfastes des faibles doses de rayonnements sur les yeux. De plus une différence significative a été montrée entre les doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux (P = 0,0005) et celles des travailleurs n'ayant rien déclaré.

6.4.2 Relation dose-effet pour les masses sous-cutanées

Nous constatons que la survenue de masses sous-cutanées était significativement associée, HR = 2,5 (IC 95% : 0,6 ; 11,8) et HR = 3,8 (IC 95% : 1,3 ; 15,1) aux niveaux de doses efficaces cumulées de]0 - 1] et supérieures à 1 mSv respectivement (Tableau 19). Ces résultats suggèrent que les expositions aux rayonnements à faibles doses joueraient un rôle important dans la survenue de masses sous-cutanées, avec une augmentation du risque lorsque les doses efficaces cumulées augmentent. Très peu d'études ont abordé ces questions d'association de niveaux de doses efficaces cumulées de rayonnements ionisants et la survenue de masses sous-cutanées.

6.4.3 Forces et limites

C'est la première fois au Bénin qu'une étude d'association entre des doses efficaces cumulées et la morbidité a été réalisée avec une estimation rétrospective (méthode indirecte par modélisation) des doses efficaces annuelles et cumulées sur la base des équivalents de dose ambiants enregistrés par des dosimètres d'ambiance posés au poste de travail. Mais, nos résultats sont peu concluants et s'expliquent par le fait que notre cohorte rétrospective comportait peu de sujets et que les doses efficaces annuelles par travailleur n'étaient pas issues directement d'un suivi dosimétrique personnel réalisé sur plusieurs années et conservées dans un registre national de dose consultable. De plus, nous n'avons pas pu réaliser une modélisation des doses équivalentes annuelles et cumulées reçues par les organes touchés par les événements de santé étudiés. Les doses équivalentes aux organes d'intérêt lors des expositions médicales diagnostiques et thérapeutiques dans le cadre des soins de santé reçus par les travailleurs, n'avaient pas été prises en compte dans cette étude. Par ailleurs, la quantité de dose de rayonnements ultraviolets n'a pas été prise en compte.

6.5 CONCLUSION

L'estimation des risques associés à l'exposition aux faibles doses chroniques de rayonnements ionisants est un thème de recherche majeur en radioprotection. Notre étude a montré que les

doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux ou de masses sous-cutanées sont légèrement plus élevées que celles des travailleurs n'ayant rien déclaré. Elle a aussi montré des risques significatifs chez les exposés quel que soit le niveau de dose efficace cumulée]0 - 1] ou supérieure à 1 mSv), par rapport à ceux qui n'avaient pas reçu de dose. Elle a cependant manqué de puissance statistique pour mettre en évidence un excès de risque significatif par unité de dose efficace cumulée (ERR/mSv). Ces estimations du risque associé à l'exposition aux faibles doses chroniques pour les maladies des yeux ou les masses sous-cutanées peuvent apporter des éléments de réflexion sur les recommandations actuelles.

7 DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse est une contribution à l'amélioration des connaissances sur les effets sanitaires des expositions à faibles doses de rayonnements X utilisés dans le secteur médical principalement en radiologie diagnostique, dans un pays comme le Bénin où la surveillance dosimétrique est encore embryonnaire. Cette étude a été réalisée sur une cohorte rétrospective couvrant la presque totalité des travailleurs exposés aux rayonnements X des centres d'imagerie médicale du Bénin de 1972 à 2019.

L'objectif de la thèse a été d'évaluer (i) l'incidence des maladies des yeux et des masses sous-cutanées chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants au Bénin, (ii) leur environnement de travail (protection collective), (iii) les niveaux de doses efficaces cumulées qu'ils ont reçues et (iv) à étudier l'association éventuelle entre ces niveaux de doses efficaces cumulées et les maladies des yeux ou les masses sous-cutanées.

Pour le premier sous-objectif, nos analyses ont permis de monter des associations entre l'exposition aux rayonnements X dans les salles de radiologie médicale et les maladies des yeux et les masses sous-cutanées. Par ailleurs, la consommation excessive d'alcool avait un risque accru de survenue de masses sous-cutanées. Les travailleurs ayant démarré le travail après 2017 avaient un risque accru de maladies des yeux. Les travailleurs ayant travaillé dans les centres situés dans les départements de l'ouémé, du plateau, de l'atlantique et du littoral avaient également un risque accru de maladies des yeux.

Le second était l'évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective mis en place pour la protection des travailleurs au poste de travail. L'analyse des données a révélé que sur 69 postes de travail, 60 avaient des équipements de protection collective compatibles avec les exigences réglementaires (équivalents de dose inférieurs à 7,5 μ Sv sur une heure).

Le troisième objectif portait sur l'estimation de manière rétrospective des doses efficaces annuelles et cumulées reçues par les travailleurs dans un contexte d'indisponibilité de données dosimétriques depuis 1970 et d'absence de suivi dosimétrique depuis 1993. L'analyse des données dosimétriques a montré que les doses efficaces annuelles estimées (1,48 à 2,25 mSv) présentaient des tendances temporelles à la hausse de 1972 à 1992 et connaissaient ensuite une baisse après 1992 (2,25 à 0,11 mSv). Six (6) travailleurs avaient reçu une dose efficace cumulée supérieure à 6 mSv et près de la moitié (151/335) des travailleurs avait reçu une dose efficace cumulée supérieure à 1 mSv.

Le dernier sous-objectif était l'examen de l'association entre les niveaux de doses efficaces cumulées et la morbidité chez les travailleurs exposés, plus précisément des maladies des yeux et des masses sous-cutanées. Un risque significativement plus élevé de maladies des yeux et de masses sous-cutanées pour les travailleurs exposés avait été trouvé à des niveaux de doses efficaces cumulées de]0 - 1] et supérieures à 1 mSv (Tableau 19) par rapport aux travailleurs qui n'avaient pas reçu de doses professionnellement. L'étude n'a cependant pas pu mettre en évidence un excès de risque relatif significatif par unité de dose efficace cumulée (ERR/mSv).

L'atteinte de ces objectifs a été possible grâce au travail de recueil de données par questionnaires, de suivi dosimétrique d'ambiance dans 69 salles d'examens de radiologie sur tout le territoire national béninois, mais également grâce à la collaboration étroite avec les collègues de l'équipe 'épidémiologie des radiations' de Gustave Roussy et de l'équipe de direction de la thèse interdisciplinaire (épidémiologie, radioprotection et biostatistique).

Des aspects spécifiques aux quatre objectifs de cette thèse seront dans un premier temps discutés et ensuite suivront les perspectives de ce travail pour conclure la discussion générale.

7.1 NIVEAUX D'EXPOSITION AU POSTE DE TRAVAIL ET DOSES INDIVIDUELLES REÇUES PAR LES TRAVAILLEURS

Avant d'évaluer la morbidité chez les travailleurs exposés, il s'avérait nécessaire de faire un point sur l'environnement de travail et l'exposition individuelle des travailleurs. Il s'agit en d'autres termes de l'étude de poste. Elle comprend, outre la dosimétrie ambiante, la dosimétrie individuelle et l'étude des dysfonctionnements plausibles pouvant entraîner une irradiation accidentelle (Antoni and Bourgois, 2013; Bourgois and Antoni, 2019). L'analyse des mesures d'équivalents de dose mesurés au niveau des postes de travail nous a permis de disposer des chiffres au niveau national et de connaître l'état de l'environnement de travail des travailleurs exposés aux rayonnements X dans les centres d'imagerie médicale du Bénin. Les équivalents de doses moyens/médians (min ; max) par heure observés dans les salles de radiographie et de tomodensitométrie étaient de 2,39/0,13 (0,00 ; 75,67) et 228,39/28,65 (0,39 ; 869,75) μ Sv par heure respectivement, et sont en accord avec ceux publiés dans la littérature.

L'estimation rétrospective des doses efficaces annuelles a montré des tendances temporelles à la baisse des doses efficaces annuelles sur la période de 1992 à 2019 qui concordaient avec les résultats d'études de reconstitution historique précédentes menées sur la population de travailleurs médicaux en Corée (Choi et al., 2016) aux États-Unis (Simon et al., 2006), en Chine (Zhang et al., 1998) et le Japon (Yoshinaga et al., 1998). Les doses efficaces annuelles estimées dans cette étude étaient largement en dessous de celles de Choi et al, (Choi et al., 2016) 9,45 mSv à 1,26 mSv (1971 à 1995). De manière générale, les doses efficaces annuelles estimées dans notre étude n'étaient pas très élevées comparé à celles du niveau international. Cependant, la méthode d'estimation rétrospective des doses efficaces annuelles présentée, n'a pas été comparée à d'autres méthodes où une estimation des doses efficaces annuelles est faite à l'aide des dosimètres passifs individuels sur une longue durée de surveillance. Ceci ne permet pas d'affirmer qu'elle est plus adaptée que d'autres méthodes. Cette méthode est néanmoins applicable dans des pays où l'information sur la surveillance dosimétrique des travailleurs

n'existe pas alors que des besoins de doses efficaces annuelles et cumulées pour des études épidémiologiques existent, afin d'évaluer les risques liés à l'exposition professionnelle aux rayonnements notamment en milieu hospitalier.

7.2 ANALYSE DE LA MORBIDITE CHEZ LES TRAVAILLEURS EXPOSES AUX RAYONNEMENTS X DANS LES CENTRES D'IMAGERIE MEDICALE AU BENIN

Les maladies des yeux (HR = 2,3 [IC 95% : 1,4 ; 3,9]) étaient significativement associées à l'exposition aux rayonnements ionisants. Ce résultat était attendu, compte tenu des résultats publiés dans les études portant sur les cohortes de travailleurs exposés aux rayonnements ionisants tels que ceux obtenus par Chodick et al aux Etats Unis d'Amérique, où le risque à long terme de formation de cataracte (Chodick et al. 2008) était associé à l'exposition aux rayonnements ionisants. Plusieurs autres études ont montré l'association entre la cataracte (Hiller et al. 1986; Picano et al. 2012; Little 2013) aux Etats Unis d'Amérique et en Italie, les opacités du cristallin (Ainsbury et al. 2021) au Royaume-Uni et l'exposition prolongée aux rayonnements ionisants. L'analyse de l'association entre les doses efficaces cumulées estimées et les maladies des yeux, n'a pu montrer un excès de risque relatif par mSv statistiquement significatif (ERR = 0,2 par mSv [IC 95% : -0,1 ; 0,5]). A priori, nous pensons que la petite taille de la cohorte et la dosimétrie qui était une reconstruction avec des hypothèses peuvent en partie expliquer ce résultat. L'exposition professionnelle au cours des trois premières années de fonction (période après 2017) (HR = 3,5 [IC 95 % : 1,3 ; 9,2]) était un facteur de risque statistiquement significatif pour les maladies des yeux. Ce résultat évolue dans un sens opposé à celui de l'étude sur l'estimation rétrospective de la dose efficace annuelle où la tendance temporelle des doses efficaces annuelles était à la baisse entre 1992 et 2019 (2,25 à 0,11 mSv). Cependant, lorsqu'on considère les doses efficaces cumulées sur le temps passé au poste de travail pour les différents travailleurs entre 1972 et 2019, on constate que ceux qui avaient reçu des doses efficaces cumulées entre]0 ; 1] et supérieur à 1 mSv présentaient un risque de

survenue de maladies des yeux par rapport à ceux qui n'avaient pas reçu de doses, avec des rapports de risque instantané de (HR = 2,6 [IC 95 % : 1,4 ; 5,0]), (HR = 2,1 [IC 95 % : 1,2 ; 3,8]) respectivement. De même un risque accru de survenue de maladies des yeux avait été montré chez les travailleurs ayant un âge atteint inférieur ou égal à 28 ans. Cependant, nous n'avons pas mis en évidence un effet de la période des installations radiologiques (période d'installation supérieure ou égale à 2015 versus 2015 - 2019) (HR = 2,0 [IC 95 % : 0,8 ; 4,9]) (Annexe 24), ni une corrélation (P=0.84) entre la période d'installation de certains appareils (2015 - 2019) et la proportion de cas de maladies des yeux chez les jeunes travailleurs. Toutefois, dans la cohorte prospective de 35705 techniciens en radiologie des Etats Unis d'Amérique, avec 2382 cas de cataracte auto-déclarés, il a été révélé un ERR élevé (ERR = 2,0, IC 95% : - 0,7 ; 4,7) entre la formation de cataracte et l'augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants, (Chodick et al., 2008). De nombreux auteurs selon Chodick et al, ont conclu que tout seuil de cataracte est plusieurs fois inférieur à celui sur lequel se fondent les limites actuelles d'expositions admissibles (Chodick et al., 2008). Ces arguments suggèrent que les faibles doses efficaces cumulées enregistrées vers les années 2019 pourraient bien être en relation avec la forte incidence des maladies des yeux après 2017. Mais Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les travailleurs jeunes réalisaient plus d'examens que les travailleurs à âges avancés, qui généralement sont affectés aux travaux administratifs dans les centres. L'utilisation abusive des smartphones par la jeune génération pourrait en partie expliquer ces résultats. De plus, notre modèle d'estimation rétrospective des doses efficaces annuelles n'avait pas pris en compte la répétition des procédures radiologiques qui participent énormément à l'augmentation des doses. Ce risque accru peut être également du à des comportements imprudents des jeunes techniciens en imagerie médicale, sortis fraîchement de l'école de formation, qui appliquent très peu les règles de radioprotection. Nos résultats n'ont pas pu montrer que la probabilité de survenue des maladies des yeux augmente avec l'augmentation de

l'exposition aux rayonnements ionisants sans seuil apparent, tels qu'il a été décrit par certains auteurs (Chodick et al., 2008; Mark P. Little et al., 2018). Ces résultats permettent cependant, d'attirer l'attention des travailleurs de l'imagerie médicale sur les risques précoces de développement des maladies des yeux, dès leur début d'exposition au poste de travail. Ceci pourrait orienter les médecins de travail dans la méthodologie de surveillance des travailleurs exposés. Toutefois, des investigations doivent être menées afin de préciser l'effet des premières années d'exposition professionnelle dans la survenue de maladies des yeux.

Le risque d'avoir une masse sous-cutanée pour les travailleurs exposés était significativement élevé (HR = 3,3 [IC 95% : 1,2 ; 12,7]) même après ajustement sur les variables sexe, âge au début de l'emploi, année calendaire du début de l'emploi, consommation d'alcool, département (regroupement des centres par département sur le territoire béninois). De même un risque accru de survenue de masses sous-cutanées avait été montré chez les travailleurs ayant un âge inférieur ou égal à 28 ans. On note également un risque croissant d'apparition des masses sous-cutanées (HR = 2,5 [IC 95% : 0,6 ; 11,8]) et (HR = 3,8 [IC 95% : 1,3 ; 15,1]) avec l'augmentation des doses efficaces cumulées]0 ; 1] et supérieures à 1, respectivement. Contrairement aux maladies des yeux ces résultats n'étaient pas attendus, mais peuvent s'expliquer par les mêmes raisons de survenue de maladies des yeux évoquées précédemment. En effet, peu d'études ont examiné le risque de survenue de masses sous-cutanées suite à une exposition aux rayonnements ionisants. Il serait indiqué au niveau sous-régional, continental ou international que des études de cohortes soient réalisées en poursuivant la recherche de lien entre l'exposition aux rayonnements ionisants et la survenue de masses sous-cutanées. Une forte consommation d'alcool (HR = 7,6 [IC 95% : 2,2 ; 22,5]) était significativement associée à un facteur de risque plus élevé d'avoir une masse sous-cutanée. Ces résultats par contre étaient en lien avec ceux de la littérature. En effet, Sumi et al. au Japon en 2019 ont rapporté dans leur étude qu'une consommation hebdomadaire d'alcool plus élevée était fortement et

significativement associée à une masse sous-cutanée plus élevée (Sumi et al., 2019).

De manière générale, des différences statistiquement significatives ont été montrées entre les doses efficaces cumulées des travailleurs ayant déclaré des événements de santé (maladies des yeux et masse sous-cutanée) et ceux n'ayant rien déclaré. Ces résultats confirment néanmoins les effets néfastes des faibles doses de rayonnement sur les yeux et le tissu adipeux sous-cutané. Ces résultats suggèrent que la mise en évidence de ces différentes associations était nécessaire pour mettre en place des mesures de prévention adaptées pour les travailleurs dans des pays n'ayant pas encore un suivi dosimétrique opérationnel.

Enfin les relations dose-effet, statistiquement non significatives, montrées lors de cette thèse sont en lien avec les résultats des équivalents de dose ambiants (mesure à l'aide d'un radiamètre) et les doses efficaces annuelles et cumulées faibles (mesure à l'aide des dosimètres d'ambiance) constatés au chapitre 4 et 5. Par ailleurs, une différence significative des doses efficaces cumulées avait été observée entre les travailleurs ayant déclaré des événements de santé (maladies des yeux et masses sous-cutanées) et ceux n'ayant rien déclaré. De plus pour les deux événements de santé étudiés, des analyses ont été réalisées pour rechercher d'éventuels liens entre ces événements de santé et le fait d'avoir occupé des postes à la tomodensitométrie ou d'avoir travaillé dans des salles d'imagerie médicale dont les équivalents de dose ambiants étaient au dessus des niveaux de référence requis. Aucune association significative n'a pu être montrée lors de ces analyses. Ceci pourrait être dû au faible nombre de salles de tomodensitométrie et de postes de travail non conformes à la réglementation au Bénin.

7.3 PERSPECTIVES

A court terme, une confrontation de nos estimations de doses efficaces annuelles et cumulées à des bases des enregistrements reçus des suivis dosimétriques des travailleurs sur une durée donnée sera faite. Ceci permettra de tester notre modèle d'estimation rétrospective des doses

par méthode indirecte de modélisation et de prendre en compte les incertitudes sur l'estimation de la dose individuelle et donc sur l'estimation du risque radio-induit. Une session de restitution des travaux de thèse en général et en particulier des résultats de l'étude de morbidité serait réalisée, pour recueillir les avis des uns et des autres afin de mettre en place des actions diligentes.

A moyen terme, il serait intéressant de conduire une étude radiobiologique sur les masses sous-cutanées étudiées chez les travailleurs après l'établissement des preuves dosimétriques en lien avec la survenue de ces masses sous-cutanées et de pouvoir évaluer l'impact radiobiologique de ces effets. La seule étude radiobiologique retrouvée au Bénin était celle de Dossou et al. en 2014 sur l'accroissement des aberrations chromosomiques chez les travailleurs exposés dans quelques centres d'imagerie médicale du Bénin. La conduite des études continentales ou internationales regroupées avec la disponibilité de doses efficaces individuelles (Hp(10)) harmonisées de bonne qualité s'avère également opportune à envisager comme une troisième perspective. A cette occasion, il serait important de réaliser des examens médicaux pour le diagnostic des pathologies et leur classement plus standardisé, via un codage plus précis. Elle permettra de mieux caractériser l'association entre l'exposition et les masses sous-cutanées et les maladies des yeux. De manière générale, une cohorte internationale aurait une meilleure capacité à quantifier les risques à faibles doses et faibles débits de dose et permettrait d'obtenir une plus grande précision dans l'analyse de la relation dose-réponse, afin de valider les hypothèses actuelles du système de radioprotection.

A long terme, il pourrait être également envisagé, le prolongement du suivi prospectif de la cohorte des travailleurs exposés du Bénin et l'extension vers la prise en compte des risques liés aux autres types de rayonnements tels que gamma principalement, et bêta/alpha secondairement. Il serait intéressant de prendre en compte dans cette cohorte les informations relatives à la quantité d'alcool consommée et de cigarettes fumées par jour ou par semaine. Il est *à priori*

possible qu'il existe une association entre niveau de consommation d'alcool et de tabac et les évènements de santé recensés chez les travailleurs exposés. Le manque de ces informations avait limité sérieusement nos analyses sur la morbidité.

Enfin, ces études apporteront ainsi des éléments précieux à l'évaluation des normes internationales de radioprotection en ce qui concerne les effets sanitaires radio-induits.

8 CONCLUSION GENERALE

Des analyses dans une cohorte de cette taille sont les premières réalisées au Bénin sur les travailleurs médicaux. Elles viennent combler le manque d'informations dans ce domaine, même si elles présentent d'importantes limites à l'interprétation, en raison du manque de données sur les conditions d'expositions des travailleurs en matière de suivi dosimétrique et médical. Pour s'assurer du respect des normes nationales et internationales, une surveillance dosimétrique individuelle des travailleurs des services de la radiologie et des autres utilisateurs des rayonnements ionisants s'avère nécessaire pour maintenir une veille permanente des niveaux d'expositions professionnelles au Bénin. La mise en œuvre de programme d'assurance qualité (contrôle qualité) et de dosimétrie individuelle doit être suscitée dans tous les centres d'imagerie médicale et secteurs médicaux utilisant les rayonnements ionisants au Bénin pour surveiller les expositions des travailleurs, des patients et même du public.

L'importance de la surveillance dosimétrique et médicale est à souligner, vues les conclusions de cette étude. Elle permettra de prévenir les troubles développés en milieu professionnel dus à l'exposition aux rayonnements ionisants.

Enfin, nos résultats contribuent à l'amélioration des connaissances portant sur les effets sanitaires des expositions aux rayonnements ionisants et fournissent une base pour les instances internationales de radioprotection afin d'éditer de nouvelles normes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achuka, J.A., Usikalu, M.R., Aweda, M.A., Onumejor, C.A., Babarimisa, I.O., 2019. Background Radiation Dose in Selected X-Ray Facilities in Southwest Nigeria. *J. Phys. Conf. Ser.* 1299, 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1299/1/012103>
- Adjei, D., Darko, E.O., Schandorf, C., Owusu-Manteaw, P., Akrobortu, E., 2012. Personal dose analysis of TLD glow curve data from individual monitoring records. *Radiat. Prot. Dosimetry* 152, 273–278. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs069>
- Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation, 2019. Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes (CIM-10) (Table analytique No. 1). France.
- Ahmed, N.A., Nayl, A.I., Suliman, I.I., 2012. Equipment performance and radiation protection status in X-ray fluoroscopy units in Sudan. *Radiat. Prot. Dosimetry* 148, 174–180. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr006>
- Ainsbury, E.A., Dalke, C., Hamada, N., Benadjaoud, M.A., Chumak, V., Ginjaume, M., Kok, J.L., Mancuso, M., Sabatier, L., Struelens, L., Thariat, J., Jourdain, J.-R., 2021. Radiation-induced lens opacities: Epidemiological, clinical and experimental evidence, methodological issues, research gaps and strategy. *Environ. Int.* 146, 106213. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106213>
- Akyurt, N., 2021. Health-related quality of life among radiology technicians in Turkish hospitals: a cross sectional study. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 94, 1415–1425. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01723-w>
- Al-Abdulsalam, A., Brindhaban, A., 2014. Occupational Radiation Exposure among the Staff of Departments of Nuclear Medicine and Diagnostic Radiology in Kuwait. *Med. Princ. Pract.* 23, 129–133. <https://doi.org/10.1159/000357123>
- Allodji, R.S., Hawkins, M.M., Bright, C.J., Fidler-Benaoudia, M.M., Winter, D.L., Alessi, D., Fresneau, B., Journy, N., Morsellino, V., Bárdi, E., Bautz, A., Byrne, J., Feijen, E. (Lieke) AM., Teepen, J.C., Vu-Bezin, G., Rubino, C., Garwicz, S., Grabow, D., Gudmundsdottir, T., Guha, J., Hau, E.-M., Jankovic, M., Kaatsch, P., Kaiser, M., Linge, H., Muraca, M., Llanas, D., Veres, C., Øfstaas, H., Diallo, I., Mansouri, I., Ronckers, C.M., Skinner, R., Terenziani, M., Wesenberg, F., Wiebe, T., Sacerdote, C., Jakab, Z., Haupt, R., Lähteenmäki, P., Zaletel, L.Z., Kuehni, C.E., Winther, J.F., Michel, G., Kremer, L.C.M., Hjorth, L., Haddy, N., de Vathaire, F., Reulen, R.C., 2019. Risk of subsequent primary leukaemias among 69,460 five-year survivors of childhood cancer diagnosed from 1940 to 2008 in Europe: A cohort study within PanCareSurFup. *Eur. J. Cancer* 117, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2019.05.013>
- Alramlawi, S.A., Alsaqr, A.S., Zayat, D.M.A., Galal, M., 2015. Assessing the Occupational Radiation Doses for Medical Workers at Cairo University Hospital Based on Job Categories 4.
- Andriambololona, R., Ratovonjanahary, J.F., Randriantsizafy, R.D., Rakotoson, E., Razafindrabe, R.L., 2002. Thermoluminescence external personnel monitoring of workers in diagnostic radiology in Madagascar, in: *Hep-Mad '01*. Presented at the Proceedings of the First Madagascar International Conference on High-Energy Physics, World scientific, Antananarivo, Madagascar, pp. 13–15.

https://doi.org/10.1142/9789812776983_0003

- Antoni, R., Bourgois, L., 2013. *Physique appliquée à l'exposition externe: dosimétrie et radioprotection*. Springer, Paris.
- Azizova, T.V., Bannikova, M.V., Grigoryeva, E.S., Rybkina, V.L., 2018. Risk of malignant skin neoplasms in a cohort of workers occupationally exposed to ionizing radiation at low dose rates. *PloS One* 13, e0205060. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205060>
- Bayou, T., 1991. Levels of doses to radiological workers in Ethiopia: 1977-1988. *Ethiop Med J* 29, 119–26.
- Berrington, A., Darby, S.C., Weiss, H.A., Doll, R., 2001. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897–1997. *Br. J. Radiol.* 74, 507–519. <https://doi.org/10.1259/bjr.74.882.740507>
- Berrington de Gonzalez, A., Daniels, R.D., Cardis, E., Cullings, H.M., Gilbert, E., Hauptmann, M., Kendall, G., Laurier, D., Linet, M.S., Little, M.P., Lubin, J.H., Preston, D.L., Richardson, D.B., Stram, D., Thierry-Chef, I., Schubauer-Berigan, M.K., 2020. *Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Rationale and Framework for the Monograph and Overview of Eligible Studies*. *JNCI Monogr.* 2020, 97–113. <https://doi.org/10.1093/jncimonographs/lgaa009>
- Berrington de González, A., Ntowe, E., Kitahara, C.M., Gilbert, E., Miller, D.L., Kleinerman, R.A., Linet, M.S., 2016. Long-term Mortality in 43 763 U.S. Radiologists Compared with 64 990 U.S. Psychiatrists. *Radiology* 281, 847–857. <https://doi.org/10.1148/radiol.2016152472>
- Biop, C.N. des E. de, de, C. des enseignants de radiologie, professeurs, C. médical français des, Blondiaux, E., Cochet, A., Durand, E., Kremer, S., Montaudon, M., Parlier-Cuau, C., 2017. *Imagerie médicale: Les fondamentaux : radioanatomie, biophysique, techniques et séméiologie en radiologie et médecine nucléaire*. Elsevier Masson.
- Boice, J.D., Held, K.D., Shore, R.E., 2019. Radiation epidemiology and health effects following low-level radiation exposure. *J. Radiol. Prot.* 39, S14–S27. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab2f3d>
- Bourgois, L., Antoni, R., 2019. *Résolutions de problèmes sur les rayonnements ionisants: dosimétrie, instrumentation, protection radiologique de l'approche analytique à la résolution numérique Monte-Carlo via MCNP, Profil*. EDP sciences, Les Ulis.
- Breslow, N.E., Day, N.E., 1996. *Statistical methods in cancer research. Vol. 2: The design and analysis of cohort studies*, Reprinted. ed, IARC scientific publications. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- Brunette, J.J., 2005. Structural Shielding Design for Medical X-ray Imaging Facilities: *Health Phys.* 89, 183. <https://doi.org/10.1097/00004032-200508000-00012>
- Castle, B.W., Drinker, R.K., Drinker, K.C., 1925. Necrosis of the Jaw in Workers employed in applying a Luminous Paint containing Radium. *J Ind Hyg* 7, 371–82.
- Charles, M., 2001. UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation. *J. Radiol. Prot.* 21, 83–85. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/21/1/609>
- Chartier, H., Fassier, P., Leuraud, K., Jacob, S., Baudin, C., Laurier, D., Bernier, M.-O., 2020. Occupational low-dose irradiation and cancer risk among medical radiation workers. *Occup. Med.* 70, 476–484. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqaa130>
- Chinangwa, G., Amoako, J.K., Fletcher, J.J., 2018. Investigation of the status of occupational

- radiation protection in Malawian hospital. *Malawi Med. J.* 30, 22. <https://doi.org/10.4314/mmj.v30i1.5>
- Chinangwa, G., Amoako, J.K., Fletcher, J.J., 2017. Radiation dose assessment for occupationally exposed workers in Malawi. *Malawi Med. J.* 29, 254. <https://doi.org/10.4314/mmj.v29i3.5>
- Chodick, G., Bekiroglu, N., Hauptmann, M., Alexander, B.H., Freedman, D.M., Doody, M.M., Cheung, L.C., Simon, S.L., Weinstock, R.M., Bouville, A., Sigurdson, A.J., 2008. Risk of Cataract after Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation: A 20-Year Prospective Cohort Study among US Radiologic Technologists. *Am. J. Epidemiol.* 168, 620–631. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn171>
- Choi, Y., Kim, J., Lee, J.J., Jun, J.K., Lee, W.J., 2016. Reconstruction of Radiation Dose Received by Diagnostic Radiologic Technologists in Korea. *J. Prev. Med. Pub. Health* 49, 288–300. <https://doi.org/10.3961/jpmph.16.064>
- Choshi, K., Takaku, I., Mishima, H., Takase, T., Neriishi, S., Finch, S.C., Otake, M., 1983. Ophthalmologic changes related to radiation exposure and age in adult health study sample, Hiroshima and Nagasaki. *Radiat. Res.* 96, 560–579.
- Clement, C.H., Eckerman, K., Harrison, J., Menzel, H.-G., International Commission on Radiological Protection, 2012. *Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60*. Elsevier, Oxford, UK.
- Covens, P., Berus, D., de Mey, J., Buls, N., 2012. Mapping very low level occupational exposure in medical imaging: A useful tool in risk communication and decision making. *Eur. J. Radiol.* 81, e962–e966. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2012.06.014>
- D. R. Cox, 1972. Regression Models and Life-Tables. *J. R. Stat. Soc. Ser. B Methodol.* 34, 187–220.
- Dauda, A.M., Ozoh, J.O., Towobola, O.A., 2019. Medical doctors' awareness of radiation exposure in diagnostic radiology investigations in a South African academic institution. *South Afr. J. Radiol.* 23. <https://doi.org/10.4102/sajr.v23i1.1707>
- Davis, M.M., Hanke, C.W., Zollinger, T.W., Montebello, J.F., Hornback, N.B., Norins, A.L., 1989. Skin cancer in patients with chronic radiation dermatitis. *J. Am. Acad. Dermatol.* 20, 608–616. [https://doi.org/10.1016/S0190-9622\(89\)70072-4](https://doi.org/10.1016/S0190-9622(89)70072-4)
- Doody, M.M., Freedman, D.M., Alexander, B.H., Hauptmann, M., Miller, J.S., Rao, R.S., Mabuchi, K., Ron, E., Sigurdson, A.J., Linet, M.S., 2006. Breast cancer incidence in U.S. radiologic technologists. *Cancer* 106, 2707–2715. <https://doi.org/10.1002/cncr.21876>
- Dossou, J., Abinda, S.G.G.-M., Adjagba, M., Loko, F.S., Darboux, R., Laleye, A., 2014. Study cytogenetics aberrations chromosome in workers under x-rays. *J. Rech. En Sci. Univ. Lomé* 16, 35–45.
- Dpmed-Ministry of Health, 2019. *Imagerie médicale | Direction de la pharmacie, du médicament et des explorations diagnostiques [WWW Document]*. URL http://dpmed-benin.bj/site/imagerie_medicale (accessed 3.18.20).
- Eheman, C.R., Tolbert, P.E., 1999. Estimating occupational radiation doses when individual dosimetry information is not available: A job exposure matrix. *Am. J. Ind. Med.* 36, 348–359. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199909\)36:3<348::AID-AJIM2>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199909)36:3<348::AID-AJIM2>3.0.CO;2-R)

- Eze, C., Irurhe, N., Njoku, J., Olowu, O., Abonyi, L., 2013. Assessment of radiation protection practices among radiographers in Lagos, Nigeria. *Niger. Med. J.* 54, 386. <https://doi.org/10.4103/0300-1652.126290>
- Eze, K., Marchie, T., Eze, T., Nzotta, C., Okegbunam, B., 2011. The state of occupational radiation protection and monitoring in public and private X-ray facilities in Edo state, Nigeria. *Niger. J. Clin. Pract.* 14, 308. <https://doi.org/10.4103/1119-3077.86774>
- Falissard, B., 2005. *Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vie*, 3e éd. ed, Abrégés. Masson, Issy-les-Moulineaux.
- Farai, P., I., Obed, I., R., 2001. Occupational Radiation Protection Dosimetry in Nigeria. *Radiat. Prot. Dosimetry* 95, 53–58. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006524>
- Fournier, L., 2017. Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire. Paris Saclay, Fontenay-aux-roses.
- Fournier, L., Laurent, O., Samson, E., Caër-Lorho, S., Laroche, P., Le Guen, B., Laurier, D., Leuraud, K., 2016. External radiation dose and cancer mortality among French nuclear workers: considering potential confounding by internal radiation exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 89, 1183–1191. <https://doi.org/10.1007/s00420-016-1152-4>
- Freedman, D.M., Sigurdson, A., Rao, R.S., Hauptmann, M., Alexander, B., Mohan, A., Doody, M.M., Linet, M.S., 2003. Risk of melanoma among radiologic technologists in the United States. *Int. J. Cancer* 103, 556–562. <https://doi.org/10.1002/ijc.10854>
- Gbetchedji, A.A., Houndetoungan, G.D., Hounsossou, H.C., Journy, N., Haddy, N., Rubino, C., Biaou, O., Medenou, D., Amoussou-Guenou, K.M., de Vathaire, F., Allodji, R.S., 2020. A systematic review of occupational radiation individual dose monitoring among healthcare workers exposed in Africa. *J. Radiol. Prot.* 40, R141–R150. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aba402>
- Gilbert, E.S., 1983. An evaluation of several methods for assessing the effects of occupational exposure to radiation. *Biometrics* 39, 161–171.
- Gordon, S.W., Schandorf, C., Yeboah, J., 2011. Optimization of radiation protection for the control of occupational exposure in Ghana. *Radiat. Prot. Dosimetry* 147, 386–393. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq465>
- Government of Benin, 2020. Search results - Radiological Safety [WWW Document]. Secrétariat Général Gouv. Bénin. URL <https://sgg.gouv.bj/recherche/?begin=2018-03-01&end=2020-03-18&keywords=suret%C3%A9%20radiologique&type=loi> (accessed 3.18.20).
- Government of Benin, 2018. Search results - National Safety Authority [WWW Document]. Secrétariat Général Gouv. Bénin. URL <https://sgg.gouv.bj/recherche/?begin=2018-03-01&end=2020-03-18&keywords=Autorit%C3%A9%20nationale%20de%20s%C3%BBret%C3%A9&type=decret> (accessed 3.18.20).
- Haider, M., Shill, S., Nizam, Q.M.R., Akramuzzaman, M., 2014. Shielding calculation based on NCRP methodologies for some diagnostic x-ray facilities in Bangladesh. 8.
- Hasford, F., Owusu-Banahene, J., Amoako, J.K., Otoo, F., Darko, E.O., Emi-Reynolds, G., Yeboah, J., Arwui, C.C., Adu, S., 2012. Assessment of annual whole-body occupational

- radiation exposure in medical practice in Ghana (2000-09). *Radiat. Prot. Dosimetry* 149, 431–437. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr318>
- Hauptmann, M., Daniels, R.D., Cardis, E., Cullings, H.M., Kendall, G., Laurier, D., Linet, M.S., Little, M.P., Lubin, J.H., Preston, D.L., Richardson, D.B., Stram, D.O., Thierry-Chef, I., Schubauer-Berigan, M.K., Gilbert, E.S., Berrington de Gonzalez, A., 2020. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *JNCI Monogr.* 2020, 188–200. <https://doi.org/10.1093/jncimonographs/lgaa010>
- Henshaw, P.S., Hawkins, J.W., Meyer, H.L., Woodruff, J., Marshall, J.F., 1944. Incidence of leukemia in physicians. *Radiology* 43, 275–278.
- Hiller, R., Sperduto, R.D., Ederer, F., 1986. Epidemiologic associations with nuclear, cortical, and posterior subcapsular cataracts. *Am. J. Epidemiol.* 124, 916–925. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114481>
- Hirose, A., Okada, Y., Morita, E., Tanaka, Y., 2006. Benign Symmetric Lipomatosis Associated with Alcoholism. *Intern. Med.* 45, 1001–1005. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.45.1791>
- Iakovleva, V.I., 1978. [Formation of neoplasms in dogs after chronic gamma irradiation at a low-intensity dose]. *Kosm. Biol. Aviakosm. Med.* 12, 61–67.
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2021. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : Bilan 2020 (No. 1). Paris.
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2020. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants (Bilan 2014-2019) (No. 1). Paris.
- Institut de Veille Sanitaire, 2010. Doses délivrées aux patients en scanographie et radiologie conventionnelle. Résultats d’une enquête multicentrique en secteur public (No. 2010–12). Institut de Veille Sanitaire, Paris.
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2010. Radiologie conventionnelle : Installations fixes en milieu médical.
- Institut national du cancer, 2020. Les traitements du cancer du pancréas.
- International Atomic Energy Agency, 2018. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation: specific safety guide. Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 2014. The information system on occupational exposure in medicine, industry and research (ISEMIR): industrial radiography.
- International Atomic Energy Agency, A., 2016. Radiation protection and safety of radiation sources: Basic international safety standards, Promotion and Sales Unit, Publishing Section. ed, IAEA Safety Standards N° GSR Part 3. AIEA, Vienne.
- International Atomic Energy Agency, European Commission, 2014. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements.
- International Atomic Energy Agency, International Labour Office, 2018. Occupational radiation protection: general safety guide.
- International Commission on Radiation Units and Measurements, 1985. Report 39. *J. Int. Comm. Radiat. Units Meas.* os20, NP-NP. <https://doi.org/10.1093/jicru/os20.2.Report39>
- International Commission on Radiological Protection, 1991. Recommendations of the

- International Commission on Radiological Protection, 1. ed. ed, ICRP publication Radiation protection. Pergamon Press, Oxford.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2011. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department (Annals of the ICRP No. XXX). Oxford.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1997. General principles for the radiation protection of workers, ICRP publication. Pergamon, Oxford.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1975. Report of the task group on Reference Man (No. 23). Pergamon Press, Oxford.
- Jablon, S., Miller, R.W., 1978. Army Technologists: 29-Year Follow Up for Cause of Death. *Radiology* 126, 677–679. <https://doi.org/10.1148/126.3.677>
- Journy, N., Mansouri, I., Allodji, R.S., Demoor-Goldschmidt, C., Ghazi, D., Haddy, N., Rubino, C., Veres, C., Zrafi, W.S., Rivera, S., Diallo, I., De Vathaire, F., 2019. Volume effects of radiotherapy on the risk of second primary cancers: A systematic review of clinical and epidemiological studies. *Radiother. Oncol.* 131, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.09.017>
- Kim, K.H., Oh, S.-W., Kwon, H., Park, J.-H., Choi, H., Cho, B., 2012. Alcohol Consumption and Its Relation to Visceral and Subcutaneous Adipose Tissues in Healthy Male Koreans. *Ann. Nutr. Metab.* 60, 64–73. <https://doi.org/10.1159/000334710>
- Korir, G.K., Wambani, J.S., Korir, I.K., 2011. Estimation of annual occupational effective doses from external ionising radiation at medical institutions in Kenya. *South Afr. J. Radiol.* 15, 116. <https://doi.org/10.4102/sajr.v15i4.353>
- Laurier, D., Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., Gillies, M., O'Hagan, J., Hamra, G.B., Haylock, R., Leuraud, K., Moissonnier, M., Schubauer-Berigan, M.K., Thierry-Chef, I., Kesminiene, A., 2017. The International Nuclear Workers Study (Inworks): A Collaborative Epidemiological Study to Improve Knowledge About Health Effects of Protracted Low-Dose Exposure. *Radiat. Prot. Dosimetry* 173, 21–25. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw314>
- Le Guen, B., 2006. Effet des faibles doses des rayonnements ionisants sur l'homme. *Hydroécologie Appliquée* 15, 107–122. <https://doi.org/10.1051/hydro:2006001>
- Lee, W.J., Bang, Y.J., Cha, E.S., Kim, Y.M., Cho, S.B., 2021. Lifetime cancer risks from occupational radiation exposure among workers at interventional radiology departments. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 94, 139–145. <https://doi.org/10.1007/s00420-020-01569-8>
- Linnet, M.S., 2005. Incidence of haematopoietic malignancies in US radiologic technologists. *Occup. Environ. Med.* 62, 861–867. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.020826>
- Linnet, M.S., Kim, K.P., Miller, D.L., Kleinerman, R.A., Simon, S.L., de Gonzalez, A.B., 2010. Historical Review of Occupational Exposures and Cancer Risks in Medical Radiation Workers. *Radiat. Res.* 174, 793–808. <https://doi.org/10.1667/RR2014.1>
- Little, M.P., 2013. A review of non-cancer effects, especially circulatory and ocular diseases. *Radiat. Environ. Biophys.* 52, 435–449. <https://doi.org/10.1007/s00411-013-0484-7>
- Little, Mark P., Kitahara, C.M., Cahoon, E.K., Bernier, M.-O., Velazquez-Kronen, R., Doody, M.M., Borrego, D., Miller, J.S., Alexander, B.H., Simon, S.L., Preston, D.L., Hamada, N., Linnet, M.S., Meyer, C., 2018. Occupational radiation exposure and risk of cataract

- incidence in a cohort of US radiologic technologists. *Eur. J. Epidemiol.* 33, 1179–1191. <https://doi.org/10.1007/s10654-018-0435-3>
- Little, Mark P, Wakeford, R., Borrego, D., French, B., Zablotska, L.B., Adams, M.J., Allodji, R., de Vathaire, F., Lee, C., Brenner, A.V., Miller, J.S., Campbell, D., Pearce, M.S., Doody, M.M., Holmberg, E., Lundell, M., Sadetzki, S., Linet, M.S., Berrington de González, A., 2018. Leukaemia and myeloid malignancy among people exposed to low doses (<100 mSv) of ionising radiation during childhood: a pooled analysis of nine historical cohort studies. *Lancet Haematol.* 5, e346–e358. [https://doi.org/10.1016/S2352-3026\(18\)30092-9](https://doi.org/10.1016/S2352-3026(18)30092-9)
- Maalej, M., Hentati, D., Slimène, M., Kanoun, S., Héliche, M., Ben Romdhane, K., Ben Abdallah, M., 2007. [Skin cancer in Tunisia: a retrospective study: 1379 cases and risk factors]. *Tunis. Med.* 85, 728–733.
- Mashima, E., Sawada, Y., Nakamura, M., 2021. Recent Advancement in Atypical Lipomatous Tumor Research. *Int. J. Mol. Sci.* 22, 994. <https://doi.org/10.3390/ijms22030994>
- McCarty, C.A., Mukesh, B.N., Fu, C.L., Taylor, H.R., 1999. The epidemiology of cataract in Australia. *Am. J. Ophthalmol.* 128, 446–465. [https://doi.org/10.1016/S0002-9394\(99\)00218-4](https://doi.org/10.1016/S0002-9394(99)00218-4)
- Memon, A., Godward, S., Williams, D., Siddique, I., Al-Saleh, K., 2010. Dental x-rays and the risk of thyroid cancer: A case-control study. *Acta Oncol.* 49, 447–453. <https://doi.org/10.3109/02841861003705778>
- Ministère du Travail, de la Fonction Publique et des Affaires Sociales, Ministère de la Santé de la République du Bénin, 2017. Arrêté interministériel portant règles particulières de sécurité et de santé au travail des travailleurs affectés aux travaux sous rayonnements ionisants.
- Ministère du Travail et de la Fonction Publique, Ministère de la Santé, 2006. Arrêté interministériel portant conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées.
- Ministry of culture and communication, 2005. Annual report of the General Commission of Terminology and Neology. Prime Minister, France.
- Mohan, A.K., 2002. Breast Cancer Mortality Among Female Radiologic Technologists in the United States. *CancerSpectrum Knowl. Environ.* 94, 943–948. <https://doi.org/10.1093/jnci/94.12.943>
- Molenaar, E.A., Massaro, J.M., Jacques, P.F., Pou, K.M., Ellison, R.C., Hoffmann, U., Pencina, K., Shadwick, S.D., Vasan, R.S., O'Donnell, C.J., Fox, C.S., 2009. Association of Lifestyle Factors With Abdominal Subcutaneous and Visceral Adiposity: The Framingham Heart Study. *Diabetes Care* 32, 505–510. <https://doi.org/10.2337/dc08-1382>
- Moriña, D., Grellier, J., Carnicer, A., Pernot, E., Ryckx, N., Cardis, E., 2016. InterCardioRisk: a novel online tool for estimating doses of ionising radiation to occupationally-exposed medical staff and their associated health risks. *J. Radiol. Prot.* 36, 561–578. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/3/561>
- Muhogora, W.E., Byorushengo, E., Lema, U.S., Mboya, G., Ngatunga, J.B., Sawe, S.,

- Katsidzita, N.M., Mikidadi, S., Chuma, F., Marco, A., Hamed, M.I., 2013. Occupational radiation exposure in Tanzania (1996-2010): status and trends. *Radiat. Prot. Dosimetry* 153, 403–410. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs125>
- Muhogora, W.E., Nyanda, A.M., Ngaile, J.E., Lema, U.S., 1997. Occupational dose trends in Tanzania 7.
- National Research Council, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation (BEIR VII) Phase 2 (No. BEIR VII). Washington, DC.
- Nefzger, M.D., Miller, R.J., Fujino, T., 1969. Eye findings in atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki: 1963–1964. *Am. J. Epidemiol.* 89, 129–138. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a120922>
- Neossi Guena, Bayiha Mboua J., Alpha Zilbinkai F., Moifo B., 2018. Evaluation of the level of implementation of Radiation protection in the Regional Medical Imaging Centers of Cameroun. *J. Afr. Imag. Médicale* 10, 138–147.
- Nzotta, C.C., Chiaghanam, N.O., 2010. Occupational Radiation Dose to X-ray workers in Radiological units in South Eastern Nigeria 3.
- Ogundare, F.O., A. Balogun, F., 2003. Analysis of occupational doses of workers on the dose registry of the Federal Radiation Protection Service in 2000 and 2001. *Radiat. Prot. Dosimetry* 103, 57–62. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006116>
- Ogundare, F.O., Balogun, F.A., 2003. Whole-body doses of occupationally exposed female workers in Nigeria (1999–2001). *J. Radiol. Prot.* 23, 201–208. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/23/2/307>
- Okeji, M., Anakwue, A., Agwuna, K., 2010. Radiation exposure from diagnostic radiography: an assessment of X-ray beam collimation practice in some Nigerian Hospitals. *Internet J. Med. Update - EJournal* 5. <https://doi.org/10.4314/ijmu.v5i2.56160>
- Osei, E.K., 1997. Occupational Radiation Exposure in Ghana. *Radiat. Prot. Dosimetry* 71, 207–214. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032054>
- Ozasa, K., Takahashi, I., Grant, E.J., 2016. Radiation-related risks of non-cancer outcomes in the atomic bomb survivors. *Ann. ICRP* 45, 253–261. <https://doi.org/10.1177/0146645316629318>
- Parikh, J.R., Geise, R.A., Bluth, E.I., Bender, C.E., Sze, G., Jones, A.K., for the Human Resources Commission of the American College of Radiology, 2017. Potential Radiation-Related Effects on Radiologists. *Am. J. Roentgenol.* 208, 595–602. <https://doi.org/10.2214/AJR.16.17212>
- Parlement de la France, 1910. Code du travail.
- Parlement du Bénin, 1998. Code du travail.
- Pauwels, E.K.J., Bourguignon, M.H., 2012. Radiation Dose Features and Solid Cancer Induction in Pediatric Computed Tomography. *Med. Princ. Pract.* 21, 508–515. <https://doi.org/10.1159/000337404>
- Picano, E., Vano, E., Domenici, L., Bottai, M., Thierry-Chef, I., 2012. Cancer and non-cancer brain and eye effects of chronic low-dose ionizing radiation exposure. *BMC Cancer* 12, 157. <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
- Pierce, D.A., Preston, D.L., 2000. Radiation-Related Cancer Risks at Low Doses among Atomic Bomb Survivors. *Radiat. Res.* 154, 178–186. [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2000\)154\[0178:RRCRAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)154[0178:RRCRAL]2.0.CO;2)

- Pierce, D.A., Shimizu, Y., Preston, D.L., Vaeth, M., Mabuchi, K., 1996. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990. *Radiat. Res.* 146, 1–27.
- Preston, D.L., Pierce, D.A., Shimizu, Y., Cullings, H.M., Fujita, S., Funamoto, S., Kodama, K., 2004. Effect of Recent Changes in Atomic Bomb Survivor Dosimetry on Cancer Mortality Risk Estimates. *Radiat. Res.* 162, 377–389. <https://doi.org/10.1667/RR3232>
- Pukkala, E., Martinsen, J.I., Lynge, E., Gunnarsdottir, H.K., Sparén, P., Tryggvadottir, L., Weiderpass, E., Kjaerheim, K., 2009. Occupation and cancer – follow-up of 15 million people in five Nordic countries. *Acta Oncol.* 48, 646–790. <https://doi.org/10.1080/02841860902913546>
- Rajaraman, P., Doody, M.M., Yu, C.L., Preston, D.L., Miller, J.S., Sigurdson, A.J., Freedman, D.M., Alexander, B.H., Little, M.P., Miller, D.L., Linet, M.S., 2016. Incidence and mortality risks for circulatory diseases in US radiologic technologists who worked with fluoroscopically guided interventional procedures, 1994–2008. *Occup. Environ. Med.* 73, 21–27. <https://doi.org/10.1136/oemed-2015-102888>
- Rehel, J.-L., 2008. 6ème Rencontres des Personnes compétentes en radioprotection SFRP.
- Richardson, D.B., 2008. A Simple Approach for Fitting Linear Relative Rate Models in SAS. *Am. J. Epidemiol.* 168, 1333–1338. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn278>
- Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., Gillies, M., O'Hagan, J.A., Hamra, G.B., Haylock, R., Laurier, D., Leuraud, K., Moissonnier, M., Schubauer-Berigan, M.K., Thierry-Chef, I., Kesminiene, A., 2015. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
- Robert N, Cherry Jr, n.d. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail. *Encycl. Sécurité Santé Au Trav.*
- Röntgen, W.C., 1896. On a new kind of rays. *Science* 3, 227–231. <https://doi.org/10.1126/science.3.59.227>
- Salama, K., AlObireed, A., AlBagawi, M., AlSufayan, Y., AlSerheed, M., 2016. Assessment of occupational radiation exposure among medical staff in health-care facilities in the Eastern Province, Kingdom of Saudi Arabia. *Indian J. Occup. Environ. Med.* 20, 21. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.183832>
- Samer S. Abu Zer, Khalid, J.K., Samir S. Yassin, Mohamed R. Al Agha, 2016. Ionizing Radiation Leakage in Radio-Diagnostic Centers at Gaza Strip Hospitals, Palestine. *Asian Rev. Environ. Earth Sci.* 3, 18–26. <https://doi.org/10.20448/journal.506/2016.3.1/506.1.18.26>
- Shimizu, Y., Kato, H., Schull, W.J., Hoel, D.G., 1992. Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950-1985: Part 3. Noncancer mortality based on the revised doses (DS86). *Radiat. Res.* 130, 249–266.
- Simon, S.L., Weinstock, R.M., Doody, M.M., Neton, J., Wenzl, T., Stewart, P., Mohan, A.K., Yoder, R.C., Hauptmann, M., Freedman, D.M., Cardarelli, J., Feng, H.A., Bouville, A., Linet, M., 2006. Estimating Historical Radiation Doses to a Cohort of U.S. Radiologic Technologists. *Radiat. Res.* 166, 174–192. <https://doi.org/10.1667/RR3433.1>
- Skam, D.J., Ibeanu, I.G., Y. Ibrahim Zakari, Zira, D.J., 2017. Radiographic Room Design and Layout for Radiation Protection in Some Radio-Diagnostic Facilities in Katsina State,

- Nigeria. *J. Assoc. Radiogr. Niger.*
- Smith-Bindman, R., Miglioretti, D.L., Johnson, E., Lee, C., Feigelson, H.S., Flynn, M., Greenlee, R.T., Kruger, R.L., Hornbrook, M.C., Roblin, D., Solberg, L.I., Vanneman, N., Weinmann, S., Williams, A.E., 2012. Use of Diagnostic Imaging Studies and Associated Radiation Exposure for Patients Enrolled in Large Integrated Health Care Systems, 1996-2010. *JAMA* 307, 2400–9. <https://doi.org/10.1001/jama.2012.5960>
- Sont, W.N., Zielinski, J.M., Ashmore, J.P., Jiang, H., Krewski, D., Fair, M.E., Band, P.R., Létourneau, E.G., 2001. First Analysis of Cancer Incidence and Occupational Radiation Exposure Based on the National Dose Registry of Canada. *Am. J. Epidemiol.* 153, 309–318. <https://doi.org/10.1093/aje/153.4.309>
- Suliman, A., Elzaki, M., Khalil, M., 2011. Occupational exposure to staff during endoscopic retrograde cholangiopancreatography in Sudan. *Radiat. Prot. Dosimetry* 144, 530–533. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq353>
- Suliman, I.I., Ibraheem, S.B., Youssif, B.E., Abdelgabar, M.I., Gafar, R., Elshiekh, E., Ahmed, N.A., Suliman, A., 2015. Examination frequency and population dose from medical X-ray examinations in Sudan in 2010. *Radiat. Prot. Dosimetry* 165, 141–145. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv106>
- Sumi, M., Hisamatsu, T., Fujiyoshi, A., Kadota, A., Miyagawa, N., Kondo, K., Kadowaki, S., Suzuki, S., Torii, S., Zaid, M., Sato, A., Arima, H., Terada, T., Miura, K., Ueshima, H., 2019. Association of Alcohol Consumption With Fat Deposition in a Community-Based Sample of Japanese Men: The Shiga Epidemiological Study of Subclinical Atherosclerosis (SESSA). *J. Epidemiol.* 29, 205–212. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20170191>
- Sun, Q., Mao, W., Jiang, H., Zhang, X., Xiao, J., Lian, Y., 2018. The Effect of Protracted Exposure to Radiation on Liver Injury: A Cohort Study of Industrial Radiographers in Xinjiang, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 71. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010071>
- Sun, Z., Inskip, P.D., Wang, J., Kwon, D., Zhao, Y., Zhang, L., Wang, Q., Fan, S., 2016. Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic x-ray workers, 1950-1995: Estimation of radiation-related risks: Solid cancer risk among Chinese medical X-ray workers. *Int. J. Cancer* 138, 2875–2883. <https://doi.org/10.1002/ijc.30036>
- Tapsoba, T.L., Ouattara, F., Ouédraogo, S., Sanon, H., Yanaba, D.H., Gansonré, V., 2012. État du suivi dosimétrique des travailleurs dans les services de radiologie de la ville de Ouagadougou. *Médecine Nucl.* 36, 539–544. <https://doi.org/10.1016/j.mednuc.2012.08.012>
- Thayalan, K., 2014. *The physics of radiology and imaging*, First edition. ed. Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, New Delhi, India ; Philadelphia.
- Totten, R.S., Antypas, P.G., Dupertuis, S.M., Gaisford, J.C., White, W.L., 1957. Pre-existing roentgen-ray dermatitis in patients with skin cancer. *Cancer* 10, 1024–1030. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(195709/10\)10:5<1024::AID-CNCR2820100524>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0142(195709/10)10:5<1024::AID-CNCR2820100524>3.0.CO;2-E)
- Ulrich, H., 1946. The incidence of leukemia in radiologists. *N Engl J Med* 234, 45–46.
- United Nations, 2021. *Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (No. 67 and 68 th)*. United Nations, New York.

- United Nations (Ed.), 2010. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.
- United Nations and Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2016. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (No. 46). United Nations, New York.
- United Nations, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2018. Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR 2017 report to the General Assembly, with scientific annexes.
- United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, General Assembly, 2008. Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.
- University of Maiduguri, Nkubli, F., Nzotta, C., Nnamdi Azikiwe University, Nwobi, N., University of Maiduguri, Moi, S., University of Maiduguri, Adejoh, T., Nnamdi Azikiwe University Teaching Hospital, Luntsi, G., University of Maiduguri, Dlama, J., Abubakar Tafawa Balewa University Teaching Hospital, Shem, L., State Specialists Hospital, 2017. A Survey of Structural Design of Diagnostic X-ray Imaging Facilities and Compliance to Shielding Design Goals in a Limited Resource Setting. *J. Glob. Radiol.* 3. <https://doi.org/10.7191/jgr.2017.1041>
- Wang, F.-R., Fang, Q.-Q., Tang, W.-M., Xu, X.-S., Mahapatra, T., Mahapatra, S., Liu, Y.-F., Yu, N.-L., Sun, Q.-F., 2015. Nested Case-control Study of Occupational Radiation Exposure and Breast and Esophagus Cancer Risk among Medical Diagnostic X Ray Workers in Jiangsu of China. *Asian Pac. J. Cancer Prev.* 16, 4699–4704. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2015.16.11.4699>
- Wang, J.X., Zhang, L.A., Li, B.X., Zhao, Y.C., Wang, Z.Q., Zhang, J.Y., Aoyama, T., 2002. Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1995: *Health Phys.* 82, 455–466. <https://doi.org/10.1097/00004032-200204000-00004>
- Wernli, C., Scherrer, P., 2004. External Dosimetry: Operational Quantities and their Measurement.
- Wilde, G., Sjostrand, J., 1997. A clinical study of radiation cataract formation in adult life following gamma irradiation of the lens in early childhood. *Br. J. Ophthalmol.* 81, 261–266. <https://doi.org/10.1136/bjo.81.4.261>
- Williams, D., 2002. Cancer after nuclear fallout: lessons from the Chernobyl accident. *Nat. Rev. Cancer* 2, 543–549. <https://doi.org/10.1038/nrc845>
- Wright, C.Y., Norval, M., 2021. Health Risks Associated With Excessive Exposure to Solar Ultraviolet Radiation Among Outdoor Workers in South Africa: An Overview. *Front. Public Health* 9, 678680. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.678680>
- Xu, X.-S., Zhang, L.-A., Sun, Q.-F., Qin, Y.-C., Yu, N.-L., 2018. Estimation of the occupational exposure dose for medical diagnostic X-ray workers in Jiangsu, China, using a retrospective dosimetry method. *J. Radiat. Res. (Tokyo)* 59, 141–148. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx073>
- Yakoro, A., Ouédraogo, N., Traoré, S., 2010. First assessment of individual monitoring of

- medical workers occupationally exposed to ionizing radiation in Burkina Faso 7.
- Yoshinaga, S., Hauptmann, M., Sigurdson, A.J., Doody, M.M., Freedman, D.M., Alexander, B.H., Linet, M.S., Ron, E., Mabuchi, K., 2005. Nonmelanoma skin cancer in relation to ionizing radiation exposure among U.S. radiologic technologists. *Int. J. Cancer* 115, 828–834. <https://doi.org/10.1002/ijc.20939>
- Yoshinaga, S., Mabuchi, K., Sigurdson, A.J., Doody, M.M., Ron, E., 2004. Cancer Risks among Radiologists and Radiologic Technologists: Review of Epidemiologic Studies. *Radiology* 233, 313–321. <https://doi.org/10.1148/radiol.2332031119>
- Yoshinaga, S., Yamamoto, Y., Aoyama, T., Yoshimoto, Y., 1998. Results and Problems of Occupational Dose Reconstruction for Japanese Radiological Technologists. *Radiat. Prot. Dosimetry* 77, 73–78. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032298>
- Zaichick, V., 2013. Data for the Reference Man: skeleton content of chemical elements. *Radiat. Environ. Biophys.* 52, 65–85. <https://doi.org/10.1007/s00411-012-0448-3>
- Zhang, L., Jia, D., Chang, H., Zhan, W., Dai, G., Ku, M., Zhao, Y., Zhang, C., Aoyama, T., Norimura, T., Sugahara, T., 1998. A Retrospective Dosimetry Method for Occupational Dose for Chinese Medical Diagnostic X-Ray Workers. *Radiat. Prot. Dosimetry* 77, 69–72. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032297>

ANNEXE

PARTIE 1

IDENTIFIANT DU TRAVAILLEUR : |__|__|-|__|__|__| (à ne pas renseigner par l'enquêteur)

Nom et prénom :

Numéro de téléphone :

**Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements X
des centres d'imagerie médicale du Bénin.**

**Cible : TRAVAILLEURS EXPOSES - travailleurs exposés aux rayonnements ionisants
(ingénieurs, techniciens et aides soignants qui accèdent en zone contrôlée et/ou surveillée)**

QUESTIONNAIRE 1

RENSEIGNEMENTS GENERAUX

Identification du travailleur (ingénieurs, techniciens et aides-soignants qui accèdent en zone contrôlée et/ou surveillée)

01. Numéro : |_|_|-|_|_|_|_| (à ne pas renseigner par l'enquêteur)

02. Date : |_|_|/|_|_|/|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

03. Sexe : Masculin 0 Féminin 1

04. Date de naissance : |_|_|/|_|_|/|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

05. Catégorie socio-professionnelle (Tech/Ing en radiologie ou imagerie médicale/Radiologue/Autres): _____

(Variable autres à créer)

06. Nombre d'enfants : |_|_|

07. Date de première prise de service : |_|_|/|_|_|/|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

08. Carrière :

Structure 01	Durée au poste 02	Congés (adm et tech) 03	Temps de travail/jr sous Rx/par poste 04					
	_ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ Jours Date :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	

QUESTIONNAIRE 1

09. Avez-vous fait valoir vos droits à la retraite ? Non 0 Oui 1

10. Si oui fournissez la date de mise à la retraite : |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_|_|
(jj/mm/aaaa)

11. Travaillez-vous dans d'autres unités de radiologie après votre admission à la retraite ?

Non 0 Oui 1

12. Si oui renseigner le tableau ci-dessous

Structure 01	Durée au poste 02	Congés (adm et tech) 03	Temps de travail/jr sous Rx/par poste 04					
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H Scopie	_ _ _ H Radio	_ _ _ H Scan	_ _ _ H Mamo	_ _ _ H Dentaire	

RENSEIGNEMENTS SPECIFIQUES

Risque radiologique

13. Avez-vous reçu des cours de radioprotection après votre formation académique ?

Non 0 Oui 1

14. Séjournez-vous en zone contrôlée pendant la réalisation des examens ?

QUESTIONNAIRE 1

Non 0 Oui 1

15. Séjournez-vous en zone surveillée pendant la réalisation des examens ?

Non 0 Oui 1

16. Portez-vous des Equipements de Protection Individuelle - EPI (tablier plombé, cache-thyroïde, cache-gonade), lorsque vous devez séjourner dans une zone contrôlée pendant la réalisation des examens ? Non 0 Oui 1

17. Faites-vous de la maintenance préventive pour les EPI ? Non 0 Oui 1

18. Si oui à quelle périodicité ? 1-2 ans 0 2-4 ans 1 2-6 ans 2 > 6 ans 3

Risque chimique

19. Faites-vous du développement manuel/automatique des clichés ? Non 0 Oui 1

20 . Si oui, pendant combien de temps par jour ?

Structure 01	Nombre de jours au poste de développement	Temps développement /jr 02
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H

21. Utilisez-vous des gants en latex pour le développement ? Non 0 Oui 1

22. Utilisez-vous des cintres pour le développement ? Non 0 Oui 1

23. Utilisez-vous des masques protège nez spécifiques pour le développement ?

Non 0 Oui 1

Surveillance dosimétrique et médicale

24. Êtes-vous sous surveillance dosimétrique ? Non 0 Oui 1

25. Si oui ; quelle est la périodicité ? 1mois 0 3 mois 1 6 mois 2 1 ans 3

QUESTIONNAIRE 1

26. Portez-vous un dosimètre passif/opérationnel lorsque vous séjournez en zone surveillée ou zone contrôlée ?

Non 0 Oui 1 Oui mais données non disponibles 2

27. Si oui quelles sont les valeurs des cumuls de doses annuelles reçues dans la période pendant laquelle vous avez travaillé au poste actuel ? (Créer un autre masque avec le même identifiant)

Structure 01	Année 02	Doses/an (mSv) 03
	_ _ _ _ _ Année	_ _ _ _ _ , _ _ _ _ _
	_ _ _ _ _ Année	_ _ _ _ _ , _ _ _ _ _
	_ _ _ _ _ Année	_ _ _ _ _ , _ _ _ _ _
	_ _ _ _ _ Année	_ _ _ _ _ , _ _ _ _ _
	_ _ _ _ _ Année	_ _ _ _ _ , _ _ _ _ _

28. Êtes-vous sous surveillance médicale ? Non 0 Oui 1

29. Si oui ; quelle est la périodicité ? < 6 mois 0 1 an 1 2 ans 2 3 ans 3 > 4 ans 4

30. Êtes-vous fumeur ? Non 0 Oui 1

31. Prenez-vous des boissons alcoolisées ? Rare 0 souvent 1 toujours 2

Morbidité (depuis 1958)

32. Avez-vous contracté des maladies de la peau (dermites, brûlures cutanées ou ulcérations, nécroses ...) ? Non 0 Oui 1

33. Si oui lesquelles ? _____

34. Si oui quand ? |_|_|_|_|/|_|_|_|_|/|_|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

35. Avez-vous contracté des maladies des yeux (cataracte, irritation ou rougeur fréquente des yeux, trouble de la vision) ? ou en ressentez-vous les signes ? Non 0 Oui 1

36. Si oui lesquelles ? _____

37. Si oui quand ? |_|_|_|_|/|_|_|_|_|/|_|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

38. Avez-vous des masses sous-cutanées (lipome...) ? Non 0 Oui 1

QUESTIONNAIRE 1

39. Si oui lesquelles ? _____

40. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

41. Aviez-vous été mis au courant d'une masse suspecte au niveau de la thyroïde au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

42. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

43. Aviez-vous été mis au courant après une consultation que vous avez contracté une maladie liée à l'un des organes ?

44. Cœur Non 0 Oui 1

45. Si oui lesquelles ? _____

46. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

47. Les poumons (Cancer, broncho-pulmonaire primitif...) Non 0 Oui 1

48. Si oui lesquelles ? _____

49. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

50. Aviez-vous des troubles digestifs chroniques de causes inconnues ? Non 0 Oui 1

51. Si oui, Quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

52. Aviez-vous été mis au courant que vous avez contracté une maladie maligne du sang (Lymphome non hodgkiniens, leucémie, myélome multiples...) au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

53. Si oui lesquelles ? _____

54. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

55. Aviez-vous été mis au courant d'une masse suspecte dans votre organisme au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

56. Si oui lesquelles ? _____

57. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

QUESTIONNAIRE 1

58. Avez-vous eu une infertilité primaire ou secondaire ? Non 0 Oui 1

59. Si oui quelle a été la durée de cette infertilité : |__|__| ans

60. En quelle année est survenue l'infertilité : |__|__|__|__| ans

Question ouverte

61. Avez-vous connaissance des décès de vos collègues dus aux Cancers en général ?

Non 0 Oui 1

62. Si oui de quel(s) type (s) de cancer s'agissait-il ? _____

63. Si oui combien ? _____

64. Qu'attendez-vous de cette étude ?

QUESTIONNAIRE 1

PARTIE 2

IDENTIFIANT DU TRAVAILLEUR : |__|__|-|__|__|__| (à ne pas renseigner par l'enquêteur)

Nom et prénom :

Numéro de téléphone :

**Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements X
des centres d'imagerie médicale du Bénin.**

Cible : TRAVAILLEURS NON EXPOSES (personnel administratif et
d'entretien ; aides-soignants)

Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale au Bénin
Cible de ce questionnaire : travailleurs exposés

RENSEIGNEMENTS GENERAUX

Identification du travailleur (personnel administratif et d'entretien ; aides-soignants, brancardiers).

01. Numéro : |_|_|_|-|_|_|_|_| (à ne pas renseigner par l'enquêteur)

02. Date : |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

03. Sexe : Masculin 0 Féminin 1

04. Date de naissance : |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

05. Catégorie socio-professionnelle (aide-soignant, technicien de surface, secrétaire, brancardier) : (Variable autres à créer)

06. Nombre d'enfants : |_|_|_|

07. Date de première prise de service : |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

08. Carrière :

Structure 01	Durée au poste 02	Congés 03	Temps de travail/jr 04
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H
	_ _ _ _ _ Jours Date de début : Date de fin :	_ _ _ Jours	_ _ _ H

09. Avez-vous fait valoir vos droits à une retraite ? : Non 0 Oui 1

10. Si oui fournissez la date de mise à la retraite : |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

11. Travaillez-vous dans d'autres unités de radiologie après votre admission à la retraite ?

QUESTIONNAIRE 1

Non 0 Oui 1

12. Si oui renseigner le tableau ci-dessous

Structure 01	Durée au poste 02	Congés 03	Temps de travail/jr 04
	- - - - - Jours Date de début : Date de fin :	- - Jours	- - H
	- - - - - Jours Date de début : Date de fin :	- - Jours	- - H
	- - - - - Jours Date de début : Date de fin :	- - Jours	- - H

Renseignements spécifiques

Risque radiologique

13. Avez-vous reçu des cours de radioprotection après votre embauche ? Non 0 Oui 1

14. Avez-vous accès de manière régulière à la zone contrôlée/surveillée (salle d'examens) pendant la réalisation des examens ? Non 0 Oui 1

NB : pour une réponse oui prière soumettre l'intéressé (e) à aux questions de la première partie du présent questionnaire.

15. Êtes-vous sous surveillance médicale ? Non 0 Oui 1

16. Si oui ; quelle est la périodicité ? 1 an 0 2 ans 1 3 ans 2 > 4 ans 3

17. Êtes-vous fumeur ? Non 0 Oui 1

18. Prenez-vous des boissons alcoolisées ? Rare 0 Souvent 1 Toujours 2

Risque chimique

19. Faites-vous du développement manuel/automatique des clichés ? Non 0 Oui 1

20. Si oui, pendant combien de temps par jour ?

QUESTIONNAIRE 1

Structure 01	Nombre de jours de développement	Temps développement/jr 02
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H
	_ _ _ _ Jours	_ _ H

21. Utilisez-vous des gants en latex pour le développement ? Non Oui 1

22. Utilisez-vous des cintres pour le développement ? Non Oui 1

23. Utilisez-vous des masques protège nez spécifique pour le développement ?

Non Oui 1

Morbidité (depuis 1958)

24. Avez-vous contracté des maladies de la peau (dermites, brûlures cutanées ou ulcérations, nécroses ...) ? Non 0 Oui 1

25. Si oui lesquelles ? _____

26. Si oui quand ? |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

27. Avez-vous contracté des maladies des yeux (cataracte, irritation ou rougeur fréquente des yeux, trouble de la vision) ? ou en ressentez-vous les signes ? Non 0 Oui 1

28. Si oui lesquelles ? _____

29. Si oui quand ? |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

30. Avez-vous des masses sous-cutanées (lipome...) ? Non 0 Oui 1

31. Si oui lesquelles ? _____

32. Si oui quand ? |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

33. Aviez-vous été mis au courant d'une masse suspecte au niveau de la thyroïde au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

34. Si oui quand ? |_|_|_|/|_|_|_|/|_|_|_|_|_| (jj/mm/aaaa)

QUESTIONNAIRE 1

35. Aviez-vous été mis au courant après une consultation que vous avez contracté une maladie liée à l'un des organes ?

36. Cœur Non 0 Oui 1

37. Si oui lesquelles ? _____

38. Quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

39. Les poumons (Cancer, broncho-pulmonaire primitif...) Non 0 Oui 1

40. Si oui lesquelles ? _____

41. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

42. Aviez-vous des troubles digestifs chroniques de causes inconnues ? Non 0 Oui 1

43. Si oui, quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

44. Aviez-vous été mis au courant que vous avez contracté une maladie maligne du sang (Lymphome non hodgkiniens, leucémie, myélome multiples...) au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

45. Si oui lesquelles ? _____

46. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

47. Aviez-vous été mis au courant d'une masse suspecte dans votre organisme au cours d'un examen d'exploration diagnostique ? Non 0 Oui 1

48. Si oui lesquelles ? _____

49. Si oui quand ? |__|__|/|__|__|/|__|__|__|__| (jj/mm/aaaa)

50. Avez-vous eu une infertilité primaire ou secondaire ? Non 0 Oui 1

51. Si oui quelle a été la durée de cette infertilité : |__|__| ans

52. En quelle année est survenue l'infertilité : |__|__| |__|__| ans

Question ouverte

53. Avez-vous connaissance des décès de vos collègues (personnel administratif et d'entretien ; aides-soignants) dus aux Cancers en général ? Non 0 Oui 1

Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale au Bénin
Cible de ce questionnaire : travailleurs exposés

QUESTIONNAIRE 1

54. Si oui de quel type de cancer s'agissait-il ? _____

55. Si oui combien ? _____

56. Qu'attendez-vous de cette étude ? _____

Annexe 2a : Différentes affections collectées au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Participants ayant déclaré un évènement		113/528
		n (%)
Evènements de santé	Troubles oculaires	100 (53.8)
	Masse sous-cutanée	26 (13.9)
	Infertilité	24 (12.9)
	Masse pelvienne (Myome)	20 (10.8)
	Troubles digestifs chroniques	12 (6.5)
	Masse thyroïdienne	4 (2.1)
Général		186 (100.0)
Participants n'ayant pas déclaré un évènement de santé		415/528

% =n/Général; masse sous-cutanée = tuméfaction et masse localisées, code R22.9 de la classification internationale des maladies 10^{ème} révision (CIM-10, 2019)

Annexe 2b: Classification des différentes maladies des yeux développées par les groupes exposés et non exposés, selon la classification internationale des maladies 10^{ème} révision (CIM-10, 2019), dans la population d'étude au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Affections		Exposé n=75 (100%)	Non exposé n=25 (100%)
Maladies des yeux* (CIM-10, codes H26.9, H40.9 et H53.9)	Glaucome	1 (1.3)	0 (0.0)
	Cataracte	4 (5.3)	0 (0.0)
	Irritation et troubles des yeux	21 (28)	7 (28.0)
	Rougeur et troubles des yeux	37 (49.3)	14 (56.0)
Total		63 (84.0)	21 (84.0)
Autres maladies déclarées par les participants pour les yeux**	Rougeur des paupières	2 (2.6)	3 (12.0)
	Abcès	10 (13.3)	1 (4.0)
Total		12 (16.0)	4 (16.0)

* Ces affections ont été prises en compte dans le sous-groupe des maladies des yeux selon CIM-10

** Ce sous-groupe d'affections n'a pas été retrouvé dans la codification de CIM-10

Annexe 3 : Répartition de la population d'étude dans les départements (ancien découpage) du Bénin au moment du remplissage du questionnaire, 1972–2019

Variables	Exposé n (%)	Non exposé n (%)	P-values ^ψ
Département du Bénin (ancien découpage)			
Atacora-Donga	47 (14,0)	20 (10,4)	0,02
Borgou-Alibori	45 (13,4)	29 (15,0)	
Zou-Collines	22 (6,6)	14 (7,3)	
Mono-Couffo	16 (4,8)	19 (9,8)	
Ouémé-Plateau	62 (18,5)	19 (9,8)	
Atlantique-Littoral	143 (42,7)	92 (47,7)	

Annexe 4 : Rapports de Risques Instantanés (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95%) de maladies des yeux et masses sous-cutanées en analyse univariée pour l'âge atteint (modèle de régression de Cox) au moment de l'enquête, 1972–2019

Maladies	Variables	Cas/n	Analyse Univariée (HR, IC 95%)
Maladies des yeux	Catégorie d'âge atteint		
	≤ 28	20 / 139	Reference (HR=1)
	29-40	38 / 267	0,3 (0,1 ; 0,5)
	≥ 41	26 / 122	0,1 (0,0 ; 0,1)
	<i>P-value</i>		<.0001
Masses sous-cutanées	Catégorie d'âge atteint		
	≤ 28	6 / 137	Reference (HR=1)
	29-40	12 / 259	0,1 (0,0 ; 0,4)
	≥ 41	8 / 132	0,0 (0,0 ; 0,1)
	<i>P-value</i>		<.0001

Annexe 5 : Rapports de Risques Instantanés (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95%) de maladies des yeux et masses sous-cutanées en analyse univariée (modèle de régression de Cox) dans la cohorte au moment de l'enquête, au niveau des départements, 1972–2019

Maladies	Variabes	Cas/n	Analyse Univariée (HR, IC 95%)
	Départements du Bénin (ancien découpage)		
Maladies des yeux	Atacora-Donga	5 / 47	Reference (HR=1)
	Borgou-Alibori	4 / 45	0,9 (0,3 ; 3,1)
	Zou-Collines	3 / 22	2,7 (0,8 ; 9,2)
	Mono-Couffo	3 / 16	1,9 (0,5 ; 6,7)
	Ouémé-Plateau	15 / 62	3,1 (1,3 ; 8,9)
	Atlantique-Littoral	33 / 143	3,4 (1,5 ; 9,3)
	<i>P-value</i>		0,01
	Départements du Bénin (ancien découpage)		
Masses sous-cutanées	Atacora-Donga	3 / 47	Reference (HR=1)
	Borgou-Alibori	3 / 45	1,2 (0,3 ; 5,3)
	Zou-Collines	0 / 22	0,3 (0,0 ; 3,4)
	Mono-Couffo	1 / 16	0,8 (0,1 ; 4,8)
	Ouémé-Plateau	4 / 62	1,1 (0,3 ; 4,9)
	Atlantique-Littoral	12 / 143	1,4 (0,5 ; 5,4)
	<i>P-value</i>		0,92

Annexe 6 : Modèle de régression de Cox multivarié (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95 %) des maladies des yeux dans la population étudiée au moment de l'enquête, 1972-2019

Variables	Cas/n	Analyse Multivariée (HR 95% CI)
Statut exposé/non exposé		
Non exposé	21 / 193	Reference (HR=1)
exposé	63 / 335	2,5 (1,5 ; 4,3)
<i>P-value</i>		0,0007
Sexe		
Masculin	33 / 224	Reference (HR=1)
Féminin	51 / 304	0,6 (0,4 ; 0,9)
<i>P-value</i>		0,04
Age à la première année d'emploi (année)		
≤ 25	42 / 308	Reference (HR=1)
26-30	19 / 107	0,7 (0,4 ; 1,1)
≥ 31	23 / 113	0,5 (0,3 ; 0,9)
<i>P-value</i>		0,04
Année calendaire au premier emploi (année)		
≤ 2007	46 / 146	Reference (HR=1)
2008 – 2016	29 / 254	1,9 (1,1 ; 3,4)
≥ 2017	9 / 128	3,2 (1,3 ; 7,5)
<i>P-value</i>		0,02
Consommation d'alcool		
Rien	47 / 360	Reference (HR=1)
Modérée	33 / 159	1,4 (0,9 ; 2,2)
Elevée	4 / 9	1,9 (0,6 ; 4,6)
<i>P-value</i>		0,20

Ajustement fait sur sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool, période d'année calendaire au premier emploi (année), département (répartition des travailleurs dans les centres) ; Temps de suivi (Entrée = âge à la première année d'emploi, Sortie = date d'évènements) pour les évènements et (Entrée = âge à la première année d'emploi, Sortie = âge à la date de point) pour les non évènements;

L'hypothèse de risque proportionnel est vérifiée pour sexe, classe d'âge à la première année d'emploi (année), consommation d'alcool.

PARTIE 2 : CHARGE DE TRAVAIL (hebdomadaire et annuelle)

- | | |
|--|------------------|
| 01 nombre de Patients par Semaine | poste de travail |
| 02 Charge de Travail par patient | radio |
| 03 Nombre de patient par mois au maximum | mamo |
| 04 Nombre de patient par an | scan |
| | dent |

PARTIE 3 : PROTECTION COLLECTIVE ET INDIVIDUELLE

- | | | | | | | | |
|---|--------------------------|-------|--------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|---|
| 1 existe-t-il un plan du batiment abritant les appareils à rayon non | | 0 oui | <input type="checkbox"/> | 1 Ne sait pas | <input type="checkbox"/> | 2 | |
| 2 disposez-vous d'un paravent plombé? | non | 0 oui | <input type="checkbox"/> | 1 | | | |
| 3 si oui quelle est l'épaisseur de la vitre plombée? | | | | | | | |
| 4 disposez-vous d'équipements de protection individuelle ? | | | | | | | |
| 5 si oui lesquels ? | nombre? | | | | | | |
| Tabliers plombés | <input type="checkbox"/> | 0 | <input type="checkbox"/> | 0 | | | |
| Cache-gonades | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 1 | | | |
| Cache-thyroïdes | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 2 | | | |
| Jupe-plombées | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 3 | | | |
| 6 Existe-il un zonage? | | Non | <input type="checkbox"/> | 0 | Oui | <input type="checkbox"/> | 1 |
| 7 Y a-t-il des pictogrammes à l'entrée des zones? | | Non | <input type="checkbox"/> | 0 | Oui | <input type="checkbox"/> | 1 |
| 8 Y a-t-il des signalisations lumineuses fonctionnelles à l'entrée des zones? | | Non | <input type="checkbox"/> | 0 | Oui | <input type="checkbox"/> | 1 |
| 9 Y a-t-il un étalonnage périodique des faisceaux de rayons X? | | Non | <input type="checkbox"/> | 0 | Oui | <input type="checkbox"/> | 1 |

Annexe 8

Client : INSERME UNITE 1018

Appareil : AT1123

N° série : 55056

Paramètres d'étalonnages

Date de mesure : 29/05/2019

Température [°C] : 19

Pression [kPa] : 97

Humidité [%] : 70%

Vérification de la justesse de mesure

Etalons : AT-130 n°015 - Certificat d'étalonnage n° 210/1427-2018 du 23/10/2018

AT-110 n°013 - Certificat d'étalonnage n° 210/1426-2018 du 22/10/2018

Vérification	Unité	Valeur nominale ¹	Résultat de mesure	Ecart [%]	Tolérance [%]
Irradiation ¹³⁷ Cs	nSv/h	70	69	-1,4	
	µSv/h	0,70	0,70	0,0	
	µSv/h	7,0	7,0	0,0	
	µSv/h	70	70	0,0	
	mSv/h	0,70	0,69	-1,4	± 15
	mSv/h	7,0	7,2	2,8	
	mSv/h	70	70	0,0	
	Sv/h	0,70	0,70	0,0	
	Sv/h	7,0	7,0	0,0	

¹ L'incertitude sur la valeur nominale est inférieure à ±4% pour l'étalon n°015 et ±5% pour l'étalon n°013

Date d'émission : 14/06/2019	Opérateur
	Nom : CHAUVREAU (Ref. technique) Signature 
Document(s) utilisé(s) : Manuel d'utilisation	Validation
	Nom : DURAND (Resp. métrologie) Signature 

Ce certificat d'étalonnage fait office de Contrôle Périodique de l'Étalonnage conformément à l'arrêté du 21 mai 2010.
Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation FD X 07-012 définissant le certificat d'étalonnage.
La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral.
Ce document contient des informations extraites du document original pour traduction."

Annexe 9 : Paramètres d'acquisition d'images pour les salles de radiographie pulmonaire et de radiologie standard

	Procédures	Taille du champ (cm)	Haute tension (kV)	Charge de travail (mAs)	Épaisseur du diffuseur (cm)	Distance foyer film (DFF) (cm)	Incidence effectuée	Direction du faisceau	Nombre d'exams par heure
Salle de radiologie standard	Radiographie Lombaire	40 x 20	80-90	Variable	23	100	Vue antéro-postérieure et latérale	Verticale	4
Radiographie pulmonaire	Radiographie pulmonaire	40 x 35	100-120	Variable	23	180	Vue postéro-antérieure	Horizontale	10

Annexe 10 : Paramètres d'acquisition d'images pour les salles de tomodensitométrie

	Procédures	Haute tension (kV)	Charge de travail (mAs)	Épaisseur du diffuseur (cm)	Longueur des Acquisitions (cm)	Distance foyer détecteur (DFD) (cm)	Incidence effectuée	Direction du faisceau	Nombre d'exams par heure
CT-scan	Abdomen-pelvis	120	Variable	23	45	80	Antero-Posterior view (by lying down on a table, facing up)	Vertical	3

Annexe 11 : Débits d'équivalents de dose mesurés à l'aide du radiamètre pour la radiographie thoracique, dans les salles de radiographie pulmonaire (mSv/hr)

Codes salles	kV	mAs	Vitre^g	Portes^h	Marque de l'appareil
CSEANAN481	110	4	0.0021	**	TROPHY
HUPPLAZ552	120	31.90	0.4100	0.2880	SIEMENS
HUPPLAZ551	120	6.53	0.8000	0.0002	SIEMENS
CHPP381	120	6.30	0.4300	**	APELEM

^gPoint situé derrière la vitre plombée au poste de travail; ^hPoint situé derrière la porte des salles d'examen à l'extérieur dans le couloir. ** Les mesures ne peuvent pas être effectuées car il y a une barrière.

Annexe 12 : Débits d'équivalents de dose mesurés à l'aide du radiamètre pour la radiographie lombaire, dans les salles de radiologie standard (mSv/hr)

Codes_Rooms	kV	mAs	Glass ^g (for incidence face)	Glass ^g (for incidence profile)	Doors ^h (for incidence face)	Doors ^h (for incidence profile)	Mark of Devices
CAR411	80	480	0.0033	0.0048	0.0012	0.0030	TRENDIX 15
CAR412	80	480	0.0680	0.1150	0.0009	0.0024	
HUMEL521	85	63	5.2500E-07	1.7800E-07	5.9000E-07	2E-07	VARIAN
CHUZCA721	80	90	9.3000	32	0.0620	0.0580	PHILIPS
HUZSL541	90	140	0.0120	0.0360	0.0030	0.0100	BMI
COKETOK471	85	220	0.0650	0.2510	0.0017	0.0019	
CBONI491	90	80	1.4800	1.4800	2.9400	2.9400	SISTEMT MEDICAL
CENTRAC701	80	60	47	94	7.9000	15.8000	ACOMA X-RAY
CLHANNA811	80	157	0.7200	0.8800	0.0259	0.0450	GMS
CLMELD801	90	252	0.0090	0.0180	5.3000E-05	0.0001	TOSHIBA
CANNE761	90	140	0.0060	0.0161	7.4000E-05	0.0001	SIEMENS
HUHKM449	80	126	0.0720	0.0650	0.3960	0.7425	SHIMADZU
HUHKM441	90	323	0.9000	1.1800	0.0079	0.0204	SIEMENS
HUHKM447	90	325	3.9000	4.3000	0.0660	0.0660	APELEM
CUBURU421	80	32	0.2970	0.2970	0.0660	0.0660	VARIAN
HIACOT531	80	340	0.1060	0.1570	0.0540	0.0780	GMS
HBETHE581	90	360	0.0830	0.1660	0.0082	0.0166	Philips
HZALLAD431	80	82	0.0002	0.0005	0.0002	0.0005	DRGEM
HZOUID391	85	143	0.1530	0.2940	0.1670	0.1910	GMS
HSLUC571	80	50	0.0127	0.0127	0.0580	0.0580	Nanjing Perlove ME
HZMENON59 1	90	148	0.1440	0.3400	0.0002	0.0003	Nanjing Perlove Medical Eq
CROSE561	80	150	0.1440	0.1020	0.2030	0.1430	
APHGOH261	75	112	5.9000	5.9000	0.2630	0.2630	TOSHIBA
HZAPLA251	90	100	0.8000	0.9000	0.0019	0.0020	GE

HZCOME291	90	1000	0.1200	0.2400	0.3220	0.6440	IMS
HZKLOUE271	80	120	0.0273	0.0546	0.3900	0.7800	Nanjing Perlove ME
HUOP341	90	240	0.0272	0.0380	0.0237	0.0290	
HELFAH371	90	89	0.1480	0.3400	0.0076	0.0143	MINDRAY
CLPAST361	80	163	0.0132	0.0229	0.0113	0.0185	TOSHIBA
HZADJOH331	75	30	0.1190	0.1170	**	**	SIEMENS
HZPOBE311	90	308	0.0061	0.0570	1.2000	2.4000	TOSHIBA
HZSAKE321	90	120	0.1330	0.1930	0.0110	0.0171	
CBSAM351	90	160	1.0200	0.8200	0.1290	0.1420	ORICH Medical Tianjin
CRES511	80	285	4.3000	5.8000	5.4000	6.7000	TOSHIBA
CIMS501	80	104	0.3300	0.5200	0.1040	0.1830	
CABBRA211	80	45	0.1880	0.1830	0.0150	0.0165	
CHDAB221	85	62	0.1310	0.1250	0.6100	0.6100	VARIAN
CHDAB222	90	70	0.2620	0.2750	**	**	VARIAN
CSANIT231	90	150	0.1850	0.1700	0.0201	0.0190	JET Medical
HZCOV241	80	45	0.3400	0.4400	0.0036	0.0098	IAE
HZDASSA201	80	175	5.4000	5.9000	0.0480	0.0420	General Electric
HZSAVE181	80	82	0.6900	1.9000	0.4200	0.4600	GE
BAK011	90	10	0.0340	0.0680	0.0050	0.0100	GILARDONI
CHDA021	85	120	0.4400	0.4000	0.0095	0.0089	COMET
CHDDON901	80	143	0.0800	0.0640	0.0176	0.0167	VARIAN
HZBAS061	85	95	0.0880	0.0880	0.0232	0.0227	
HZTANG671	85	80	0.0780	0.0860	0.0071	0.0071	GILARDONI
HZMAL051	80	90	0.1990	0.1870	0.0047	0.0044	BMI
HZKOU041	90	143	3.9000	4.3000	0.0660	0.0660	RADIOTEX 200 Alpha Medical
CBAGUI151	80	33.6000	0.2170	0.2400	0.0005	0.0027	TOSHIBA
HUPAR132	95	36	20.6000	35	0.0560	0.1000	GMS JET Medical System
HIAPAR141	90	360	0.0005	0.0005	0.0003	0.0003	Beijing Wandong MT

HZBAN081	85	205	0.1100	0.5900	0.0182	0.0149	BMI
HZBOKO121	80	40	0.0029	0.0057	0.0034	0.0068	VillaSiotemi
HZBEM091	80	95	0.0800	0.0870	0.0174	0.0174	TOSHIBA
MAN891	90	70	0.1430	0.1460	0.6700	0.7000	VARIAN
PPIO103	90	90	0.2670	0.3300	0.0011	0.0012	TROPHY
HZPAPA171	85	75	0.1590	0.1980	0.0066	0.0047	APELEM DMS Group
HZSOUS111	85	50	0.4500	0.4900	0.0002	0.0002	BMI

^aPoint situé derrière la vitre plombée au poste de travail; ^bPoint situé derrière la porte des salles d'examens à l'extérieur dans le couloir.

** Les mesures ne peuvent pas être effectuées car il y a une barrière.

Annexe 13 : Débits d'équivalents de dose mesurés à l'aide du radiamètre pour la tomodensitométrie abdomino-pelvienne, dans les salles de tomodensitométrie (mSv/hr)

Codes_Rooms	kV	mAs	Glass^g	Doors^h	Mark of Devices
HUHKM443	120	4489	0.0197	0.0052	SIEMENS
CRES512	125	5134	0.3056	1.0624	
HIACOT532	120	300	0.1055	7.6600E-05	NEUSOFT
HIAPAR143	120	6190	0.1996	1.4413	NEUSOFT
SANCTA163	125	4489	2.0352	0.5741	HITACHI
HZTANG672	125	686.3000	3.2394	0.1162	HITACHI

^gPoint situé derrière la vitre plombée au poste de travail; ^hPoint situé derrière la porte des salles d'examen à l'extérieur dans le couloir.

Annexe 14 : Note explicative d'estimation des Coefficients de correction

Collecte et traitement des données

Le recueil des données a été réalisé en mars 2020 au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Suru-Léré au Bénin. Le CHU a été choisi parce que son tube à rayons X était le plus jeune parmi les tubes à rayons X qui ont participé à l'enquête. Les caractéristiques concernant le tube à rayons X ont été obtenues auprès du directeur de l'hôpital (CHU) et décrites ci-dessous. Les patients (homme ou femme) ayant une épaisseur thoracique ou abdominale (23 cm) équivalente au plexiglas rempli d'eau (fantôme) ont été sélectionnés pour l'estimation du coefficient. Les patients avaient déjà une demande d'examen (radiographie thoracique ou lombaire) exigée par le médecin. Ces mesures ont été réalisées par le même opérateur.

Considération éthique

Cette étude a été examinée, approuvée et autorisée par le comité d'éthique de la recherche (CER-ISBA) de Cotonou. Le consentement des patients avait été demandé et obtenu avant la réalisation des mesures.

Les mesures effectuées n'ont pas influencé les conditions de réalisation des examens par le technicien en radiologie.

Mesures des débits d'équivalents de dose

Les mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions que celles décrites dans la section méthode du chapitre 4, à une différence près. Le radiamètre était positionné à 1 mètre du patient ou du fantôme lors du même examen (radiographie thoracique ou lombaire) comme illustré en annexe 16 et 17.

Formule utilisée :

$$T = \frac{\text{Débit d'équivalent de dose patient}}{\text{Débit d'équivalent de dose fantôme}}$$

Où

T est le facteur de correction (sans unité) ;

Débit d'équivalent de dose patient en mSv ;

Débit d'équivalent de dose fantôme en mSv.

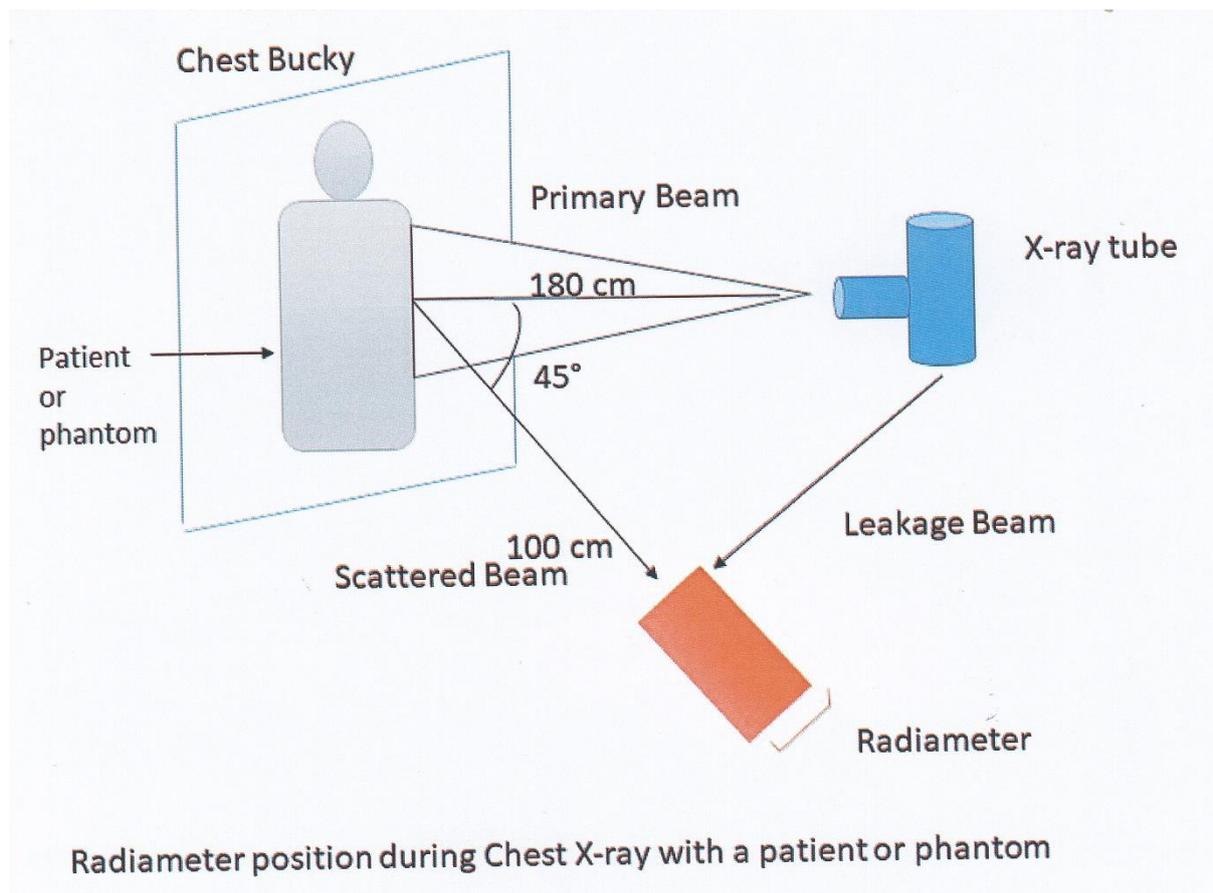
Analyses statistiques

Moyenne COEF a été estimée en utilisant SAS[®] version 9.4.

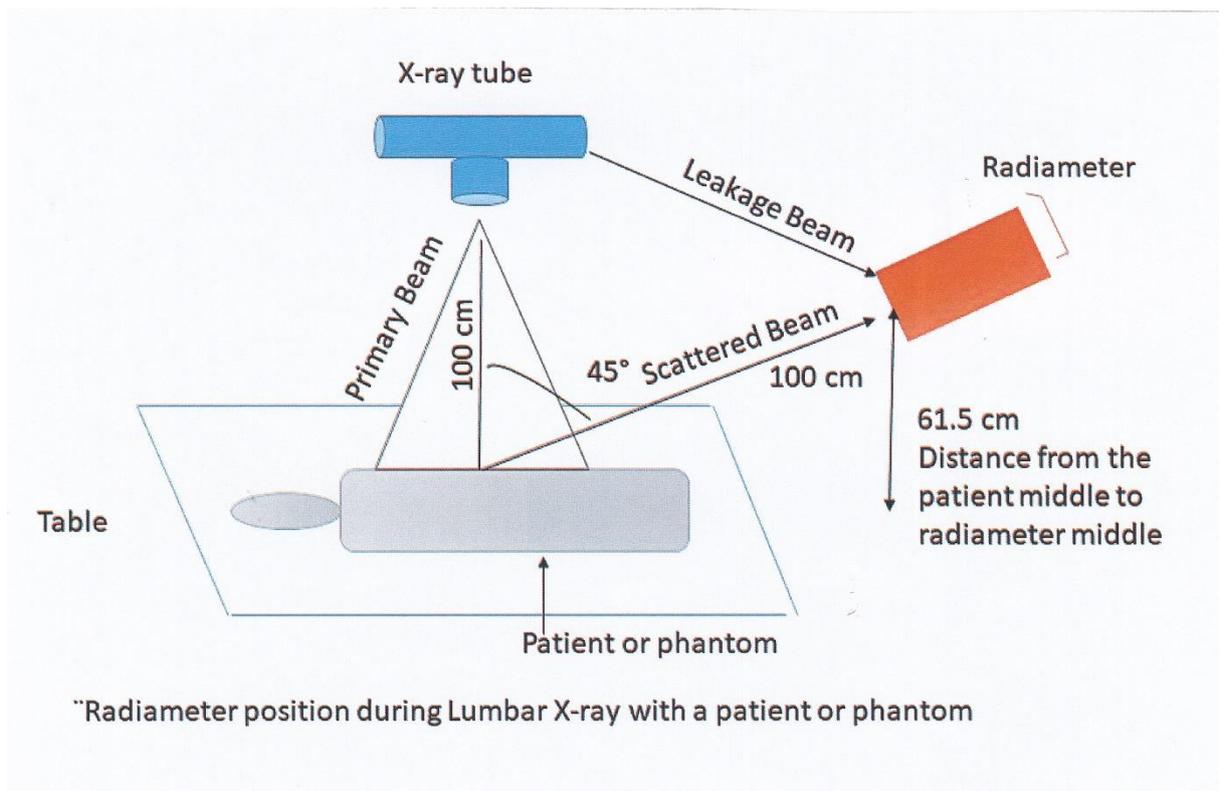
Annexe 15 : Caractéristiques de l'appareil

kV_{max}	mAs_{max}	Filtration	Date de fabrication	Date d'installation	Contrôle qualité avant l'installation	Contrôle qualité après l'installation
150	630	2 mm of Aluminium	2017	2017	Non	Non

kV_{max}: kilovoltage maximal généré par l'appareil; mAs_{max}: milliamperage maximal x seconde maximale généré par l'appareil.



Annexe 16 : Position du radiamètre lors d'une radiographie thoracique avec un patient ou un fantôme



Annexe 17 : Position du radiamètre lors d'une radiographie lombaire avec un patient ou un fantôme

Annexe 18 : Résumé statistique sur les données concernant le coefficient de correction de la radiographie thoracique

kV	MAs	EDR patient	EDR fantôme	COEF
115	5	0.1250	0.3200	0.3906
110	5	0.5200	0.7400	0.7027
110	5	0.3000	0.5900	0.5085
115	4	0.6000	0.5601	1.0712
115	5	0.6110	1.1700	0.5222
115	3.80	0.6001	0.6900	0.8697
115	3.40	0.3701	0.8400	0.4406
115	4	0.3010	0.9000	0.3344
115	5	0.2440	0.4200	0.5810
117	4	0.3601	0.4000	0.9003
113	4	0.2440	0.4200	0.5809
110	4	0.6010	0.6900	0.8710
115	5	0.6100	1.1700	0.5214
114	4	0.6010	0.5600	1.0732
115	4	0.1250	0.3200	0.3906
115	3.60	0.3710	0.8400	0.4417
115	5	0.3000	0.5900	0.5085
117	4	0.3010	0.9000	0.3344
115	5	0.3600	0.4010	0.8977
115	4	0.5200	0.7400	0.7027
113	4	0.6000	0.5600	1.0714
110	5	0.2440	0.4200	0.5809
115	5	0.1250	0.3200	0.3906
115	4	0.6000	0.6900	0.8696
115	3.20	0.3700	0.8400	0.4405
115	5	0.5200	0.7400	0.7027
115	5	0.6100	1.1700	0.5214
117	4	0.3000	0.9000	0.3333
115	5	0.3000	0.5900	0.5085
115	4	0.3600	0.4000	0.9000

kV: kilovoltage; mAs: milliamperage x seconde; EDR: Débit d'équivalent de dose in mSv/h (face seule); ED: equivalent de dose in mSv (face seule); COEF: coefficient

Annexe 19 : Résumé statistique sur les données concernant le coefficient de correction de la radiographie lombaire

Kv	MAs	EDR patient	Tps	ED Patient	EDR phantom	Tps	ED Phantom	COEF
85	50	0.4010	0.32	0.1283	0.3400	0.33	0.1122	1.1437
80	100	0.3410	0.33	0.1125	0.2070	0.37	0.0766	1.4692
80	63	0.4210	0.31	0.1305	0.3500	0.35	0.1225	1.0654
85	100	0.4110	0.16	0.0658	0.3201	0.18	0.0576	1.1413
80	50	0.3210	0.19	0.0610	0.3420	0.17	0.0581	1.0490
85	100	0.4700	0.33	0.1551	0.3601	0.33	0.1188	1.3052
80	50	0.3310	0.18	0.0596	0.3400	0.16	0.0544	1.0952
80	100	0.4510	0.22	0.0992	0.3601	0.21	0.0756	1.3121
85	50	0.2490	0.17	0.0423	0.1510	0.14	0.0211	2.0024
85	100	0.4100	0.31	0.1271	0.3610	0.34	0.1227	1.0355
85	50	0.4501	0.22	0.0990	0.3600	0.21	0.0760	1.3036
80	100	0.3400	0.33	0.1122	0.2070	0.37	0.0766	1.4649
85	63	0.3201	0.19	0.0608	0.3401	0.17	0.0578	1.0519
85	100	0.4100	0.16	0.0656	0.3200	0.18	0.0576	1.1389
85	50	0.4701	0.33	0.1551	0.3600	0.34	0.1188	1.3058
85	100	0.3300	0.18	0.0594	0.3401	0.16	0.0544	1.0916
85	50	0.4200	0.31	0.1302	0.3500	0.35	0.1225	1.0629
80	100	0.4010	0.32	0.1283	0.3401	0.33	0.1122	1.1433
85	50	0.2490	0.17	0.0423	0.1510	0.14	0.0211	2.0024
85	100	0.4101	0.31	0.1271	0.3600	0.34	0.1224	1.0387
85	50	0.4100	0.16	0.0656	0.3200	0.18	0.0576	1.1389
85	100	0.4000	0.32	0.1280	0.3400	0.33	0.1122	1.1408
85	63	0.4500	0.22	0.0990	0.3600	0.21	0.0756	1.3095
85	100	0.4700	0.33	0.1551	0.3600	0.33	0.1188	1.3056
85	50	0.2490	0.17	0.0423	0.1510	0.14	0.0211	2.0024
80	100	0.3400	0.33	0.1122	0.2070	0.37	0.0766	1.4649
85	50	0.3300	0.18	0.0594	0.3400	0.16	0.0544	1.0919
85	100	0.4200	0.31	0.1302	0.3500	0.35	0.1225	1.0629
85	50	0.3200	0.19	0.0608	0.3400	0.17	0.0578	1.0519
85	100	0.4100	0.31	0.1271	0.3600	0.34	0.1224	1.0384

kV: kilovoltage; mAs: milliamperage x seconde; EDR: débit d'équivalent de dose in mSv/h (face et profil); ED: equivalent de dose in mSv (face et profil); COEF: coefficient

Annexe 20 : Note explicative de l'estimation des niveaux de références

Pour les zones surveillées : 7.50 μ Sv en 1 heure

50 mSv/yr = 1 mSv/semaine = 25 μ Sv/hr (for 50 semaine/an, 40 heures de travail/semaine) ;
3/10 de cette limite = 25 x 3/10 = 7.50 μ Sv/hr = le niveau/limite de blindage adéquat.

Pour les lieux publics : 0.05 μ Sv en 1 heure

1 mSv/an = 80 μ Sv/mois = 20 μ Sv/semaine (pour 12 mois/an, 4 semaines/mois, 40 heures de travail /semaine) ; 1/10 de cette limite = 0.05 μ Sv/hr = le niveau/limite de blindage adéquat.

1/10= facteur d'occupation des couloirs.

Annexe 22 : Note explicative de l'estimation du temps d'exposition au poste de travail dans un centre de radiologie

D tot = (Date d'arrêt de travail – Date d'embauche) – nombre de jours de congés obtenus (1)

Où **D tot** = Durée totale au poste de travail dans un service de radiologie est en jour.

H part = Heure au poste de travail par jour – heure consacrée au développement (2)

Où **H part** = Heure partielle au poste de travail en heure.

H tot = (1) x (2)

Où **H tot** = Heure totale au poste de travail en heure dans un centre de radiologie.

Annexe 23 : Combinaisons de type d'établissement et de sexe pour 4 groupes, leur nombre correspondant de participants et les doses moyennes efficaces bimensuelles en μSv pour la population expérimentale (n=138).

Groupe		Nombre de participants	Moyenne	Ecart type	P value*
Type d'établissement	Public	98	8.1	5.7	0.87
	Privé	40	7.4	5.8	
Sexe	Masculin	88	8.1	5.8	0.78
	Féminin	50	7.5	5.6	

Annexe 24 : Rapports de Risques Instantanés (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95%) de maladies des yeux et masses sous-cutanées en analyse univariée pour la variable « Période d'installation » (modèle de régression de Cox) chez les travailleurs exposés au moment de l'enquête, 1972–2019.

Maladies	Variables	Cas/n	Analyse Univariée (HR, IC 95%)
Maladies des yeux	Période d'installation		
	2016-2019	55 / 232	Reference (HR=1)
	≥ 2015	8 / 103	2,0 (0,8 ; 4,9)
	<i>P-value</i>		0,13
Masses sous-cutanées	Période d'installation		
	2016-2019	22 / 232	Reference (HR=1)
	≥ 2015	1 / 103	3,1 (0,0 ; 57,9)
	<i>P-value</i>		0,63

Annexe 25 : Rapports de Risques Instantanés (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95%) de maladies des yeux et masses sous-cutanées en analyse univariée pour les variables « procédures radiologiques et conformité des postes de travail par rapport aux niveaux de référence » (modèle de régression de Cox) chez les travailleurs exposés au moment de l'enquête, 1972–2019.

Maladies	Variables	Cas/n	Analyse Univariée (HR, IC 95%)
Maladies des yeux	Catégorie de procédures radiologiques		
	Radiologie standard	62 / 330	Reference (HR=1)
	Tomodensitométrie	1 / 5	0,9 (0,2 ; 2,6)
	<i>P-value</i>		0,87
	Conformité des postes de travail par rapport aux niveaux de référence		
	Oui	59 / 316	Reference (HR=1)
Non	4 / 19	0,8 (0,3 ; 1,6)	
	<i>P-value</i>		0,51
Masses sous-cutanées	Catégorie de procédures radiologiques		
	Radiologie standard	23 / 330	Reference (HR=1)
	Tomodensitométrie	0 / 5	0,6 (0,0 ; 4,7)
	<i>P-value</i>		0,76
	Conformité des postes de travail par rapport aux niveaux de référence		
	Oui	20 / 316	Reference (HR=1)
Non	3 / 19	1,8 (0,5 ; 4,9)	
	<i>P-value</i>		0,32

Annexe 26 : Rapports de Risque Instantanés (*Hazard Ratio* abrégé HR en anglais et IC 95%) de maladies des yeux et masses sous-cutanées en analyse univariée pour la variable « Période d'installation » (modèle de régression de Cox) chez les travailleurs exposés au moment de l'enquête, 1972–2019

Maladies	Variables	Cas/n	Analyse Univariée (HR, IC 95%)
Maladies des yeux	Type d'appareil		
	mobile	5 / 36	Reference (HR=1)
	fixe	58 / 299	0,7 (0,2 ; 1,8)
	<i>P-value</i>		0,54
Masses sous-cutanées	Type d'appareil		
	mobile	1 / 32	Reference (HR=1)
	fixe	22 / 303	0,8 (0,1 ; 3,0)
	<i>P-value</i>		0,77

Annexe 27 : Comparaison des équivalents de dose ponctuels et cumulés (en μSv) dans les centres, 2019-2020

Centres (n)	Mesure réalisée à l'aide d'un radiamètre		Mesure réalisée à l'aide d'un dosimètre	
	Conformité au niveau de référence réglementaire (μSv par heure)	Equivalent de dose ambiant mesuré à l'aide du radiamètre (médiane/IQR)	Conformité au niveau de référence réglementaire (μSv bimensuelle)	Equivalent de dose ambiant mesuré à l'aide du dosimètre
60	< 7,5	0,1 / 0 ; 0,4	< 1000	10 / 10 ; 30
9	> 7,5	22,6 / 10,4 ; 75,7	< 1000	30 / 10 ; 55



ACCEPTED MANUSCRIPT

A systematic review of occupational radiation individual dose monitoring among healthcare workers exposed in Africa

To cite this article before publication: Arnaud Alfred Gbetchedji *et al* 2020 *J. Radiol. Prot.* in press <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aba402>

Manuscript version: Accepted Manuscript

Accepted Manuscript is “the version of the article accepted for publication including all changes made as a result of the peer review process, and which may also include the addition to the article by IOP Publishing of a header, an article ID, a cover sheet and/or an ‘Accepted Manuscript’ watermark, but excluding any other editing, typesetting or other changes made by IOP Publishing and/or its licensors”

This Accepted Manuscript is © 2020 Society for Radiological Protection. Published on behalf of SRP by IOP Publishing Limited. All rights reserved..

During the embargo period (the 12 month period from the publication of the Version of Record of this article), the Accepted Manuscript is fully protected by copyright and cannot be reused or reposted elsewhere.

As the Version of Record of this article is going to be / has been published on a subscription basis, this Accepted Manuscript is available for reuse under a CC BY-NC-ND 3.0 licence after the 12 month embargo period.

After the embargo period, everyone is permitted to use copy and redistribute this article for non-commercial purposes only, provided that they adhere to all the terms of the licence <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>

Although reasonable endeavours have been taken to obtain all necessary permissions from third parties to include their copyrighted content within this article, their full citation and copyright line may not be present in this Accepted Manuscript version. Before using any content from this article, please refer to the Version of Record on IOPscience once published for full citation and copyright details, as permissions will likely be required. All third party content is fully copyright protected, unless specifically stated otherwise in the figure caption in the Version of Record.

View the [article online](#) for updates and enhancements.

**A systematic review of occupational radiation individual dose monitoring
among healthcare workers exposed in Africa**

Arnaud A. Gbetchedji MS^{1,2,3,4}, Gilles D. Houndetoungan MD⁴, Hubert C. Hounsossou PhD⁵, Neige Journy PhD^{1,2,3}, Nadia Haddy PhD^{1,2,3}, Carole Rubino MD, PhD^{1,2,3}, Olivier Biau MD⁴, Daton Medenou PhD⁵, Kuassi M. Amoussou-Guenou MD, PhD⁴, Florent de Vathaire PhD^{1,2,3}, Rodrigue S. Allodji PhD^{1,2,3,5,‡}

¹Université Paris-Saclay, UVSQ, Univ. Paris-Sud, Inserm, Équipe Cancer and Radiation, CESP, 94807*, Villejuif*, France

²INSERM, CESP, Cancer and Radiation Team, Villejuif, 94805, France

³Gustave Roussy, Department of Clinical Research, Cancer and Radiation Team, Villejuif, 94805, France

⁴Faculté des Sciences de la Santé, Université d'Abomey-Calavi, P.O. Box 188, Cotonou, Bénin

⁵Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Université d'Abomey-Calavi, 01 P.O. Box 2009, Cotonou, Benin

‡Corresponding author:

Rodrigue S. Allodji, Radiation Epidemiology Group / CESP - Unit 1018 INSERM, Gustave Roussy, B2M, 114, rue Édouard Vaillant 94805 Villejuif Cedex, Tel +33 (0) 1 42 11 54 98 / Fax +33 (0) 1 42 11 56 18

E-mail: rodrigue.allodji@gustaveroussy.fr

1
2
3
4 **Word Count: 3547 of 4000; Abstract: 291 of 300**
5

6
7 **Short running title:** Review of radiation dose monitoring among radiology
8
9 healthcare workers in Africa
10
11

12
13
14 **KEYWORDS:** *dose monitoring, occupational exposure, diagnostic radiology, Africa,*
15
16 *healthcare workers, radiography, diagnostic X-Ray, medical imaging, review.*
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Abbreviations	
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
IAEA	International Atomic Energy Agency
INIS	International Nuclear Information System
OEW	Occupational Exposed Workers
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
TLD	Thermo luminescent Dosimeter
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Funding: This work has been supported by the International Agency Energy Atomic (IAEA).

ABSTRACT

Dosimetric monitoring is useful to requested limit exposures to ionizing radiation in medical occupational settings, and reduce subsequent health risks. Scientific literatures, such as UNSCEAR report, 2017 and International Atomic Energy Agency Report, 2014, updated informations on this subject, whereas, such a few African works were found. That's the reasons why we undertake this study, which consists in summarizing existing informations on monitoring external radiation exposure doses for whole body, from medical workers on this continent.

Using standard terms and combine the different keywords research for radiation dose monitoring among radiology healthcare workers in Africa, from the titles, abstracts, and full texts, we found 3139 articles in PubMed/MEDLINE, Google Scholar and INIS databases. Two reviewers screened the retrieved publications based on predefined eligibility criteria to identify relevant studies, extract key information from each, and summarize data in table.

A total of twenty potentially relevant articles were identified. Among these twenty articles, fifteen reported the overall average annual effective dose. Studies included in this systematic review represent an inventory of the radiation protection of medical workers in various countries of Africa, with a focus on the monitoring of occupational radiation exposure. The size of studied populations ranged between 81 and 5152 Occupational Exposed Workers. The mean annual effective doses ranged from 0.44 to 8.20 mSv in all specialities of Medical sectors, while diagnostic radiology ranged from 0.07 to 4.37 mSv. For the nuclear medicine and radiotherapy from medical groups, the mean annual effective dose varied between 0.56 and 6.30 mSv. Industrial and Research/Teaching sectors's data which are presented in Table 2b for comparison, varied between 0.38 to 19.40 mSv.

1
2 In conclusion, more studies implemented on dosimetric monitoring in Africa are needed
3
4 to get a real picture of occupational exposure in this continent.
5

6
7 **KEYWORDS:** *Dose monitoring, occupational exposures, diagnostic radiology, Africa,*
8
9 *healthcare, workers radiography, diagnostic X-Ray, medical imaging.*
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

INTRODUCTION

Occupational exposure to ionizing radiation occurs in many professions, including medicine, research/teaching and industry workers [1]. Diagnostic investigations using radiation have become a critical feature of medical practice. As such, it raises concern about the potential risk that these advancements may pose for both patients and professionals [2].

The cancer and non-cancer diseases caused by effects of radiations exposure on humans, has major implications to public health and radiation standard setting [3]. Public interest in the long-term effects of radiation on humans has then increased and has been focused on carcinogenic effects from protracted exposure to low doses.

The role of individual monitoring in the nuclear industry is undisputed, with the need for good record keeping and regular review [4]. Individual monitoring in medical sector is also important for the Occupational Exposed Workers (OEW). The monitoring of medical workers chronically exposed to ionizing radiation is common practice in many countries but remains limited on the African continent. This is evidenced in the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2017 report [1]. It states that literature dealing with medical exposure in Africa, Asia and Latin America is limited [1]. Our study will focus on Africa, because, according to the literature [5], it always remains the continent with the lowest participation rate in international surveys on radiation protection. The updating of information on this subject through scientific literature, such as UNSCEAR report, 2017 and International Atomic Energy Agency, 2014b, led us to undertake this study. That consists in making to summarize existing information on monitoring of doses external radiation exposure for whole body of medical workers on this continent. This will also highlight the improvement in dosimetric monitoring between the different countries, after analysis of the annual effective mean doses between different practices.

Methods

Search strategy and study selection

We searched the PubMed/MEDLINE, Google Scholar and INIS databases using a combination of the following keywords with Booleans operators 'OR' 'AND': dose monitoring, occupational exposure, diagnostic radiology OR radiography OR diagnostic X-Ray OR medical imaging Africa AND medical workers, in the titles, abstracts, AND full texts. The reference lists of eligible articles were also reviewed to identify studies that we might have missed by searching terms in the titles and abstracts. We included articles, published in English or French up to the 31st of August 2019, with an update on 20th of May 2020, which reported results regarding the dose monitoring of occupational radiation exposure from IR. We excluded studies that only provided descriptions of the system of radiation protection or did not report information on the dose monitoring of occupational radiation exposure from ionizing radiation for whole body. Similarly, studies focused, only on the radiation protection of patients or monitoring doses of the hand in interventional radiology, were excluded. In this review, inclusion criteria were (i) article fully available in English or French languages (ii) articles which provided mean annual effective doses related to different medical, industrial and research specialities or teacher. The results of the identification and selection process are displayed in a flow diagram (Fig. 1), as requested in the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statement [6].

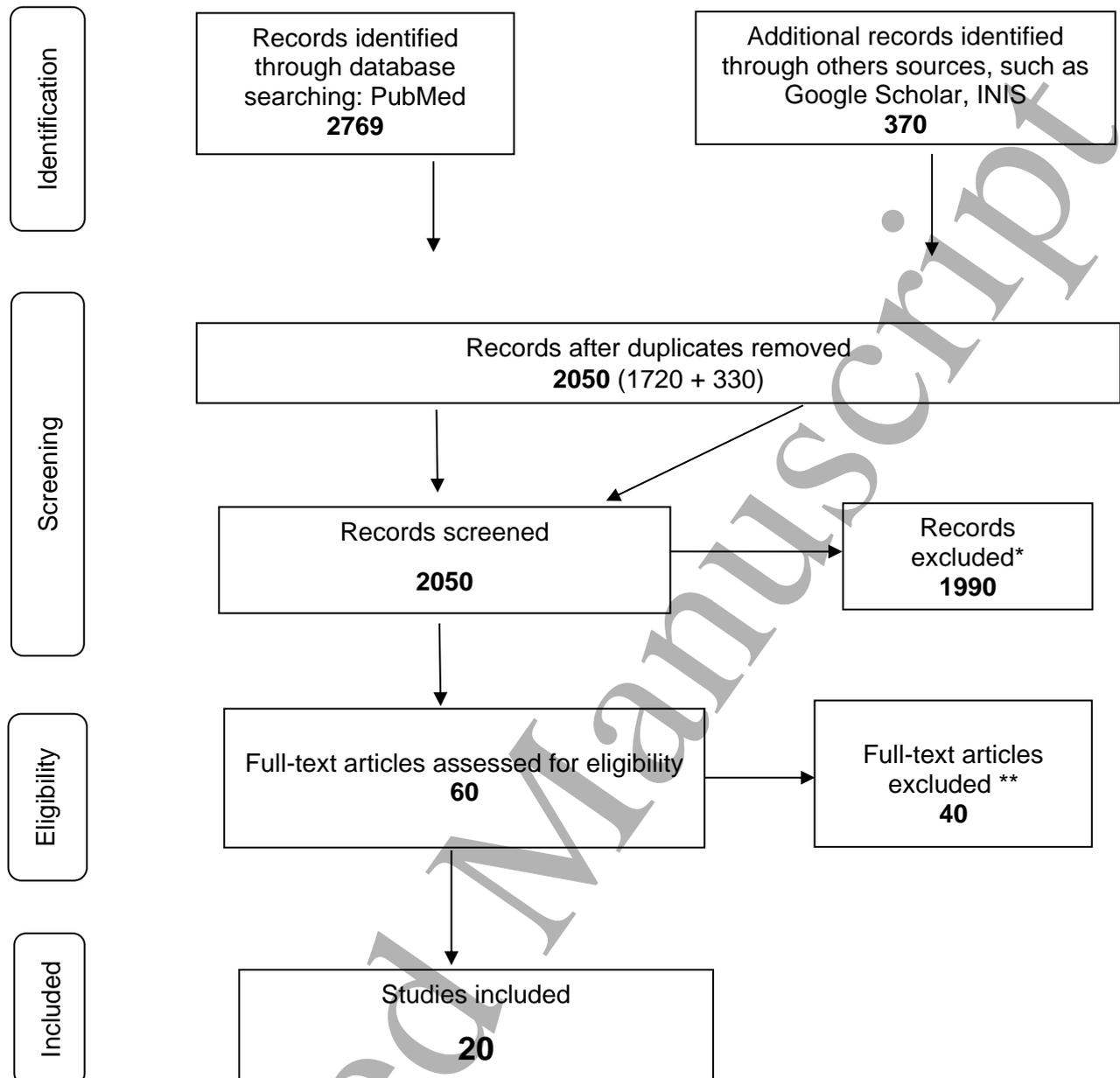


Fig. 1: PRISMA diagram selection process s for paper published

On Pubmed: Monitoring of occupational exposures in diagnostic radiology radiation workers; on others sources: Monitoring, occupational exposures, diagnostic radiology; Dosimeter radiation workers medical imaging, medical X-Ray healthcare; Screening process: included the words "Africa". Criteria of eligibility: articles which report the individual dose's radiation about medical workers. Reasons for exclusion: * articles which report the dose's radiation about patients; ** did not match inclusion criteria (i.e., radiation protection studies investigating the doses monitoring for whole body of medical workers).

Data extraction

Information on country, study design, source population, sample size and period were extracted from the articles using a predefined data extraction form (Table 1). Data extraction was performed independently by two reviewers (AG, RA), who cross-checked their reports to validate the information extracted from the original articles and reach a consensus data synthesis.

Results

Study Selection and Characteristics

Using the defined key words, three thousand one hundred and thirty-nine (3139) articles were identified (Fig. 1). At the end, the twenty selected studies have been published between at 1986 to 2018. These articles provides the dosimetric monitoring of workers exposed to ionizing radiation whole body and others described dosimetric monitoring practices. Among these twenty articles (Table 1) fifteen reported the overall mean annual effective dose (Tables 2a and 2b). Five studies not reported in Table 2a and Table 2b addressed issues of whether or not dosimetric monitoring exists in the facilities concerned or the assessment of compliance to international radiation protection standards; without reporting the individual radiation doses. From twenty studies, 70% and 15% studies were cross-sectional (reporting exposures during a one-year period) and retrospective (reporting mean annual effective doses during a period of 16 years on average), respectively. The largest size of the source populations was 5152 provided in the field of diagnostic radiology by Ghana between 2000 and 2009. It was followed by Tanzania with 757 diagnostic radiology workers on 1000, while *Tapsoba et al.* [7] reported only 81 medical workers on 157, in Ouagadougou at Burkina-Faso. The different studies reported data on workers exposed to ionizing radiation in all fields using the ionizing radiation, but more particularly in different

1
2 specialities from medical sectors (Table 2a). All medical sectors, industrial and
3
4 research/teaching's data are presented in Table 2b for comparison.
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Accepted Manuscript

Table 1: Summary of twenty selected studies

Authors	Country	Type of studies	Source population (sample size)	Provided mean annual individual doses (Yes/No)	Provided collective annual doses (Yes/No)	Period
[8]	Burkina Faso	Longitudinal	OEW of Medical (3 to 121)	Yes	No	2007- 2010
[7]	Burkina- Faso	Cross-sectional	OEW in diagnostic radiology department (81)	Yes	No	2010–2011
[9]	Egypt	Retrospective	OEW (radioactive source) (27)	No	No	2002–2012
[10]	Ethiopia	-	OEW (100 to 450)	Yes	Yes	1977–1988
[11]	Ghana	Cross-sectional	OEW of medicine, industrial, research and education and teaching (650)	Yes	Yes	2002–2007
[12]	Ghana	Retrospective	OEW of diagnostic radiology (5152), radiotherapy (747), nuclear medicine (87)	Yes	Yes	2000–2009
[13]	Ghana	Cross-sectional	OEW of medicine, industrial and research/teaching: radiotherapy (8), diagnostics (556), nuclear medicine (4)	Yes	Yes	2008–2009
[14]	Ghana	Cross-sectional	OEW in medicine, industrial, research and education and teaching (254 to 761)	Yes	Yes	1988-1995
[15]	Kenya	Cross-sectional	OEW in diagnostic radiology department (367)	Yes	Yes	2007
[16]	Madagascar	Cross-sectional	OEW in diagnostic radiology department (260)	Yes	No	1990 - 2000
[17]	Malawi	Cross-sectional	OEW in diagnostic radiology department (Number of workers not defined)	No	No	2018
[18]	Nigeria	Longitudinal	OEW of medicine, industrial, and research (640)	Yes	Yes	1990 – 1999
[19]	Nigeria	Cross-sectional	OEW of Medical (30 to 192)	Yes	Yes	1999–2001
[20]	Nigeria	Cross-sectional	Radiographs (500)	No	No	2009
[21]	Nigeria	Cross-sectional	OEW (Number of workers not defined)	No	No	2011
[22]	Nigeria	Cross-sectional	OEW of medicine and industrial (500)	Yes	Yes	2000-2001
[23]	Nigeria	Cross-sectional	OEW of medicine, radiographers and radiologists (59)	Yes	No	2005-2007
[24]	Sudan	Cross-sectional	OEW in cardiology department (Number of workers not defined)	No	No	2010
[25]	Tanzania	Retrospective	OEW in medicine, industrial, research and education and teaching (730)	Yes	Yes	1996–2010
[26]	Tanzania	Cross-sectional	OEW in medicine, industrial, research and education and teaching (1000)	Yes	Yes	1986-1997

OEW: Occupational Exposed Worker.

Annual effective mean dose

Among the included studies, fifteen had published the individual radiation doses. The Thermoluminescent Dosimeter (TLD) was the monitoring equipment in all studies. It is worn at chest height requested by IAEA [27]. It reported an overall mean annual effective dose in medical, industrial and research/teaching fields. Considering the different doses provided by the studies summarized in Table 2b, the mean annual effective doses ranged from 0.44 to 8.20 mSv in all specialities of Medical sectors, while diagnostic radiology ranged from 0.07 to 4.37 mSv (Table 2a). For the Nuclear medicine and radiotherapy specialities of medical sector, the mean annual effective dose varied between 0.56 and 6.30 mSv (Table 2a).

Table 2a: Summary of height articles from the fifteen included studies reporting mean annual individual doses for different specialities of medical sectors

Authors	Type of dosimeter	Mean annual individual doses (in mSv)		
		Diagnostic Radiology	Nuclear Medicine	Radiotherapy
[12]	TLD	2.94	6.30	5.24
[25]	TLD	1.50	1.50	-
[23]	TLD	4.37	-	-
[14]	TLD	0.80	0.56	1.12
[7]	TLD	0.07–0.47	-	-
[15]	TLD	2.52	-	-
[8]	TLD	In mean 85.22 % of doses < 0.10	-	-
[16]	TLD	0.90–2.00	-	-

TLD = Thermoluminescent Dosimeter.

Table 2b: Summary of seven articles from the fifteen included studies reporting mean annual individual doses for all specialities of medical sectors and others sectors (Industrial/ Research/Teaching)

Authors	Type of dosimeter	Mean annual individual doses (in mSv)		
		Medical sectors	Others sectors	
			Industrial	Research/Teaching group
[18]	TLD	8.20	2.34	4.39
[10]	TLD	4.51	-	-
[11]	TLD	0.57	0.54	-
[13]	TLD	0.44	0.54	0.38
[19]	TLD	3.20-3.70	4.70-19.40	-
[26]	TLD	1.68	0.93	0.92
[22]	TLD	2.7	16.25	-

TLD = Thermoluminescent Dosimeter.

Discussion

The updating of information on this subject through scientific literature, such as UNSCEAR report, 2017 and International Atomic Energy Agency, 2014b, where African countries were very little represented, led us to undertake this study which consists in making to summarize existing information on monitoring of doses external radiation exposure for whole body of by medical workers on this continent. Studies included in this systematic review represent, across various countries, an update of dosimetric's doses monitoring of medical workers in Africa, with a focus on the monitoring of occupational radiation exposure in diagnostic radiology sector. Because a wide numbers of medical workers are exposed to lower doses which may not be without consequences. We were able to find articles only from 11 countries out of 54 in Africa. This number is not representative as monitoring programs are available in some other countries, but they did not published papers on occupational radiation doses. The annual mean effective doses were provided by a little less than half of the studies selected for several exposed groups (medical, industry and research/teaching groups). The scarcity of dose monitoring data in African countries may be explained in part by the low participation rates of these countries in International Atomic Energy Agency (IAEA) technical studies. The results showed that, out of 55 countries that participated in the study from IAEA on individual dosimetry's monitoring of Interventional Cardiology from medical sector [5], only 2 were in Africa, and it had the lowest participation rate of 6% (2 countries among 32 representing the total number of participating countries). No specific study produced by the IAEA, for the field of diagnostic radiology and nuclear medicine was found.

In addition, several African countries (Benin, Burundi, Green cap, Central African republic, Comoros, Republic of Congo, Djibouti, Equatorial Guinea, Eritrea, Guinea, Guinea-Bissau, Lesotho, Liberia, Malawi, Rwanda, Chad, Togo) [28] do not yet have

1 a dosimetry service functional in their country, despite the steps taken by the Mission
2 Radiation Protection Advisory Team, IAEA, since 1984 [29]. However, the countries
3 that have some may not publish the results of their surveillance. During the IAEA
4 meeting in 2017 in Africa as part of Strengthening National Capabilities on
5 Occupational Radiation Protection, 21 out of 28 participating countries had a
6 dosimetric monitoring program [28]. The IAEA would have declared that only 17
7 countries participated in an intercomparison study [28]. This would confirm the thesis
8 of the UNSCEAR 2017 report from the low participation of African countries in the
9 studies.

10 The requested dose limit for effective dose is 20 mSv per year on average over 5
11 consecutive years (100 mSv in 5 years) and 50 mSv in one year [30]. A wide range of
12 data has been produced by the different articles that have been selected. But as part
13 of our study, we also compared the mean annual effective doses between medical
14 practices on the one hand and between disciplines on the other hand. In medical
15 sector's workers in study carried out by *Farai and Obed*, the OEW have received a
16 mean annual effective dose above the 1/3 of 20 mSv, annual dose limit requested.
17 However, in three articles some extreme values are above the annual requested dose
18 limit [8,14,26]. That is the case of one OEW from study carried out in Burkina Faso in
19 1990 by *Yakoro et al.* [8] where the value is 42.84 mSv in two months monitoring. The
20 reason advanced by authors is the improper location of the said dosimeter. That is the
21 same reason provided by others authors.

22 In all height articles (Table 2a), the diagnostic radiology group had the lowest values
23 and for seven articles in Table 2b, the medical sectors presents the lowest values of
24 mean annual effective doses, except for the study by *Farai and Obed* [18]. We also
25 found, when a comparison was made between the mean of the annual effective doses
26 inside the medical specialities (diagnostic radiology, nuclear medicine and
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1 radiotherapy), diagnostic radiology was favoured, presenting the low annual effective
2 dose means. However, we have observed in this study between different countries,
3
4 the mean annual effective doses ranged from 0,07 to 4.37 mSv (Table 2a), between
5
6 2011 and 2007, at Burkina Faso and Nigeria respectively, for the diagnostic radiology
7
8 group. This difference observed from one country to another can be explained by the
9
10 fact that organizational characteristics of medical fields can be different. Improvement
11
12 of practices and devices over time can influence exposure time. That is the reason why
13
14 the mean annual effective doses has decreased between period from 2007 to 2011
15
16 between Burkina Faso [7] and Nigeria [23]. However, we observe that in the years
17
18 2007, at the level of the diagnostic radiology sector, several countries presented the
19
20 highest annual dose means values [12,15,23]. That is for the same reason that
21
22 between 1990 to 1999 and 2008 to 2009 for studies carried out in Nigeria [18] and
23
24 Ghana [13] respectively, there is a decreasing considerable of mean annual effective
25
26 doses. The same trends are observed through the studies performed by *Bayou et al.*
27
28 [10] at Ethiopia and *Gordon et al.* [11] at Ghana, where the mean annual effective
29
30 doses decrease from 4.51 to 0.57 mSv between 1988 and 2011, respectively.
31
32 However, we note the heterogeneity of mean annual effective doses for the same year
33
34 where the measures carried out between different countries, in medical sectors. The
35
36 types of device (high or low dose rate) or radiation protection systems takes in place
37
38 can explain this heterogeneity. The same conclusion on improvement of practices, can
39
40 be drawn regarding to the comparative study intra-countries of the annual effective
41
42 mean doses for the medical sector between *Gordon* and *Adjei's* studies where the
43
44 doses decrease from 0.57 to 0.44 mSv between 2002 and 2009 in Ghana. In Nigeria,
45
46 *Farai* and *Ogundare's* studies show a decrease in the annual mean effective doses
47
48 from 8.20 to 3.70 mSv between 1990 and 2001. In contrast to these two countries, the
49
50 studies carried out in Burkina Faso show an opposite trend, from 2007 to 2011, the
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1 dose increased of < 0.10 to 0.47 mSv according to studies by *Yakoro* and *Tapsoba*.
2
3
4 This situation is certainly due to a growth in radiological procedures performed on the
5
6 same devices in recent years.
7
8
9

10 11 **Conclusion**

12
13 This study showed that few countries in Africa publish the results of their dosimetric
14
15 monitoring. It also shows that the doses recorded are sometimes relatively high, hence
16
17 the need to encourage systematic dosimetric monitoring of all exposed workers for
18
19 better monitoring of their state of health.
20
21
22

23
24 The paucity of international publications of dosimetric monitoring data in African
25
26 countries does not reveal the manifold efforts made by them to optimize the protection
27
28 of workers and the public. However, several countries have shown, through published
29
30 studies, the improvement of radiation protection occupational.
31
32

33 **Acknowledgments**

34
35 This work was supported by the Division for Africa, Department of Technical
36
37 Cooperation of International Atomic Energy Agency (IAEA). We especially thanks to
38
39 Catherine Luccioni and Olivier Laurent for their real involvements in the reading and
40
41 revising the manuscript. We are also grateful to Imène Mansouri and Françoise Terrier
42
43 for their unfailing support and advice.
44
45
46

47 **Conflicts of Interest**

48
49
50 The authors declare that there is no conflict of interest.
51
52

53 **ORCID iDs**

54
55
56 **Alfred Arnaud Gbetchedji** <https://orcid.org/0000-0002-9100-0166>

57
58
59 **Rodrigue S. Allodji** <http://orcid.org/0000-0002-1895-8415>
60

REFERENCES

- [1] UNSCEAR 2016 *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (New York: United Nations)
- [2] Dauda A M, Ozoh J O and Towobola O A 2019 Medical doctors' awareness of radiation exposure in diagnostic radiology investigations in a South African academic institution *South Afr. J. Radiol.* **23**
- [3] Wang J X, Zhang L A, Li B X, Zhao Y C, Wang Z Q, Zhang J Y and Aoyama T 2002 Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1995: *Health Phys.* **82** 455–66
- [4] International Atomic Energy Agency 2014 *The information system on occupational exposure in medicine, industry and research (ISEMIR): industrial radiography.*
- [5] International Atomic Energy Agency 2014 *The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry, and Research (ISEMIR): interventional cardiology.*
- [6] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J and Altman D G 2009 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement *Annals of Internal Medicine* **151** 7
- [7] Tapsoba T L, Ouattara F, Ouédraogo S, Sanon H, Yanaba D H and Gansonré V 2012 État du suivi dosimétrique des travailleurs dans les services de radiologie de la ville de Ouagadougou *Médecine Nucl.* **36** 539–44
- [8] Yakoro A, Ouédraogo N and Traoré S 2010 First assessment of individual monitoring of medical workers occupationally exposed to ionizing radiation in Burkina Faso 7
- [9] Alramlawi S A, Alsaqr A S, Zayat D M A and Galal M 2015 Assessing the Occupational Radiation Doses for Medical Workers at Cairo University Hospital Based on Job Categories 4
- [10] Bayou T 1991 Levels of doses to radiological workers in Ethiopia: 1977-1988 *Ethiop Med J* **29** 119–26
- [11] Gordon S W, Schandorf C and Yeboah J 2011 Optimization of radiation protection for the control of occupational exposure in Ghana *Radiat. Prot. Dosimetry* **147** 386–93
- [12] Hasford F, Owusu-Banahene J, Amoako J K, Otoo F, Darko E O, Emi-Reynolds G, Yeboah J, Arwui C C and Adu S 2012 Assessment of annual whole-body occupational radiation exposure in medical practice in Ghana (2000-09) *Radiat. Prot. Dosimetry* **149** 431–7
- [13] Adjei D, Darko E O, Schandorf C, Owusu-Manteaw P and Akrobertu E 2012 Personal dose analysis of TLD glow curve data from individual monitoring records *Radiat. Prot. Dosimetry* **152** 273–8
- [14] Osei E K 1997 Occupational Radiation Exposure in Ghana *Radiat. Prot. Dosimetry* **71** 207–14

- 1 [15] Korir G K, Wambani J S and Korir I K 2011 Estimation of annual occupational
2 effective doses from external ionising radiation at medical institutions in Kenya *South*
3 *Afr. J. Radiol.* **15** 116
4
5
6 [16] Andriambololona R, Ratovonjanahary J F, Randriantsizafy R D, Rakotoson E and
7 Razafindrabe R L 2002 Thermoluminescence external personnel monitoring of workers
8 in diagnostic radiology in Madagascar *Hep-Mad '01 Proceedings of the First*
9 *Madagascar International Conference on High-Energy Physics (Antananarivo,*
10 *Madagascar: World scientific)* pp 13–5
11
12 [17] Chinangwa G, Amoako J K and Fletcher J J 2018 Investigation of the status of
13 occupational radiation protection in Malawian hospital *Malawi Med. J.* **30** 22
14
15 [18] Farai, P. I and Obed, I. R 2001 Occupational Radiation Protection Dosimetry in Nigeria
16 *Radiat. Prot. Dosimetry* **95** 53–8
17
18 [19] Ogundare F O and Balogun F A 2003 Whole-body doses of occupationally exposed
19 female workers in Nigeria (1999–2001) *J. Radiol. Prot.* **23** 201–8
20
21 [20] Okeji M, Anakwue A and Agwuna K 2010 Radiation exposure from diagnostic
22 radiography: an assessment of X-ray beam collimation practice in some Nigerian
23 Hospitals *Internet J. Med. Update - EJournal* **5**
24
25 [21] Eze K, Marchie T, Eze T, Nzotta C and Okegbunam B 2011 The state of occupational
26 radiation protection and monitoring in public and private X-ray facilities in Edo state,
27 Nigeria *Niger. J. Clin. Pract.* **14** 308
28
29 [22] O. Ogundare F and A. Balogun F 2003 Analysis of occupational doses of workers on
30 the dose registry of the Federal Radiation Protection Service in 2000 and 2001 *Radiat.*
31 *Prot. Dosimetry* **103** 57–62
32
33 [23] Nzotta C C and Chiaghanam N O 2010 Occupational Radiation Dose to X-ray workers
34 in Radiological units in South Eastern Nigeria 3
35
36 [24] Ahmed N A, Nayl A I and Suliman I I 2012 Equipment performance and radiation
37 protection status in X-ray fluoroscopy units in Sudan *Radiat. Prot. Dosimetry* **148** 174–
38 80
39
40 [25] Muhogora W E, Byorushengo E, Lema U S, Mboya G, Ngatunga J B, Sawe S,
41 Katsidzita N M, Mikidadi S, Chuma F, Marco A and Hamed M I 2013 Occupational
42 radiation exposure in Tanzania (1996-2010): status and trends *Radiat. Prot. Dosimetry*
43 **153** 403–10
44
45 [26] Muhogora W E, Nyanda A M, Ngaile J E and Lema U S 1997 Occupational dose trends
46 in Tanzania 7
47
48 [27] International Atomic Energy Agency and International Labour Office 2018
49 *Occupational radiation protection: general safety guide*
50
51 [28] IAEA 2016 *The Role of Dosimetry in Protecting Workers Exposed to Ionizing Radiation*
52 (VIENNE: IAEA)
53
54 [29] International Atomic Energy Agency 1989 IAEA Bulletin 1989.pdf
55
56
57
58
59
60

1 [30] International Atomic Energy Agency A 2016 *Radiation protection and safety of*
2 *radiation sources: Basic international safety standards* (Vienne: AIEA)
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Accepted Manuscript

Annexe 29

Experimental assessment of workplace radiation exposure in diagnostic X-ray medical imaging centres in Benin from 2019 to 2020

Arnaud A. Gbetchedji PhD(c)^{1,2,3,4,‡}, Imene Mansouri PhD^{1,2,3}, Hubert C. Hounsossou PhD⁴, Gilles D. Houndetoungan MD⁵, Bertin A Gbaguidi PhD⁴, Nadia Haddy PhD^{1,2,3}, Thierry C. M. Medehouenou PhD⁴, Alphonse S. Avocefohoun PhD⁴, Daniel S. Takou PhD⁴, Carole Rubino MD, PhD^{1,2,3}, Olivier Biau MD⁵, Daton Medenou PhD⁴, Florent de Vathaire PhD^{1,2,3}, Kuassi M. Amoussou-Guenou MD, PhD⁵, Rodrigue S. Allodji PhD^{1,2,3,4}

¹Université Paris-Saclay, UVSQ, Univ. Paris-Sud, Inserm, CESP-U1018, Radiation Epidemiology Team, 94807, Villejuif, France

²INSERM, CESP, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

³Gustave Roussy, Department of Clinical Research, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

⁴École Polytechnique d'Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, 01 P.O. Box 2009, Cotonou, Benin

⁵Faculté des Sciences de la Santé, 01 P.O. Box 188, Campus Universitaire Champ de Foire, Cotonou, Benin

‡Corresponding author:

Arnaud A. Gbetchedji, Radiation Epidemiology Group/CESP-Unit 1018 INSERM, Gustave Roussy, B2M, 114, rue Édouard Vaillant 94805 Villejuif Cedex, Tel +33 (0) 1 42 11 54 98/Fax +33 (0) 1 42 11 56 18

E-mail: galfredarnaud@yahoo.fr

Word count: 2014 of 5000; abstract: 339 of 500

Short running title: Radiation dose measurements in X-ray medical facilities in Benin

KEY-WORDS: Workplace ambient dosimetry, occupational exposure, medical imaging, X-ray, Benin.

Abbreviations	
CT-scan	Computed tomography scan
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
kV	kilovoltage
mAs	milliampere.seconds

OEW	occupationally exposed workers
-----	--------------------------------

Funding: This work was supported by the International Atomic Energy Agency (IAEA).

ABSTRACT

The ease of prescribing radiological examinations has prompted an expansion in radiological procedures and, consequently, an increase of occupational dose to medical imaging workers. However, little is known about radiation exposure in the workplace of medical radiology professionals in many countries, and in Benin particularly. The purpose of this study was to assess ambient radiation doses in diagnostic X-ray medical facilities in Benin and to observe whether exposure levels are below reference levels. A total of 72 public and private medical imaging centres participated in a cross-sectional study carried out from June 2019 to February 2020 in Benin. These centres had 59 X-ray, four chest and six Computed tomography (CT) scan rooms. A calibrated radiameter able to measure short, pulsed or continuous X fields and gamma / beta (50 nSv to 10 Sv) was used to measure exposure levels in these functional rooms. Scattered X-ray doses and exposure time from radiological examinations both behind the lead glass of the control area to assess the levels of exposure of professionals and outside of the examination room to evaluate the level of exposure of the public (including non-exposed workers) have been provided. Equivalent doses estimated per hour were compared with the reference levels of 7.50 and 0.05 μSv per hour for workers and the public, respectively. At the control area, the mean/median (min-max) equivalent doses were 0.09/0.07 (0.00-0.21), 2.39/0.13 (0.00-75.67) and 228.39/28.65 (0.39-869.75) μSv per hour for the chest, X-ray and CT-scan rooms, respectively. Among 69 examination rooms, 13.04% of the equivalent dose estimated in the workplace behind the lead glass was greater than 7.50 μSv per hour; 65 out of 69 examination rooms showed that 40.00% of the equivalent dose estimated behind the doors was greater than 0.05 μSv per hour. These results demonstrated that current controls, including leaded glass separating the control panel and leaded doors between the examination room and the corridor, are inadequate to limit radiation exposures. The controls must be upgraded and a dosimetry program should be implemented to monitor exposures of employees, patients and visitors.

INTRODUCTION

Ionizing radiation is used widely for diagnostic imaging, and commonly used in the clinical diagnosis and treatment of cancer; however, its improper use can induce health consequences. The radiation exposure of patients, workers, populations and environment from medical, industrial and teaching/research applications has to be assessed and, if necessary, controlled (International Atomic Energy Agency, 2018). There is a noticeable increase year after year in the frequency of radiological procedures (Samer et al., 2016). Therefore, during the last decade, the number of exposed health workers in departments of nuclear medicine and diagnostic radiology has increased (Al-Abdulsalam and Brindhaban, 2014; Covens et al., 2012; Linet et al., 2010; Pauwels and Bourguignon, 2012; Smith-Bindman et al., 2012). In 2008, the estimated worldwide annual number of diagnostic and interventional radiological procedures (including dental) was 3.6 billion (Eze et al., 2013; International Commission on Radiological Protection, 2011). In Africa, medical exposure to ionizing radiation has increased with the wide availability of computed tomography (CT) scan and conventional radiology devices with the consequences of the increased risk of radio-induced cancer (Neossi Guena et al., 2018). The same observation was made by Suliman et al. in their study in the Sudan (Suliman et al., 2015) and Eze et al. in Nigeria (Eze et al., 2011). Therefore, it is necessary to ensure a healthy workplace for medical workers.

In Benin, medical imaging can be mainly summed up in standard radiology, CT-scan, mammography and dental X-ray. Between 2015 and 2019, the number of radiological devices has increased from 25 to 36 in public centres (Dpmed-Ministry of Health, 2019), with a consequent increase in radiological procedures. Unfortunately, the development of this radiological equipment took place in an unregulated environment. During X-ray examinations,

radiographers stand behind a radiation shielding lead glass (one part of the screen) in control area, which is supposed to guarantee the reference level of 7.50 μSv per hour is not exceeded in the workplace (supervised area) (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014). It is because of the risk of thyroid and female breast cancers, as well as cataracts (Memon et al., 2010; Sun et al., 2016; Wang et al., 2015, 2002), that we focused our study on exposure in the workplace (control area) from which radiographers observe patients. Since the examination room doors, which are generally not far from the waiting rooms in Benin, are used by both health workers and public members, it is also important to assess the doses to which those latter are exposed to behind the doors in the corridor. The reference level required for members of the public 0.05 μSv per hour (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014). In March 2018, Benin adopted a law on radiation safety and nuclear safety (Benin's Government, 2018) and the Regulatory Authority Body has been functional since August 20, 2020 (Benin's Government, 2020). Furthermore, Benin also has a new centre for occupational dose monitoring, which is performing technical controls before starting its activities.

The purpose of this study is to assess ambient radiation doses in X-ray medical imaging centres and to observe whether the exposure levels are below required reference levels. (International Atomic Energy Agency and European Commission, 2014).

METHODS

Data Collection and Processing

A cross-sectional study was carried out from June 2019 to February 2020 in medical imaging centres in Benin. These public and private centres voluntarily agreed to participate in this study. Preliminary information regarding the type and the location of different hospitals were obtained

from the Ministry of Health of Benin. Some centres were excluded for technical problems and misunderstandings: some hospital managers thought that the study was about a control of the ministerial authorities (n=2); others had built the radiology rooms but had not yet equipped them (n=2), and finally some centres had machines under repair (n=4). At the time of measurement, some examination rooms were excluded for equipment that was broken or under repair. Only functional X-ray devices were selected in this study of X-ray, chest and CT-scan rooms. The results of the identification and selection process are displayed in a flow chart in Fig. 1.

Before measuring the radiation dose in these different examination rooms, a self-completion questionnaire (in Supplementary Material) designed in-line with the objectives of the study was used, to obtain different information from service managers about the characteristics of examination rooms, such as (i) dimensions of the examination rooms in centimetres (cm), (ii) X-ray device specifications and (iii) number of examinations per year.

Ethical consideration

This research was not human subjects research, but to the agreement of the hospital managers was requested and obtained before carrying out the radiation dose measurements in the medical imaging centres.

Measurements of workplace doses

Both following instruments were used: (i) a meter to measure the room dimensions and (ii) a AT1123 radiameter able to measure short, pulsed or continuous X-ray fields and gamma / beta (50 nSv to 10 Sv). The radiameter was calibrated on May 14, 2019 (see Supplementary

Material) and was used to measure exposure levels ($H_i^*(10)$) in these functional rooms. Ambient equivalent dose ($H_i^*(d)$) at a point in a radiation field is defined as the equivalent dose that would be produced by the corresponding field in the ICRU sphere at a depth (d) (in mm) (Chinangwa et al., 2017; International Commission on Radiation Units and Measurements, 1985). All measurements were carried out by the same operator.

At each site, the first measurement was the background equivalent dose level. The patient's body was simulated by a phantom made of plexiglass filled with water (polyethylene high density (PEHD), 0.95 g/cm^3), with a volume of 26.48 L, instead of the regular phantom in polymethacrylate of methyl (PMMA, 1.05 g/cm^3) "Human Body". The measurements were made at the workplace of the radiographer, behind the lead glass screen of the control areas, and in the corridor, behind the lead doors of examination rooms (Figs. 2 and 3). The measurements were carried out at height corresponding to the usual level of the chest of occupationally exposed workers, as requested by the IAEA (International Atomic Energy Agency and International Labour Office, 2018).

The lumbar examination, chest and CT abdomen-pelvis were chosen as referents because of their large diffusion volumes (scattered radiation) compared to those in other examinations carried out at the same distance (Institut national de recherche et de securite, 2010), and frequency of achievements. The conditions for carrying out these examinations are described in Tables A and B of the Supplementary Material. The image acquisition parameters used were

milliamperere.seconds (mAs) and kilovoltage (kV), as these are the parameters that radiographers usually use during reference examinations (International Commission on Radiological Protection, 1975; Zaichick, 2013). Image acquisition parameters are summarized in Tables A and B (Supplementary Material).

Equivalent dose rates and exposure times were measured for one examination (Tables C, D and E in Supplementary Material) at each site. In order to obtain close-to-reality equivalent dose rates, a correction factor (T) was calculated for the different types of reference examinations, as the ratio between the patient and phantom equivalent dose carried out in the same experimental conditions. The values of correction factor (T) obtained were 0.63 ± 0.24 for chest radiography and 1.26 ± 0.30 for both lumbar radiography and CT-scan abdomen-pelvis. The equivalent dose patients or equivalent dose phantoms used are described in Tables G and H in the Supplementary Material.

Formula used

It is possible, on the basis of the questionnaire, to estimate the mean number of examinations (lumbar and chest radiography, as well as CT-scan abdomen-pelvis) per hour. These different numbers are summarized in Tables A and B (Supplementary Material). Equivalent dose rates were integrated in 1 hour to obtain an equivalent dose ($H_{ih}^*(10)$), which was estimated by the following formula:

$$(H_{ih}^*(10)) = (H_i^*(10)) \times t \times n,$$

where ($H_i^*(10)$) in $\mu\text{Sv/hr}$ are equivalent dose rates estimated after affecting the correction factor (T) at equivalent dose rates measured; t: time of exposure in hour (hr) per examination; n: number of examinations performed in 1 hour. This formula was used to compare workplaces and corridors to radiation protection criteria.

Statistical analysis

($H_{ih}^*(10)$) was compared to the reference levels of 7.50 μSv for the supervised areas (control areas) and 0.05 μSv for public places (see in the Supplemental Materials for explanatory note of reference level calculations) (International Atomic Energy Agency and International Labour Office, 2018). The data collected were analysed for the questionnaire and dosimetric data, using SAS® version 9.4, R-Studio © 2009-2019, version 1.2.5019, and software tool IH STAT. Statistical inference was based on two-sided tests, and a P-value ≤ 0.05 was considered statistically significant. According to the distribution of the dose, parametric and nonparametric tests were carried out to obtain comparisons and correlations between different values.

RESULTS

Out of 80 public and private centres, 72 participated in this study. In total, there were 73 X-ray, four chest and 13 CT-scan rooms identified in these centres, of which 59 X-ray, four chest and six CT-scan rooms were evaluated; all were operational, and the participation rate was 80.82%, 100.00% and 46.15%, respectively (Table 1). Based on centre registers, we recorded, for the year 2019, 181140 and 11472 examinations for standard radiology (including chest radiography) and CT-scan procedures, respectively.

The AT1123 radiometer allowed us to carry out different measurements behind the screen (lead glass and doors). For equivalent dose estimated behind the lead glass in control area, the mean doses were 2.39, 0.09, 228.39 μSv for the X-ray, chest, and CT-scan rooms, respectively. These equivalent dose estimates were increased from the chest rooms to the CT-scan. Similar trends were observed in the corridor (Table 2).

The comparison carried out between equivalent dose estimated per hour at control area and corridor in the X-ray rooms showed that they were statistically significantly different (p -value < 0.0001). In contrast, at both these levels, in the chest and CT-scan rooms, they were not statistically significantly different for the same points considered. For all rooms, there was a strong statistically significant correlation between equivalent doses estimated per hour at control area and corridor ($r = 0.72$, p -value < 0.0001).

At the control area, some equivalent doses estimated per hour at control area were higher than the reference levels, 6.78% and 83.33% (Table 2) for X-ray and CT-scan rooms, respectively. Equivalent doses estimated per hour at corridor of X-ray and CT-scan rooms were above the reference levels, 33.90% and 83.33% (Table 2) respectively. For the chest rooms, only half of the equivalent doses estimated per hour at the corridor were above the reference levels. Statistically significant difference was noted between the equivalent dose estimated per hour at control area of X-ray rooms and all examination rooms and reference levels.

Overall, for the 69 control areas and 65 corridors, 13.04% and 40.00% (Table 2) of equivalent dose estimated per hour were higher than reference levels, respectively. We noted a negative correlation between the area of examination rooms and equivalent dose estimated per hour at control area, which was statistically insignificant. The same negative correlation was found between the distance separating the phantom's middle to the lead glass and equivalent dose estimated per hour at control area. In contrast, this negative correlation was statistically significant.

DISCUSSION

Since its independence in 1960 and its accession to the IAEA in May 1999, Benin did not have a law on radiological safety and nuclear security until March 2018. The Regulatory Authority Body just started its activities on August 20, 2020. Our study set out to take stock of the situation regarding the installation of standard radiology and CT-scan rooms in Benin.

This study brings us to look at ambient dosimetry, which is a section of the workplace safety assessment. Workplace safety assessment is essential for effective dosimetric monitoring and epidemiological purposes. It includes, apart from ambient dosimetry, individual dosimetry and the study of plausible dysfunctions, which can cause accidental irradiation (Antoni and Bourgois, 2013; Bourgois and Antoni, 2019). The objective of this study was to classify the workplace, in particular the workplace (control areas) of the different standard radiology and CT-scan rooms. The classification of workers will not be discussed in this study.

Due to technical problems and misunderstandings of the study's purpose, eight centres listed in the results could not participate in this study. Among the results, we remarked that the equivalent doses increased from chest rooms to those of CT-scan rooms. This trend in the increasing evolution of the equivalent doses is justified by the fact that the milliamperes.seconds loads used increases from the chest to CT-scan rooms.

The equivalent dose mean/median (min-max) per hour observed at the X-ray and CT-scan rooms were 2.39/0.13 (0.00-75.67) and 228.39/28.65 (0.39-869.75) μSv respectively, for measurements carried out at the control area. These figures were high compared to those published by Achuka et al. (Achuka et al., 2019), which were 1.62 and 2.65 μSv , respectively. Our figures in X-ray rooms were high compared to mean equivalent doses published by other

authors, including 1.61 $\mu\text{Sv/h}$ (Salama et al., 2016), 0.95 $\mu\text{Sv/h}$ (Haider et al., 2014), 0.82 $\mu\text{Sv/h}$ (Skam et al., 2017) and 0.024 $\mu\text{Sv/h}$ (University of Maiduguri et al., 2017). When we consider only the median equivalent dose at the control area, X-ray rooms in this study were lower than 1.62 μSv , which is the mean published by Achuka et al. (Achuka et al., 2019). Our values of both mean and median at the control area for X-ray rooms was lower than the 3.10 μSv published by Chinangwa et al. (Chinangwa et al., 2017). Our relatively high means are explained by the fact that some lead glass didn't attenuate the equivalent dose rates correctly. This can be also explained by the fact that the medical imaging devices are not calibrated, since the acquisition by purchases or by donations, therefore, produce high equivalent dose rates. On the other hand, some of the extreme values recorded could be explained by the fact that some examination rooms had openings around the lead glass or did not have lead glass. These extreme values, especially those recorded in the CT-scan rooms, influenced the means. However, the percentage of non-compliance of the lead glass of the X-ray rooms was relatively low, 6.78% compared to the 15% published by Haider et al. in Bangladesh (Haider et al., 2014). But, the national law in Bangladesh requires 1.00 μSv instead of 7.50 μSv at international reference levels and national reference levels from the regulatory acts of Benin. In the study by Haider et al., 30% of doors were not in compliance with their reference levels compared to 33.90% in our study for the X-ray rooms. We note that the different authors cited in our study didn't specify the number of examinations carried out in each room, which can influence the equivalent dose. In addition, their sample of measurements varied from three to 13 against 69 in our study.

A strong positive correlation between glass and doors, ($r = 0.72$), which is statistically significant ($p < 0.0001$), proves that the lead glass and doors probably contained material with the close density. The weak negative correlations ($r = -0.15$ and $r = -0.28$, respectively) (Table 3) observed between the equivalent dose per hour and area of the examination rooms, on the

one hand, and between the equivalent dose per hour and distance separating the phantom's middle and lead glass, on the other hand, shows that increased distance separating the source (scattered radiation) and the control area is associated with decreased equivalent dose. The equivalent dose per hour is proportional to the inverse square of distance that separates the source (scattered radiation) and point of measurements (Institut national de recherche et de securite, 2010). The hospital managers could install X-ray devices in larger rooms. Examination tables and control area must be placed (as far as possible) away from each other.

This study is the first which is carried out in Benin where hospital managers, head of the medical imaging department and exposed workers are involved in the same study with metrology. We have specified the number of examinations, which can be performed in each room, generating the highest equivalent dose per hour. This number of examinations greatly affects the equivalent dose. In addition, our sample was large relative to other studies. However, this study is limited by the phantom used which is not the one usually used in other countries. This can over- or under-estimate the equivalent dose. As a result, we have used a correction factor (T), in order to obtain close-to-reality equivalent dose.

Selection bias was considered in this study because we cannot certify that the list of medical imaging centres was exhaustive and that some centres withdrew from the study. We were not able to carry out the measurements in all the centres. This risk is small, however, as just 2.5% of centres which refused to participate in study.

CONCLUSION

In sum, out of 69 control areas (behind lead glass) and 65 corridors (behind lead doors) studied, 60 were classified as supervised areas and 39 as public places. Optimization of the radiation time of patients can reduce the equivalent dose for workers, as can quality control of all imaging machines in Benin. The equivalent dose recorded are sometimes relatively high. These results demonstrated that current controls, including leaded glass separating the control panel and leaded doors between the examination room and the corridor, are inadequate to limit radiation exposures. The controls must be upgraded and a dosimetry program should be implemented to monitor exposures of employees, patients and visitors. Another study using the dosimeter would be useful to complement this work.

Acknowledgments

We are grateful to Catherine Luccioni her real involvement in the reading and revising the manuscript. We especially thank Ms. Dehoue Mireille for her involvement in the reading of the manuscript. We are also grateful to Françoise Terrier for her unfailing support and advice.

Conflicts of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Data Availability Statement

All data are incorporated into the article and its online supplementary material.

Declarations

Funding for this study was provided by the Division for Africa, Department of Technical Cooperation of International Atomic Energy Agency (IAEA) that we especially thank.

ORCID iDs

Alfred Arnaud Gbetchedji <https://orcid.org/0000-0002-9100-0166>

Rodrigue S. Allodji <http://orcid.org/0000-0002-1895-8415>

REFERENCES

- Achuka JA, Usikalu MR, Aweda MA, *et al.* (2019) Background Radiation Dose in Selected X-Ray Facilities in Southwest Nigeria. *J Phys Conf Ser*;1299:012103.
- Al-Abdulsalam A, Brindhaban A. (2014) Occupational radiation exposure among the staff of Departments of Nuclear Medicine and Diagnostic Radiology in Kuwait. *Med Princ Pract*;23:129–33.
- Antoni R, Bourgois L. (2013) *Physique appliquee a l'exposition externe: dosimetrie et radioprotection*. Paris: Springer. ISBN 978-2-8178-0310-4
- Benin's Government. (2020) Search results - Radiological Safety [serial online] *Secretariat General Gouv. Benin*. Available from: URL <https://sgg.gouv.bj/recherche/?begin=2018-03-01&end=2020-03-18&keywords=suret%C3%A9%20radiologique&type=loi> (accessed 18 Mar 2020).
- Benin's Government. (2018) Search results - National Safety Authority [serial online] *Secretariat General Gouv Benin*. Available from: URL <https://sgg.gouv.bj/recherche/?begin=2018-03-01&end=2020-03-18&keywords=Autorit%C3%A9%20nationale%20de%20s%C3%BBret%C3%A9&type=decret> (accessed 18 Mar 2020).
- Bourgois L, Antoni R. (2019) Resolutions de problèmes sur les rayonnements ionisants: dosimetrie, instrumentation, protection radiologique de l'approche analytique a la resolution numerique Monte-Carlo via MCNP, Profil. Les Ulis: EDP Sciences. ISBN 2759823091.
- Chinangwa G, Amoako JK, Fletcher JJ. (2017) Radiation dose assessment for occupationally exposed workers in Malawi. *Malawi Med J*;29:254–8.
- Covens P, Berus D, de Mey J, *et al.* (2012) Mapping very low level occupational exposure in medical imaging: a useful tool in risk communication and decision making. *Eur J Radiol*;81:e962–6.
- Dpmed-Ministry of Health. (2019) Imagerie medicale | Direction de la pharmacie, du medicament et des explorations diagnostiques [serial online]. Available from: URL http://dpmed-benin.bj/site/imagerie_medicale (accessed 18 Mar 2020).
- Eze C, Iurhe N, Njoku J, *et al.* (2013) Assessment of radiation protection practices among radiographers in Lagos, Nigeria. *Niger Med J*;54:386–91.
- Eze K, Marchie T, Eze T, *et al.* (2011) The state of occupational radiation protection and monitoring in public and private X-ray facilities in Edo state, Nigeria. *Niger J Clin Pract*;14:308–10.
- Haider M, Shill S, Nizam QMR, *et al.* (2014) Shielding calculation based on NCRP methodologies for some diagnostic x-ray facilities in Bangladesh. *Sci Res J*;2:47.
- Institut national de recherche et de securite (INRS). (2010) *Radiologie conventionnelle: Installations fixes en milieu médical*.
- International Atomic Energy Agency. (2018) *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation: specific safety guide*. Vienna. ISBN 978-92-0-101717-8
- International Atomic Energy Agency, European Commission. (2014) *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. ISBN 978-92-0-135310-8 978-92-0-058908-9
- International Atomic Energy Agency, International Labour Office. (2018) *Occupational radiation protection: general safety guide*. ISBN 978-92-0-102917-1
- International Commission on Radiation Units and Measurements. (1985) Report 39. *J Int Comm Radiat Units Meas*; os20. ISBN 1742-3422, 1473-6691
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2011) *Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department*. Oxford.

- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (1975) Report of the task group on Reference Man (No. 23). Oxford: Pergamon Press.
- Linet MS, Kim KP, Miller DL, *et al.* (2010) Historical review of occupational exposures and cancer risks in medical radiation workers. *Radiat Res*;174:793–808.
- Memon A, Godward S, Williams D, *et al.* (2010) Dental x-rays and the risk of thyroid cancer: a case-control study. *Acta Oncol*;49:447–53.
- Neossi Guena M, Bayiha Mboua J, Alpha Zilbinkai F, *et al.* (2018) Evaluation of the level of implementation of radiation protection in the regional medical imaging centers of Cameroun. *J Afr Imag Médicale*;10:138–47.
- Pauwels EKJ, Bourguignon MH. (2012) Radiation dose features and solid cancer induction in pediatric computed tomography. *Med Princ Pract*;21:508–15.
- Radiametre AT1123 (2019) [serial online] 2019 APVL Available from: URL <https://www.apvl.com/radioprotection/420-radiametre-at1123.html> (accessed 30 Dec 2019).
- Salama K, AlObireed A, AlBagawi M, *et al.* (2016) Assessment of occupational radiation exposure among medical staff in health-care facilities in the Eastern Province, Kingdom of Saudi Arabia. *Indian J Occup Environ Med*;20:21.
- Samer SAZ, Khalid JK, Samir SY, *et al.* (2016) Ionizing radiation leakage in radio-diagnostic centers at Gaza Strip hospitals, Palestine. *Asian Rev Environ Earth Sci*;3:18–26.
- Skam DJ, Ibeanu IG, Zakari YI, *et al.* (2017) Radiographic room design and layout for radiation protection in some radio-diagnostic facilities in Katsina State, Nigeria. *J Assoc Radiogr Niger*;31:16–23.
- Smith-Bindman R, Miglioretti DL, Johnson E, *et al.* (2012) Use of diagnostic imaging studies and associated radiation exposure for patients enrolled in large integrated health care systems, 1996-2010. *JAMA*;307:2400–9.
- Suliman II, Ibraheem SB, Youssif BE, *et al.* (2015) Examination frequency and population dose from medical X-ray examinations in Sudan in 2010. *Radiat Prot Dosimetry*;165:141–5.
- Sun Z, Inskip PD, Wang J, *et al.* (2016) Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic x-ray workers, 1950-1995: estimation of radiation-related risks. *Int J Cancer*;138:2875–83.
- University of Maiduguri, Nkubli F, Nzotta C, *et al.* (2017) A survey of structural design of diagnostic X-ray imaging facilities and compliance to shielding design goals in a limited resource setting. *J Glob Radiol*;3:1041.
- Wang F-R, Fang Q-Q, Tang W-M, *et al.* (2015) Nested case-control study of occupational radiation exposure and breast and esophagus cancer risk among medical diagnostic X Ray workers in Jiangsu of China. *Asian Pac J Cancer Prev*;16:4699–704.
- Wang JX, Zhang LA, Li BX, *et al.* (2002) Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1995. *Health Phys*;82:455–66.
- Zaichick V, (2013) Data for the Reference Man: skeleton content of chemical elements. *Radiat Environ Biophys*;52:65–85.

Table 1: Types of centres, radiology equipment and radiology rooms in Benin

	General statistic^a	Participants^b	(%)^c
Types of centres	80	72	90.00
Public	53	51	96.22
Private	27	21	77.78
Radiology equipment	115	69	60.00
Yes	90	69	76.67
No ^d	25	0	0
Types of radiology rooms	90	69	76.66
X-ray	73	59	80.82
Chest	04	04	100.00
CT-scan	13	06	46.15

^aStatistics of centres, rooms and radiology equipment; ^bCentres and examination rooms that participated in this study; ^cRatio participants/ whole country; ^dEquipment broken or under repair.

Table 2: Statistic summary of equivalent doses ($H_{in}^*(10)$) in μSv for different examination rooms and comparison with reference levels

Type of rooms	Measurement location	N	Mean (μSv)	Median (μSv)	[Min-Max] (μSv)	p-value (Between mean control area and corridor)	Reference level (μSv)	p-value ^f (Between mean control area or corridor and Reference level)	(%) ⁱ
X-ray rooms	Control Area ^g	59	2.39	0.13	0.00-75.67	< 0.0001 ^(e)	7.50	< 0.0001	6.78
	Corridor ^h	57	0.94	0.02	0.00-24.72		0.05	0.06	33.90
chest rooms	Control Area ^g	4	0.09	0.07	0.00-0.21	0.11 ^(ee)	7.50	-	0.00
	Corridor ^h	2	0.04	0.04	0.00-0.08		0.05	-	50.00
CT-scan rooms	Control Area ^g	6	228.39	28.65	0.39-869.75	0.16 ^(ee)	7.50	-	83.33
	Corridor ^h	6	90.82	68.04	0.00-245.33		0.05	-	83.33
All rooms	Control Area ^g	69	21.91	0.18	0.00-869.75	< 0.0001 ^(e)	7.50	< 0.0001	13.04
	Corridor ^h	65	9.21	0.02	0.00-245.33		0.05	0.06	40.00

^(e)p-value obtained from t-test comparison between equivalent dose to the control area and corridor with lognormal distribution ^(ee)p-value of comparison obtained from Wilcoxon's nonparametric test between equivalent dose to the control area and corridor; ^fp-value obtained from t-test comparison between mean and reference level with lognormal distribution of mean; ⁱPercent of Equivalent dose estimated > reference level (μSv); ^gPoint situated behind the lead glass of control area; ^hPoint situated behind the lead doors of examination room outside in corridor.

Table 3: Correlations between the equivalent doses in μSv estimated at the control area level and area of examination rooms or distance

	N	Mean (μSv)	[Min-Max] (μSv)	Correlation / <i>p</i>-value¹
Examination rooms area (cm^2)	69	25.80	6.00-51.53	-0.15 / 0.22
Equivalent dose (μSv)	69	2.39	0.00-75.67	
Distance from phantom to lead glass (cm)	69	270.15	90-542	-0.28 / 0.02
Equivalent dose (μSv)	69	2.39	0.00-75.67	

¹*p*-value of correlation obtained from Spearman's nonparametric test between equivalent dose at the control area and examination rooms area or distance from the middle of the phantom to lead glass.

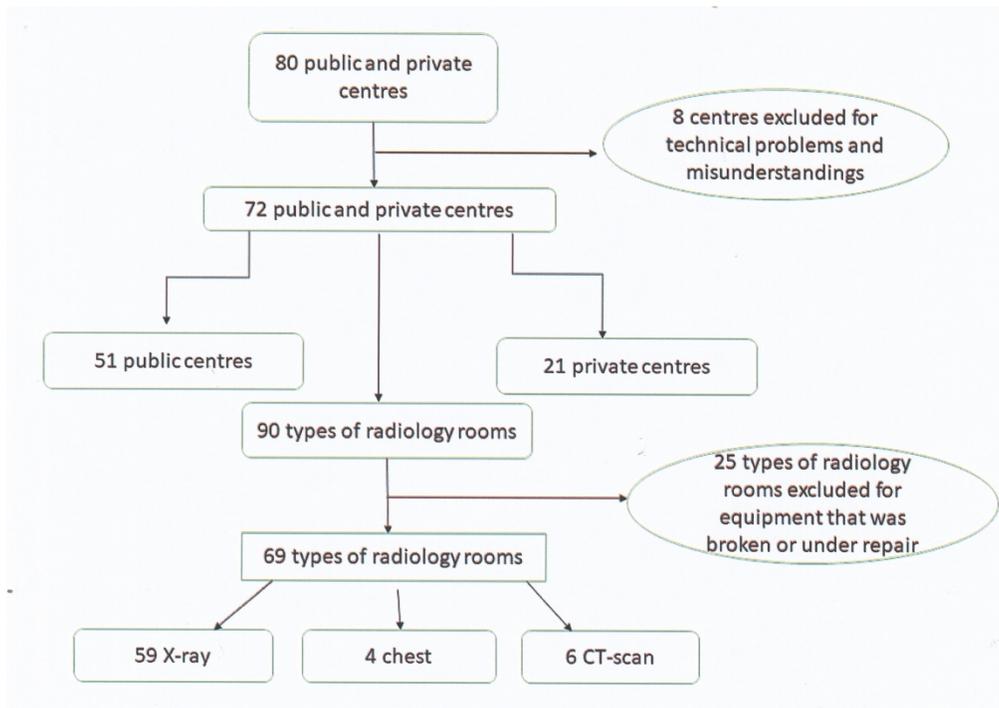


Fig. 1: Flow chart selection process of types of radiology room in Benin

236x168mm (300 x 300 DPI)

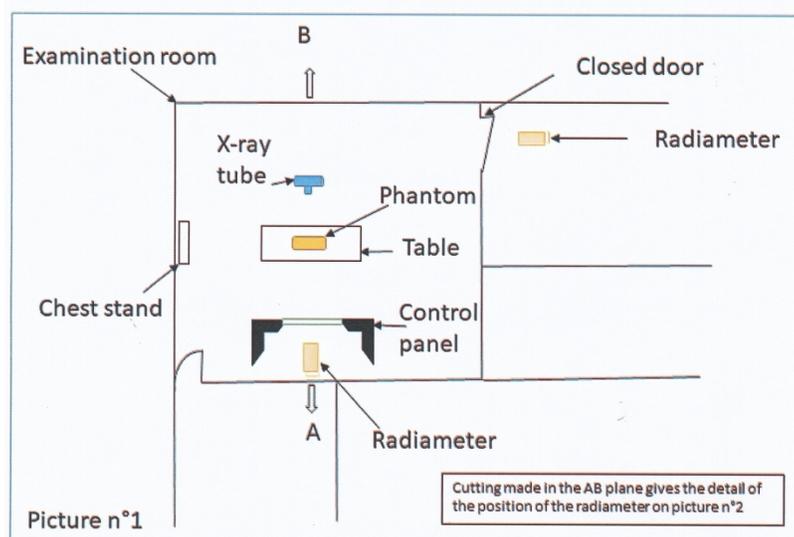


Fig. 2: Radiameter position during measurements for control panel and corridor

207x174mm (300 x 300 DPI)

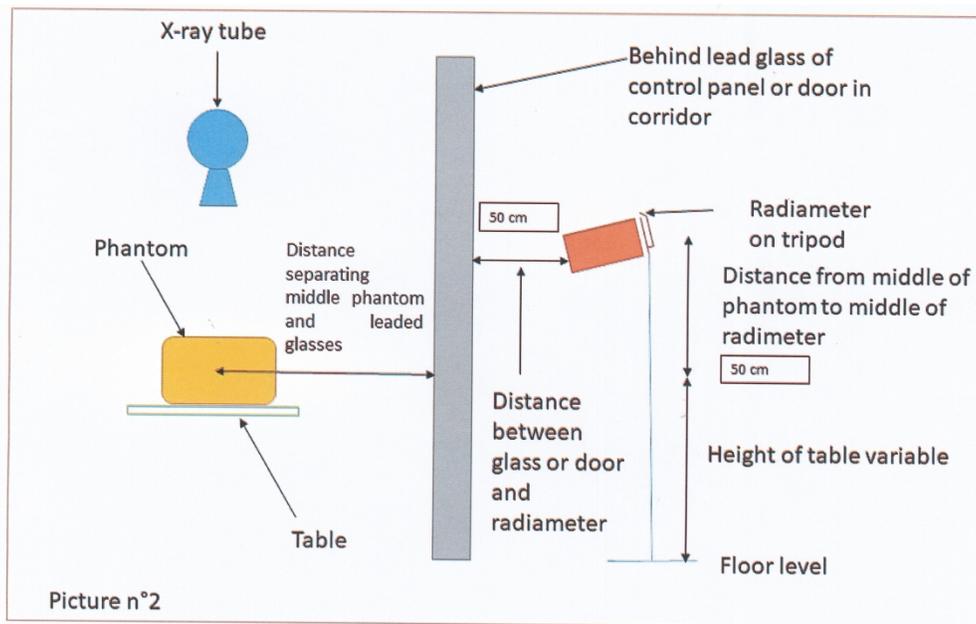


Fig. 3: Radiometer position relative to the radiation shielding lead glass or examination room door

214x175mm (300 x 300 DPI)

International Archives of Occupational and Environmental Health
Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from 1972 to 2019
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from 1972 to 2019
Article Type:	Original Article
Keywords:	Occupational eye diseases Retrospective cohort skin mass X-ray Benin
Corresponding Author:	Arnaud Alfred Gbetchedji, PhDc Paris-Saclay University: Universite Paris-Saclay Villejuif, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Paris-Saclay University: Universite Paris-Saclay
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Arnaud Alfred Gbetchedji, PhDc
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Arnaud Alfred Gbetchedji, PhDc Hubert C. Hounsossou, PhD Mama Cisse, PhD Gilles D. Houndetoungan, MD Daniel S. Takou, PhD Bertin A Gbaguidi, PhD Imene Mansouri, PhD Nadia Haddy, PhD Thierry C. M. Medehouenou, PhD Alphonse S. Avocefohou, PhD Carole Rubino, MD, PhD Olivier Biaou, MD Daton Medenou, PhD Florent de Vathaire, PhD Kuassi M. Amoussou-Guenou, MD, PhD Catherine Luccioni, PhD Rodrigue S. Allodji, PhD
Order of Authors Secondary Information:	
Funding Information:	International Atomic Energy Agency (IAEA) (1) Mr Arnaud Alfred Gbetchedji
Abstract:	Objective a large number of studies indicated that ionizing radiation exposure is a risk factor for

some cancers and non-cancer diseases. However hypothesis supported by the literature of knowing whether protracted exposure to external ionizing radiation like in radiology services could induce others cancers and non cancers diseases is unclear. The aim of this study was to assess the long term morbidity among medical X-ray workers in Benin, from 1972 to 2019.

Methods

Exposed (335) and unexposed workers (193), first employed between 1972 and 2019 were included in a cohort study in 2019 at Benin. Information on morbidity, personal and medical history, lifestyle, and socio-professional characteristics was retrieved from self-reported data. Spearman and Chi-square test were used to analyze the distribution of demographic characteristics in cohort. Cox proportional hazards regression was used to estimate hazard ratios (HRs) for the development of eye diseases (ED) and skin mass, adjusting for age, sex, smoking, alcohol drinking, occupational time, and year of employment.

Results

The exposed workers had a higher risk of occurrence of ED and skin mass with the adjusted HRs (aHR) of 2.3 (95% CI = 1.4–3.9) and 3.3 (95% CI = 1.2–12.7) respectively, after adjusting for relevant variables. Heavy alcohol drinking had an increased risk of skin mass compared to those who did not drink (aHR, 7.6; 95% CI = 2.2–22.5).

Conclusion

Association between radiation exposure and ED and skin mass was significant. Radiation exposure on the skin mass formation provide a basis for further studies.

[Click here to view linked References](#)

**Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from
1972 to 2019**

**Arnaud A. Gbetchedji PhD(c)^{1,2,3,4,‡}, Hubert C. Hounsossou PhD⁴, Mama Cisse PhD⁵, Gilles D.
Houndetoungan MD⁵, Daniel S. Takou PhD⁴, Bertin A Gbaguidi PhD⁴, Imene Mansouri PhD^{1,2,3}, Nadia
Haddy PhD^{1,2,3}, Thierry C. M. Medehouenou PhD⁴, Alphonse S. Avocefohoum PhD⁴, Carole Rubino MD,
PhD^{1,2,3}, Olivier Biao MD⁵, Daton Medenou PhD⁴, Florent de Vathaire PhD^{1,2,3}, Kuassi M. Amoussou-
Guenou MD, PhD⁵, Catherine Luccioni PhD⁶, Rodrigue S. Allodji PhD^{1,2,3,4}**

¹Université Paris-Saclay, UVSQ, Univ. Paris-Sud, Inserm, CESP-U1018, Radiation Epidemiology Team, 94807, Villejuif, France

²INSERM, CESP, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

³Gustave Roussy, Department of Clinical Research, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

⁴École Polytechnique d'Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, 01 P.O. Box 2009, Cotonou, Benin

⁵Faculté des Sciences de la Santé, 01 P.O. Box 188, Campus Universitaire Champ de Foire, Cotonou, Benin

⁶Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 Rue Saint-Martin, 75003, Paris, France

[‡]Corresponding author:

Arnaud A. Gbetchedji, Radiation Epidemiology Group/CESP-Unit 1018 INSERM, Gustave Roussy, B2M, 114, rue Édouard Vaillant 94805 Villejuif Cedex, Tel +33 (0) 1 42 11 54 98/Fax +33 (0) 1 42 11 56 18

E-mail: galfredarnaud@yahoo.fr

Word count: 3950 of 5000; abstract: 246 of 250

Short running title:

Keywords *Occupational* *eye diseases* *Retrospective cohort* *skin mass* *X-ray* *Benin*

1
2 **Abbreviations**
3

4

5	CI	Confidence interval
6	ICD-10	International Classification of Diseases 10th Revision
7		
8	HR	Hazard Ratio

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Abstract

Objective a large number of studies indicated that ionizing radiation exposure is a risk factor for some cancers and non-cancer diseases. However hypothesis supported by the literature of knowing whether protracted exposure to external ionizing radiation like in radiology services could induce others cancers and non cancers diseases is unclear. The aim of this study was to assess the long term morbidity among medical X-ray workers in Benin, from 1972 to 2019.

Methods Exposed (335) and unexposed workers (193), first employed between 1972 and 2019 were included in a cohort study in 2019 at Benin. Information on morbidity, personal and medical history, lifestyle, and socio-professional characteristics was retrieved from self-reported data. Spearman and Chi-square test were used to analyze the distribution of demographic characteristics in cohort. Cox proportional hazards regression was used to estimate hazard ratios (HRs) for the development of eye diseases (ED) and skin mass, adjusting for age, sex, smoking, alcohol drinking, occupational time, and year of employment.

Results The exposed workers had a higher risk of occurrence of ED and skin mass with the adjusted HRs (aHR) of 2.3 (95% CI = 1.4–3.9) and 3.3 (95% CI = 1.2–12.7) respectively, after adjusting for relevant variables. Heavy alcohol drinking had an increased risk of skin mass compared to those who did not drink (aHR, 7.6; 95% CI = 2.2–22.5).

Conclusion Association between radiation exposure and ED and skin mass was significative. Radiation exposure on the skin mass formation provide a basis for further studies.

Introduction

Overall, there are over 2.3 million medical radiation workers, and during half of their work time they are exposed to human-made sources of low-dose radiation (Wang et al. 2015; Yoshinaga et al. 2004). Radiologists and radiotherapists were one of the earliest occupational groups to be exposed to external radiation, according to Berrington (Berrington et al. 2001). This external radiation is the cause of some health effects. The health effects of acute, moderate to high radiation doses are well characterised (Laurier et al. 2017; Lee et al. 2021) and detailed in base of data from the Japanese atomic bomb survivors and for patients treated with radiotherapy (Allodji et al. 2019; Boice et al. 2019; Journy et al. 2019; Little et al. 2018). But according to study carried out by Azizova et al. (2018) the risk estimates remain unclear for prolonged exposure at low dose rates (Azizova et al. 2018), as medical workers. In additional, uncertainties persist regarding quantification of risks of adverse events associated with protracted exposure to low doses at low dose rates of radiation, which are typically encountered in environmental and occupational settings (Fournier et al. 2016). Within radiology, occupational health and safety is an important issue because of the very large number of exposed workers (Akyurt 2021). Few studies non cancer diseases hazards of human induced by low radiation doses, had been summarized by UNSCEAR (United Nations et al. 2008) and others authors (Charles 2001; Shimizu et al. 1992). However, the association between exposure to ionizing radiation and health events such as cataracts (Picano et al. 2012), opacities of the lens (Ainsbury et al. 2021),. In Africa, they are a limited number of epidemiology studies about effect's radiation ionizing among medical workers. Maalej (2007) in Tunisia, carried studies which showed radio-induced late effects with exposures at ionizing radiation doses, such as squamous cell carcinoma (Maalej et al. 2007). In Benin, the only article found was this of Dossou et al. (2014) which concluded at increasing of chromosome abberations in different shapes from radiographers in medical imaging centres (Dossou et al. 2014).Therefore, knowledge about the long term effects of ionizing radiation among medical workers in Benin is not yet fully-explored.

The present study aimed to evaluate the long term morbidity among medical X-ray workers in Benin.

Methods

Population and data collection and exposure variable

1
2 The study population from private and public centres included 335 medical X-ray workers and a group of 193
3
4 medical workers from twelve (12) departments of Bénin (Atacora, Donga, Borgou, Alibori, Zou, Collines, Mono,
5
6 Couffo, Ouémé, Plateau, Atlantique, Littotal) or six (06) according to old territorial division (2015) (Atacora-
7
8 Donga, Borgou-Alibori, Zou-Collines, Mono-Couffo, Ouémé-Plateau, Atlantique-Littotal), not exposed to X-
9
10 ray equipment employed at the same centre who worked in Benin between 1972 and 2019 (47 years) and were
11
12 born between 1937 and 1997.
13
14
15
16
17

18 The present retrospective cohort study was based on self-reported questionnaires and required contact with
19
20 members of the cohort. A list with contacts had been withdrawn from professional associations (radiologists,
21
22 radiographers...) for exposed workers. But, for unexposed workers, questionnaires were administered to those
23
24 who were present at the time of the survey. The survey was carried at 2019 and collected 81.96 (250/305) and
25
26 87.34 (345/395) % response rates out of 305 and 395 questionnaires administered (Fig. 1) to unexposed and
27
28 exposed workers, respectively. The questionnaire included different informations on: (i) sociodemographic
29
30 characteristics; (ii) number of children, (iii) reproductive history; (iv) medical history including exposure to
31
32 diagnostic x-rays of whole body, cancers and non cancer disease; (v) history of cigarette smoking and alcohol
33
34 consumption; (vi) professional career (Time occupational exposure in years); (vii) history of holidays during a
35
36 career (see questionnaire in Supplementary Information). Three investigators who had passed the qualified test
37
38 and were selected. The investigation standards have been elaborated to unify and facilitate the data collected.
39
40
41
42
43
44
45

46 A retrospective cohort study involving healthcare workers was conducted in 12 departments of Benin, throughout
47
48 the national territory. It is composed to radiologists, radiographers and physicians assistants at diagnostic radiology
49
50 for exposed workers; and physicians, physician assistants at others services and administrative workers for
51
52 unexposed workers. Telephone consultations were carried out with healthcare workers who had already left the
53
54 national territory at the time of the survey. The minimum of duration of employment to be included in study was
55
56 one year (Sun et al. 2018). In order to be an eligible disease case, the disease must be declared after the first
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 employment as occupational exposed workers or occupational unexposed workers. The study cohort included all
2 alive occupational exposed workers of the medical imaging departments of Benin. In all, 10 occupational exposed
3 workers and 57 occupational unexposed workers were excluded because the occupational exposed workers did not
4 make the minimum of duration of employment which was one year (Fig. 1). The final analytic cohort was
5 comprised of 528 participants including 335 occupational exposed workers and 193 occupational unexposed
6 workers.
7

8 The retrospective cohort follow-up started with a date at first employment at the establishment and continued till
9 the dates of survey.
10

11 ***Outcome and Confounding Factors***

12 The dependant variables of interest (diseases of the eye and other disorders of skin and subcutaneous tissue) were
13 extracted from the datasets by considering those which were the most representative (Supplementary Information
14 Table 1 and 2). All diseases of the eye and Other disorders of subcutaneous tissue or skin mass were retrospectively
15 coded according to the International Classification of Diseases tenth revision (ICD-10) (World Health
16 Organization, 2004).
17

18 Several factors were considered as potential confounders which were defined and included in questionnaires (in
19 Supplementary Information). Age at initial year of employment was categorized into less than 25 years old, 26-30
20 year and 31-year and over, considering the interquartile range. Smoking (yes/no) and alcohol drinking (none,
21 moderate, high) status were considered given previous evidence of associations with different diseases.
22 Occupational time exposure (years) was not the same for all workers and could be associated with outcomes.
23 Occupational time exposure categories were based on the interquartile range of the real time at work. Having
24 holidays during the career (yes/no) was retained because the reduction in exposure time might be protective against
25 ionizing radiation. The different questions related to confounding factors were developed in questionnaire (in
26 Supplementary Information).
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2 ***Ethical consideration***
3

4 The study was reviewed and approved by Research Ethics Committee of the Institut des Sciences Biomedicales
5 Appliquees (CER-ISBA) in Benin. The informed consent of occupational exposed workers or occupational
6 unexposed workers was requested and obtained before administering the questionnaires.
7

8 Respondents were assured of their information and confidentiality, and they were informed of their right to
9 withdraw from the study at any time.
10

11
12 ***Statistical analysis***
13

14 Data were entered by double-entry in Epiinfo version 3.5.4. The data collected were analysed using SAS® version
15 9.4. Number and percentage, were used to summarize the sociodemographic data for descriptive statistics of
16 exposed or unexposed group. Chi-square tests was used to compare the differences between each group. Bilateral
17 tests were carried out, and a P-value ≤ 0.05 was considered statistically significant.
18

19 We also estimated the cumulative incidence of morbidities selected (diseases of the eye and skin mass) using
20 follow-up as the timescale and presented Hazard ratio's (HR) and 95% Confidence Intervals (CI) calculated from
21 crude and multivariable Cox model. Maximum likelihood test was used to obtain parameter estimates for cox
22 regression. Multivariable models with lower Akaike's information criterion (AIC) and higher concordance statistic
23 were preferred. The multivariable model was carried out adjusted for age at initial year of employment, year of
24 first employment, sex, smoking and alcohol consumption using Akaike's information criterion (AIC).
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45

46 **Results**
47

48 The characteristics of the exposed workers and the unexposed worker group are described in Table 1. The mean
49 age at initial year of employment of the exposed workers was 26 years (range, 21–46 years) (Table 1), and 59.7 %
50 were female. In the unexposed workers, the mean age at initial year of employment was 28 years (range, 19–46
51 years) (Table 1), and 53.9 % were female. Likewise, both in the exposed and unexposed groups, the majority of
52 subjects neither smoked (98.5 % for exposed and 99.5 % for unexposed) nor drank (65.1 % for exposed and 73.6
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

% for unexposed) (Table 1). Age at initial year of employment ($P<.0001$) was significantly different between exposed and unexposed workers. Otherwise, both in the exposed and unexposed groups, there was no significant difference in the occupational time exposure ($P=0.10$), the initial year of employment ($P=0.44$) and having Holidays during a career ($P=0.21$) (Table 1). A significant difference in the distribution of workers in the different departments of Benin was observed between the exposed and the unexposed ($P = 0.02$) (Supplementary Information Table 3).

Based on one questionnaire, 186 health events have been declared by 113 (21.4%) workers (Supplementary Information Table 1). The predominant ailments were eye diseases (100/186) and skin mass or subcutaneous mass (26/186) (Supplementary Information Table 2). The proportion of eye diseases ($P=0.02$) and skin mass ($P=0.01$) were significantly different between exposed and unexposed workers (Table 2). Four case of cataracts have been reported among eye diseases (Supplementary Information Table 2). Diseases of the eye were the subgroup which aggregated a large number from eye diseases (63 vs 12 for exposed and 21 vs 4 for unexposed) (Supplementary Information Table 2).

A total of 84 and 26 cases of diseases of the eye and skin mass (Table 3) were identified after a median follow-up of six years for the both, [interquartile range (IQR) 2–11] and [IQR, 3–12], respectively (Table 2). The median follow-up in cases only was eight (08) years [(IQR) 2 – 13] and eight and half (8.5) [(IQR) 4 – 12] for eye diseases and skin mass respectively (Table 3).

Cumulative incidences and risk factors for diseases of the eye

Cumulative incidences of diseases of the eye in the whole cohort and by change in exposure status were shown (Fig 2a and 2b). The overall cumulative incidence at the 7 years of follow-up after the initial year of employment was 9.9 % (95% CI 7.3 to 13.3) (Fig 2a) and exposed workers were at a higher risk of developing diseases of the eye at the 7 years of follow-up after the initial year of employment the cumulative incidence was 12.2 % (95% CI 8.7 to 16.9) while for unexposed workers, this was 5.9 % (95% CI 3.0 to 11.4) (Fig 2b). Unadjusted and adjusted Hazards Ratio (HRs) and 95% Confidence Intervals (CIs) of eye diseases are shown in Fig. 3. From univariable

1 models, we found that, exposed workers had a significant risk of eye diseases (HR, 1.9 [95% CI, 1.2, 3.2]),
2 compared to unexposed workers. Compared to workers who have started working \leq 2007, workers who have
3 started working from 2017 (HR, 3.1 [95% CI, 1.2, 7.9]) had a high risk of eye diseases. The stratified analysis
4 among exposed workers revealed a risk of eye diseases that was significantly increased for workers of Oueme-
5 plateau departments (HR, 3.1 [95% CI, 1.3, 8 .9]) and Atlantique-littoral (HR, 3.4 [95% CI, 1.5, 9.3])
6 (Supplementary Information Table 4).

7 After adjustment for sex, age at initial year of employment, alcohol drinking, year of first employment,
8 departments of Benin the risks of occurrence of eye diseases were statistically significant increased for exposed
9 workers (HR, 2.3 [95% CI, 1.4, 3.9]) and for workers who have started working \geq 2017 (HR, 3.5 [95% CI, 1.3,
10 9.1]). While, the reduced risk of eye diseases was borderline significant for sex (P=0.058). Sensitivity of analysis
11 carried out with as time scale age attained revealed association between eye diseases and ionizing radiation
12 exposure (HR, 2.5 [95% CI, 1.5, 4.3]) after adjustment for sex, age at initial year of employment, alcohol drinking,
13 year of first employment, departments of Benin (Supplementary Information Table 5 and 6).

14 ***Cumulative incidences and risk factors for skin mass***

15 Cumulative incidences of skin mass in the whole cohort and by change in exposure status were shown (Fig 4a
16 and 4b). The overall cumulative incidence at the 4 years of follow-up after the initial year of employment was
17 1.8% (95% CI 0.9 to 3.7) (Fig 4a) and exposed workers were at a higher risk of developing skin mass at the 4 years
18 of follow-up after the initial year of employment the cumulative incidence was 2.1 % (95% CI 0.9 to 5.0) while
19 for unexposed workers, this was 1.2 % (95% CI 0.3 to 5.0) (Fig 4b).

20 As for diseases of the eye, unadjusted and adjusted HRs, and 95% CIs of skin mass are shown in Fig. 5. From
21 univariable models, we found that, exposed workers had a significant risk of occurrence of skin mass (HR, 3.8
22 [95% CI, 1.4 - 14.2]) and heavy taking drinks of alcohol (HR, 8.6 [95% CI, 2.6 - 24.4]) increases also significantly
23 the risk of occurrence of skin mass (Fig. 5a).

1 After adjustment for sex, age at initial year of employment, alcohol drinking, year of first employment,
2 departments of Benin, the risks of occurrence of skin mass were statistically significant increased for exposed
3
4 workers (HR, 3.3 [95% CI, 1.2, 12.7]) and for workers who took heavy alcohol (HR, 7.6 [95% CI, 2.2 – 22.5])
5
6
7 (Fig 5b).
8
9

10 11 **Discussion**

12
13 To our knowledge, this is the first evaluation of the risk non cancer diseases among medical imaging workers in
14
15 Benin. Our analyses showed associations between medical X-ray workers and diseases of the eye and skin mass.
16
17
18 At the same time, Heavy alcohol drinking had an increased risk of skin mass.
19
20
21

22 *Diseases of the eye*

23 Diseases of the eye (HR, 2.3 [IC 95 %, 1.4 – 3.9]) was significantly associated to exposure ionizing radiation (Fig.
24
25 3). It is evidence that exposure to ionizing radiation may be harmful to the lens of the eye and increases the long-
26
27 term risk of cataract formation (Chodick et al. 2008). Certainly, several other studies showed the association
28
29 between cataract (Hiller et al. 1986; Picano et al. 2012; Little 2013), opacities of the lens (Ainsbury et al. 2021)
30
31 and protracted exposure to ionising radiation. Moreover, epidemiological studies, many years ago, established the
32
33 association between exposure to sun (ultraviolet radiation) and development of cataracts (Wright and Norval,
34
35 2021). Although there are several other eye ailments in this outcome not described by the literature recognized as
36
37 radiation-induced, many of them could be related to opacification of the lens and which could involve a cataract
38
39 in its advanced stages.
40
41
42

43 The workers who have started working ≥ 2017 (HR, 3.5 [95% CI, 1.3, 9.2]), have a statistically significant higher
44
45 risk of diseases of the eye from the multivariable model and were statistically significant. This could be explained
46
47 by the fact that young workers performed more examinations than older workers, who are generally assigned to
48
49 administrative work in the centres. The median latency period of eight (08) years (Table 3) shown in this study
50
51 was not entirely similar to those reported in the literature. Because, according to study's Chodick (Chodick et al.
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

2008), the latency period for cataract formation is probably longer for smaller doses and may reach 30–45 years (Wilde and Sjostrand, 1997). Some authors conclude that, among atomic bomb survivors exposed to one Gray (high-dose) or more radiation-induced cataracts appeared with an approximate median latency period for the development of lens opacities of 2 to 3 years (Choshi et al. 1983), depending on the dose to the eye (Chodick et al. 2008). In addition, high-dose rate irradiation was associated with short latency (Ainsbury et al. 2021). This suggests that the relatively high median latency period found in this study may well be related to low-dose worker exposures.

Skin mass

Ionizing radiation exposure and alcohol consumption were the main risk factor significantly associated to skin mass, through this study. According to the descriptive mass made by participants, the skin mass was soft tumor, moveable and no pain. Association of having skin mass with radiation exposure have been scarcely reported by the literature. The risk of having skin mass for exposed workers was high even after adjusting (HR, 3.3 [95% CI, 1.2, 12.7]) and statistically significant (Fig. 5b). The scarcity of cohort studies able to establish the links between radiation exposure and skin mass was a brake in the discussion. The skin mass described by participants was probably benign like a lipoma. Lipomatosis is an ailment characterized by the buildup of fatty tissue, forming benign tumor masses or lipomas (skin mass). Adipocyte-derived tumors are commonly observed in various ages and locations in the skin (Mashima et al. 2021). The lipoma is commonly observed in ordinal clinics (Mashima et al. 2021). The clinical causes of lipomatosis are scarcely understood. But the study carried out by Iakovleva (1978) revealed that post-mortem examinations on 22 dogs showed neoformations in 13 animals, after had been exposed at radiation ionizing (7 malignant and 12 benign neoformations) (Iakovleva 1978).

Heavy alcohol consumption (HR, 7.6 [95% CI, 2.2 – 22.5]) was significantly associated with a higher factor risk to having skin mass (Fig. 5b). These results comfort us, because Sumi et al. (2019) reported in their study that higher weekly alcohol consumption was strongly and significantly associated with higher abdominal visceral adipose tissue areas and skin mass (Sumi et al., 2019). In addition Hirose et al. (2006) reported a case of benign

1 symmetric lipomatosis (Hirose et al., 2006). They concluded that the relevance of alcohol in the onset of benign
2 symmetric lipomatosis is strongly suggested based on alcoholic hepatopathy and the history of the development
3
4 of grotesque physical appearance associated with increased alcohol consumption (Hirose et al., 2006).
5
6

7 In opposite, according to Kim et al. (2012) alcohol consumption is associated with decreased skin mass and
8
9 increased visceral adipose tissue accumulation (Kim et al., 2012). Likewise, Framingham Heart Study, revealed
10
11 that in women, higher alcohol intake was associated with lower abdominal skin mass volume (Molenaar et al.,
12
13 2009).
14
15

16
17
18 This study was one of the largest undertaken to date on morbidity among medical imaging workers risk with high
19
20 size of the baseline retrospective cohort in Benin. A study strength includes nearly complete data collection, which
21
22 reduces the possibility of selection bias. This work was done in a rather specific context where since 1993, there
23
24 is no longer any dosimetric monitoring in Benin. Unfortunately, no epidemiological study could be done before
25
26 1993 when dosimetric monitoring was available.
27
28

29
30
31 Nevertheless, some limitations of the study should be considered. Prevalence disorders cases were identified from
32
33 the self-reported questionnaires without clinical confirmations. We carried out three groups for the participants
34
35 based on the frequency of alcohol drinking (none, Moderate and High), and did not get the information about
36
37 alcohol drinking volume. For the smoking, we performed also two groups based on the acceptance or no of
38
39 smoking, and did not get the information about cigarette rods or packs. This lack of precision may have led to bias.
40
41

42
43 We were unable to match the two groups to limit misclassification bias, since the number of subjects was limited.
44

45
46 The potential confounders as diet, medications, and level of physical activity, exposure to solar ultraviolet (UV)
47
48 radiation, family medical history, might have contributed to an under or overestimation of the different
49
50 associations. The difference was statistically insignificant between the two groups (unexposed and exposed) for
51
52 variables sex, smoking, alcohol drinking. Thus we believe that the bias might be minimal.
53
54
55
56
57
58
59
60
61

Conclusion

1
2
3 This first study among x-rays medical workers in Benin, confirms the known results that ionizing radiation
4
5 exposure is a risk factor for eye diseases and adds new informations by providing risk estimates for the occurrence
6
7 of skin mass, benign tumors probabily which should not be neglected. It provide a basis for further studies on a
8
9 link between low dose radiation measured and skin mass and eye diseases in this country.
10
11

12
13 The public health and dosimetric monitoring significance in the prevention of disorders developed likely in
14
15 occupational environment due ionizing radiation exposure is emphasized in this study.
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Acknowledgments

We are also grateful to Françoise Terrier for her unfailing support and advice.

Data Availability Statement

The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Funding

Funding for this study was provided by the Division for Africa, Department of Technical Cooperation of International Atomic Energy Agency (IAEA).

Declarations

Conflicts of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Ethics approval The study was reviewed and approved by Research Ethics Committee of the Institut des Sciences Biomedicales Appliquees (CER-ISBA).

Consent to participate

Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

ORCID iDs

Alfred Arnaud Gbetchedji <https://orcid.org/0000-0002-9100-0166>

Rodrigue S. Allodji <http://orcid.org/0000-0002-1895-8415>

REFERENCES

- 1
2
3 Ainsbury EA, Dalke C, Hamada N, et al (2021) Radiation-induced lens opacities: Epidemiological, clinical and
4 experimental evidence, methodological issues, research gaps and strategy. *Environ Int* 146: 106213.
5 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106213>
- 6 Akyurt N, (2021) Health-related quality of life among radiology technicians in Turkish hospitals: a cross sectional
7 study. *Int Arch Occup Environ Health* 94: 1415–1425. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01723-w>
- 8 Allodji RS, Hawkins MM, Bright CJ, et al (2019) Risk of subsequent primary leukaemias among 69,460 five-year
9 survivors of childhood cancer diagnosed from 1940 to 2008 in Europe: A cohort study within
10 PanCareSurFup. *Eur J Cancer* 117: 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2019.05.013>
- 11 Azizova TV, Bannikova MV, Grigoryeva ES, et al (2018) Risk of malignant skin neoplasms in a cohort of workers
12 occupationally exposed to ionizing radiation at low dose rates. *PLoS One* 13: e0205060.
13 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205060>
- 14 Berrington A, Darby SC, Weiss HA, et al (2001) 100 years of observation on British radiologists: mortality from
15 cancer and other causes 1897–1997. *Br J Radiol* 74: 507–519. <https://doi.org/10.1259/bjr.74.882.740507>
- 16 Berrington de Gonzalez A, Kutsenko A, Rajaraman P (2012) Sarcoma risk after radiation exposure. *Clin Sarcoma
17 Res* 2: 18. <https://doi.org/10.1186/2045-3329-2-18>
- 18 Boice JD, Held KD, Shore RE (2019) Radiation epidemiology and health effects following low-level radiation
19 exposure. *J Radiol Prot* 39: S14–S27. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab2f3d>
- 20 Charles M (2001) UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation. *J Radiol Prot* 21: 83–85.
21 <https://doi.org/10.1088/0952-4746/21/1/609>
- 22 Chodick G, Bekiroglu N, Hauptmann M, et al (2008) Risk of Cataract after Exposure to Low Doses of Ionizing
23 Radiation: A 20-Year Prospective Cohort Study among US Radiologic Technologists. *Am J Epidemiol*
24 168: 620–631. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn171>
- 25 Choshi K, Takaku I, Mishima H, et al (1983) Ophthalmologic changes related to radiation exposure and age in
26 adult health study sample, Hiroshima and Nagasaki. *Radiat Res* 96: 560–579
- 27 Cumming RG (1997) Alcohol, Smoking, and Cataracts: The Blue Mountains Eye Study. *Arch Ophthalmol* 115:
28 1296. <https://doi.org/10.1001/archopht.1997.01100160466015>
- 29 Dossou J, Abinda SGG-M, Adjagba M, et al (2014) Study cytogenetics aberrations chromosome in workers under
30 x-rays. *J Rech En Sci Univ Lomé* 16: 35–45. <https://www.ajol.info/index.php/jrsul/article/view/117713>
- 31 Fournier L, Laurent O, Samson E, et al (2016) External radiation dose and cancer mortality among French nuclear
32 workers: considering potential confounding by internal radiation exposure. *Int Arch Occup Environ
33 Health* 89: 1183–1191. <https://doi.org/10.1007/s00420-016-1152-4>
- 34 Hiller R, Sperduto RD, Ederer F (1986) Epidemiologic associations with nuclear, cortical, and posterior
35 subcapsular cataracts. *Am J Epidemiol* 124: 916–925.
36 <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114481>
- 37 Hirose A, Okada Y, Morita E, et al (2006) Benign Symmetric Lipomatosis Associated with Alcoholism. *Intern
38 Med* 45: 1001–1005. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.45.1791>
- 39 Iakovleva VI (1978) [Formation of neoplasms in dogs after chronic gamma irradiation at a low-intensity dose].
40 *Kosm Biol Aviakosm Med* 12: 61–67. **(Indexed in Pubmed: 642424)**
- 41 Journy N, Mansouri I, Allodji RS, et al (2019) Volume effects of radiotherapy on the risk of second primary
42 cancers: A systematic review of clinical and epidemiological studies. *Radiother Oncol* 131: 150–159.
43 <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.09.017>
- 44 Kim KH, Oh S-W, Kwon H, et al (2012) Alcohol Consumption and Its Relation to Visceral and Subcutaneous
45 Adipose Tissues in Healthy Male Koreans. *Ann Nutr Metab* 60: 64–73.
46 <https://doi.org/10.1159/000334710>
- 47 Laurier D, Richardson DB, Cardis E, et al (2017) The International Nuclear Workers Study (Inworks): A
48 Collaborative Epidemiological Study to Improve Knowledge About Health Effects of Protracted Low-
49 Dose Exposure. *Radiat Prot Dosimetry* 173: 21–25. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw314>
- 50 Lee WJ, Bang YJ, Cha ES, et al (2021) Lifetime cancer risks from occupational radiation exposure among workers
51 at interventional radiology departments. *Int Arch Occup Environ Health* 94: 139–145.
52 <https://doi.org/10.1007/s00420-020-01569-8>
- 53 Lichter MD (2000) Therapeutic Ionizing Radiation and the Incidence of Basal Cell Carcinoma and Squamous Cell
54 Carcinoma. *Arch Dermatol* 136: 1007. <https://doi.org/10.1001/archderm.136.8.1007>
- 55 Lim Y, Byun HJ, Park CS, et al (2018) Primary cutaneous carcinosarcoma developing after chronic C-arm
56 radiation exposure. *JAAD Case Rep* 4: 126–128. <https://doi.org/10.1016/j.jdc.2017.07.024>
- 57 Little MP (2013) A review of non-cancer effects, especially circulatory and ocular diseases. *Radiat Environ
58 Biophys* 52: 435–449. <https://doi.org/10.1007/s00411-013-0484-7>

- 1 Little MP, Wakeford R, Borrego D, et al (2018) Leukaemia and myeloid malignancy among people exposed to
2 low doses (<100 mSv) of ionising radiation during childhood: a pooled analysis of nine historical cohort
3 studies. *Lancet Haematol* 5: e346–e358. [https://doi.org/10.1016/S2352-3026\(18\)30092-9](https://doi.org/10.1016/S2352-3026(18)30092-9)
- 4 Maalej M, Hentati D, Slimène M, et al (2007) [Skin cancer in Tunisia: a retrospective study: 1379 cases and risk
5 factors]. *Tunis. Med.* 85, 728–733 (**Indexed in Pubmed: 18254300**)
- 6 Mashima E, Sawada Y, Nakamura M (2021) Recent Advancement in Atypical Lipomatous Tumor Research. *Int*
7 *J Mol Sci* 22: 994. <https://doi.org/10.3390/ijms22030994>
- 8 Molenaar EA, Massaro JM, Jacques PF, et al (2009) Association of Lifestyle Factors With Abdominal
9 Subcutaneous and Visceral Adiposity: The Framingham Heart Study. *Diabetes Care* 32: 505–510.
10 <https://doi.org/10.2337/dc08-1382>
- 11 Moriña D, Grellier J, Carnicer A, et al (2016) InterCardioRisk: a novel online tool for estimating doses of ionising
12 radiation to occupationally-exposed medical staff and their associated health risks. *J Radiol Prot* 36: 561–
13 578. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/3/561>
- 14 Phillips CI, Clayton RM, Cuthbert J, et al (1996) Human Cataract Risk Factors: Significance of Abstention from,
15 and High Consumption of, Ethanol (U-Curve) and Non-Significance of Smoking. *Ophthalmic Res* 28:
16 237–247. <https://doi.org/10.1159/000267909>
- 17 Picano E, Vano E, Domenici L, et al (2012) Cancer and non-cancer brain and eye effects of chronic low-dose
18 ionizing radiation exposure. *BMC Cancer* 12: 157. <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
- 19 Shimizu Y, Kato H, Schull WJ, et al (1992) Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950-
20 1985: Part 3. Noncancer mortality based on the revised doses (DS86). *Radiat Res* 130: 249–266 (**Indexed**
21 **in Pubmed: 1574582**)
- 22 Sumi M, Hisamatsu T, Fujiyoshi A, et al (2019) Association of Alcohol Consumption With Fat Deposition in a
23 Community-Based Sample of Japanese Men: The Shiga Epidemiological Study of Subclinical
24 Atherosclerosis (SESSA). *J Epidemiol* 29: 205–212. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20170191>
- 25 Sun Q, Mao W, Jiang H, et al (2018) The Effect of Protracted Exposure to Radiation on Liver Injury: A Cohort
26 Study of Industrial Radiographers in Xinjiang, China. *Int J Environ Res Public Health* 15: 71.
27 <https://doi.org/10.3390/ijerph15010071>
- 28 United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, General
29 Assembly (2008) Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, with
30 scientific annexes. United Nations, New York.
- 31 UNSCEAR (2016) Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (No.
32 46). United Nations, New York.
- 33 Wang F-R, Fang Q-Q, Tang W-M, et al (2015) Nested Case-control Study of Occupational Radiation Exposure
34 and Breast and Esophagus Cancer Risk among Medical Diagnostic X Ray Workers in Jiangsu of China.
35 *Asian Pac J Cancer Prev* 16: 4699–4704. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2015.16.11.4699>
- 36 Wilde G, Sjostrand J (1997) A clinical study of radiation cataract formation in adult life following gamma
37 irradiation of the lens in early childhood. *Br J Ophthalmol* 81: 261–266
38 <https://doi.org/10.1136/bjo.81.4.261>
- 39 World Health Organization (Ed.) (2004) International statistical classification of diseases and related health
40 problems, 10th revision, 2nd edition. ed. World Health Organization, Geneva.
- 41 Wright CY, Norval M. (2021) Health Risks Associated With Excessive Exposure to Solar Ultraviolet Radiation
42 Among Outdoor Workers in South Africa: An Overview. *Front. Public Health* 9: 678680.
43 <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.678680>
- 44 Yoshinaga S, Mabuchi K, Sigurdson AJ, et al (2004) Cancer Risks among Radiologists and Radiologic
45 Technologists: Review of Epidemiologic Studies. *Radiology* 233: 313–321.
46 <https://doi.org/10.1148/radiol.2332031119>
- 47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

[Click here to view linked References](#)

**Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study
from 1972 to 2019**

Arnaud A. Gbetchedji PhD(c)^{1,2,3,4,‡}, Hubert C. Hounsossou PhD⁴, Mama Cisse PhD⁵, Gilles D. Houndetoungan MD⁵, Daniel S. Takou PhD⁴, Bertin A Gbaguidi PhD⁴, Imene Mansouri PhD^{1,2,3}, Nadia Haddy PhD^{1,2,3}, Thierry C. M. Medehouenou PhD⁴, Alphonse S. Avocefohoum PhD⁴, Carole Rubino MD, PhD^{1,2,3}, Olivier Biau MD⁵, Daton Medenou PhD⁴, Florent de Vathaire PhD^{1,2,3}, Kuassi M. Amoussou-Guenou MD, PhD⁵, Catherine Luccioni PhD⁶, Rodrigue S. Allodji PhD^{1,2,3,4}

¹Université Paris-Saclay, UVSQ, Univ. Paris-Sud, Inserm, CESP-U1018, Radiation Epidemiology Team, 94807, Villejuif, France

²INSERM, CESP, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

³Gustave Roussy, Department of Clinical Research, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

⁴École Polytechnique d'Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, 01 P.O. Box 2009, Cotonou, Benin

⁵Faculté des Sciences de la Santé, 01 P.O. Box 188, Campus Universitaire Champ de Foire, Cotonou, Benin

⁶Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 Rue Saint-Martin, 75003, Paris, France

[‡]Corresponding author:

Arnaud A. Gbetchedji, Radiation Epidemiology Group/CESP-Unit 1018 INSERM, Gustave Roussy, B2M, 114, rue Édouard Vaillant 94805 Villejuif Cedex, Tel +33 (0) 1 42 11 54 98/Fax +33 (0) 1 42 11 56 18

E-mail: galfredarnaud@yahoo.fr

Tables of main manuscript of article entitled “Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from 1972 to 2019”.

Table 1 Characteristics of the study population at the time of the baseline questionnaire, 1972 – 2019

Variables	Exposed n (%)	Unexposed n (%)	P-values ^W
Status	335 (100.0)	193 (100.0)	-
Sex			
Male	135 (40.3)	89 (46.1)	0.19
Female	200 (59.7)	104 (53.9)	
Subgroup age at initial year of employment (years)			
≤ 25	233 (69.6)	75 (38.9)	<.0001
26-30	54 (16.1)	53 (27.5)	
≥ 31	48 (14.3)	65 (33.7)	
Smoking			
No	330 (98.5)	192 (99.5)	0.42
Yes	5 (1.5)	1 (0.5)	
Alcohol drinking			
None	218 (65.1)	142 (73.6)	0.06
Moderate	109 (32.5)	50 (25.9)	
High	8 (2.4)	1 (0.5)	
No. of years of work as exposed or unexposed worker (years)			
≤ 1	119 (35.5)	72 (37.3)	0.10
2-6	127 (37.9)	85 (44.0)	
≥ 7	89 (26.6)	36 (18.7)	
Having Holidays during a career			
No	161 (48.1)	104 (53.9)	0.21
Yes	174 (51.9)	89 (46.1)	
Period of year of first employment (years)			
≤ 2007	99 (29.6)	47 (24.4)	0.44
2008 - 2016	157 (46.9)	97 (50.2)	
≥ 2017	79 (23.6)	49 (25.4)	
	Mean	Mean	P-values ^{&}
	(min-max)	(min-max)	
Mean age at initial year of employment (years)	26 (21–46)	28 (19–46)	<.0001
Male	25 (21 – 41)	27 (19 - 46)	<.0001
Female	26 (21 – 46)	29 (19 -44)	<.0001
Mean of years of work as exposed or unexposed worker (years)	5.2 (1 - 30)	4.2 (1 - 22)	0.03
Mean of year of first employment (years)	2009 (1972- 2018)	2011 (1972- 2019)	0.22

^Wfrom Chi-2 tests. [&]from Spearman tests.

Table 2 Survival characteristic and summary of most representative diseases developed by exposed (n=335) and unexposed (n=193) group in the study population at the time of the baseline questionnaire, 1972 – 2019.

Outcomes (Diseases)	Exposed n (%)	Unexposed n (%)	P-values[‡]	Follow up Median (IQR) Years
Diseases of the eye and adnexa (ICD-10 classification)				6 (2-11)
No	272 (81.2)	172 (89.1)	<i>0.02</i>	
Yes	63 (18.8)	21 (10.9)		
Skin mass				6 (3-12)
No	312 (93.1)	190 (98.5)	<i>0.01</i>	
Yes	23 (6.9)	3 (1.5)		

[‡]from Chi-2 tests ; skin mass = Other disorders of skin and subcutaneous tissue related to radiation according to ICD-10 classification

Table 3 Diseases of the eye and adnexa and skin mass outcome of the study population at the time of the baseline questionnaire, 1972 – 2019

Variables	Whole cohort	Retained health events	
		Diseases of the eye and adnexa	Skin mass
All	528	84	26
Age attained (years) (mean, min ; max)	-	36.7 (22 - 66)	36,4 (25 - 57)
Median follow up for cases (years) (median, IQR)	-	8 (2 - 13)	8,5 (4 - 12)
	n (%)	n (%)	n (%)
Sex			
Male	224 (42.4)	33 (39.3)	5 (19.2)
Female	304 (57.6)	51 (60.7)	21 (80.8)
Subgroup age at initial year of employment (years)			
≤ 25	308 (58.3)	42 (50)	15 (57.7)
26-30	107 (20.3)	19 (22.6)	3 (11.5)
≥ 31	113 (21.4)	23 (27.4)	8 (30.8)
Smoking			
No	522 (98.9)	82 (97.6)	24 (92.3)
Yes	6 (1.1)	2 (2.4)	2 (7.7)
Alcohol drinking			
None	360 (68.2)	47 (55.9)	11 (42.3)
Moderate	159 (30.1)	33 (39.3)	11 (42.3)
High	9 (1.7)	4 (4.8)	4 (15.4)
No. of years of work as exposed or unexposed worker (years)			
≤ 1	191 (36.2)	27 (32.1)	3 (11.5)
2-6	212 (40.2)	26 (31)	10 (38.5)
≥ 7	125 (23.7)	31 (36.9)	13 (50)
Having Holidays during a career			
No	265 (50.2)	35 (41.7)	10 (38.5)
Yes	263 (49.8)	49 (58.3)	16 (61.5)
Period of year of first employment (years)			
≤ 2007	146 (27.7)	46 (54.7)	17 (65.4)
2008 - 2016	254 (48.1)	29 (34.5)	8 (30.8)
≥ 2017	128 (24.2)	9 (10.7)	1 (3.8)

% = n/all; skin mass = Other disorders of skin and subcutaneous tissue related to radiation according to ICD-10 classificatio

[Click here to view linked References](#)

**Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from
1972 to 2019**

**Arnaud A. Gbetchedji PhD(c)^{1,2,3,4,†}, Hubert C. Hounsossou PhD⁴, Mama Cisse PhD⁵, Gilles D.
Houndetoungan MD⁵, Daniel S. Takou PhD⁴, Bertin A Gbaguidi PhD⁴, Imene Mansouri PhD^{1,2,3}, Nadia
Haddy PhD^{1,2,3}, Thierry C. M. Medehouenou PhD⁴, Alphonse S. Avocefohoum PhD⁴, Carole Rubino MD,
PhD^{1,2,3}, Olivier Biau MD⁵, Daton Medenou PhD⁴, Florent de Vathaire PhD^{1,2,3}, Kuassi M. Amoussou-
Guenou MD, PhD⁵, Catherine Luccioni PhD⁶, Rodrigue S. Allodji PhD^{1,2,3,4}**

¹Université Paris-Saclay, UVSQ, Univ. Paris-Sud, Inserm, CESP-U1018, Radiation Epidemiology Team, 94807, Villejuif, France

²INSERM, CESP, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

³Gustave Roussy, Department of Clinical Research, Radiation Epidemiology Team, F-94805 Villejuif, France

⁴École Polytechnique d'Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, 01 P.O. Box 2009, Cotonou, Benin

⁵Faculté des Sciences de la Santé, 01 P.O. Box 188, Campus Universitaire Champ de Foire, Cotonou, Benin

⁶Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 Rue Saint-Martin, 75003, Paris, France

[†]Corresponding author:

Arnaud A. Gbetchedji, Radiation Epidemiology Group/CESP-Unit 1018 INSERM, Gustave Roussy, B2M, 114, rue Édouard Vaillant 94805 Villejuif Cedex, Tel +33 (0) 1 42 11 54 98/Fax +33 (0) 1 42 11 56 18

E-mail: galfredarnaud@yahoo.fr

Figures of main manuscript of article entitled “Long-term morbidity among medical imaging workers in Benin through a retrospective cohort study from 1972 to 2019”.

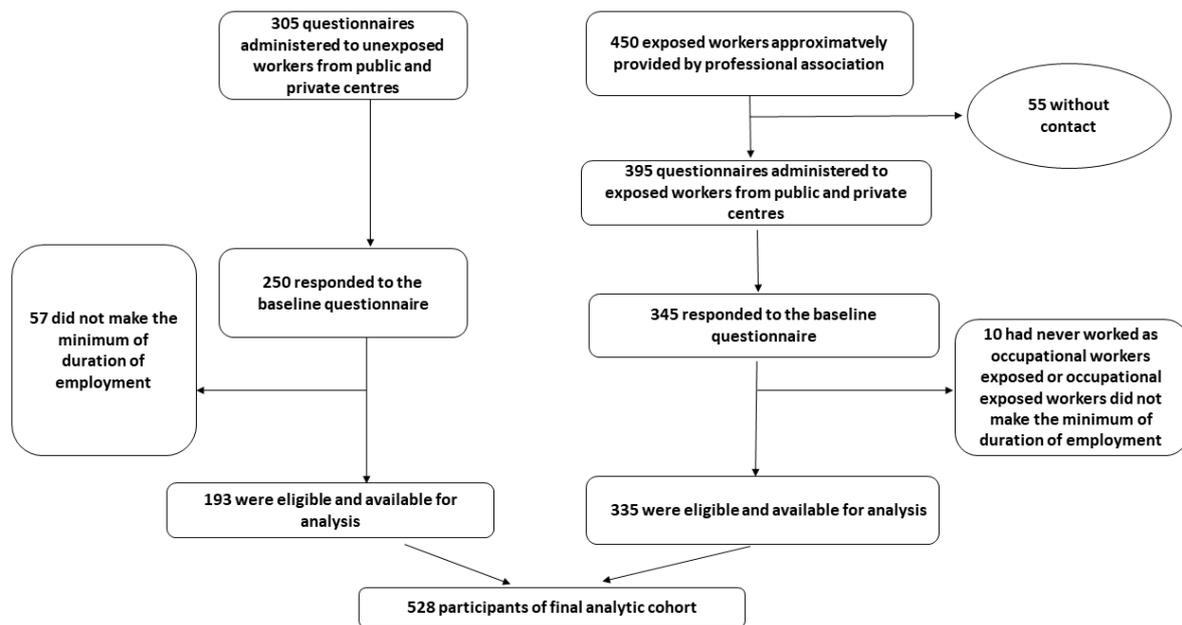


Fig. 1 Flowchart selection process (Inclusions and exclusions in the analytic cohort) of study's subject for risk of disorders, in Benin, 1972–2019

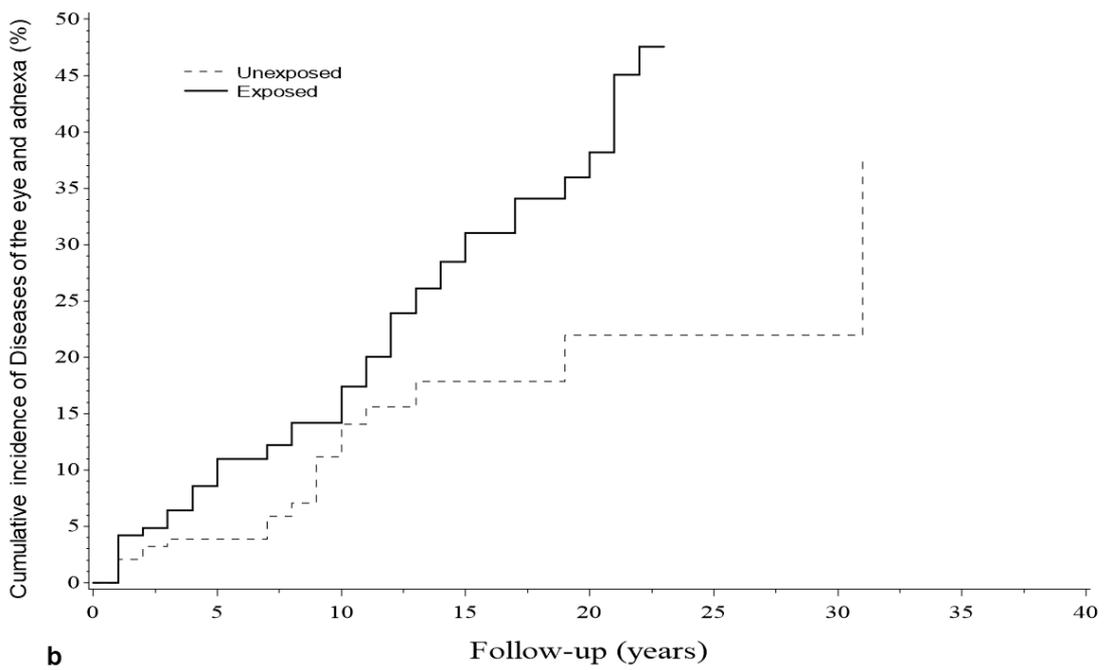
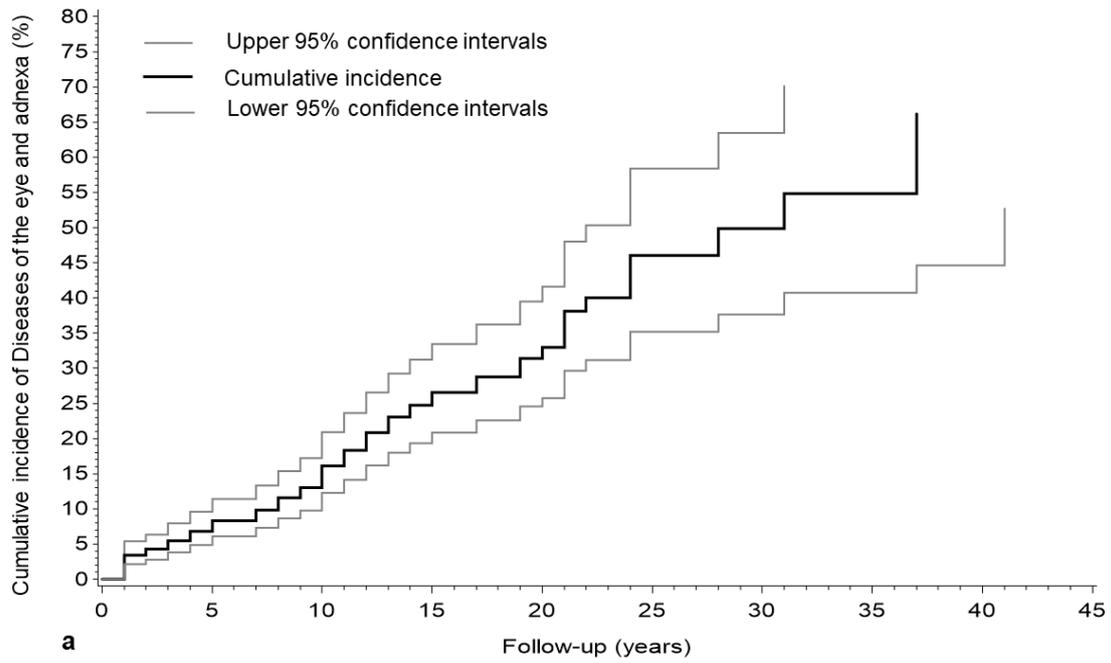


Fig. 2 The cumulative incidence curves of diseases of the eye and adnexa (a) in cohort (exposed and unexposed) and stratified by exposure status (b) between 1972 and 2019

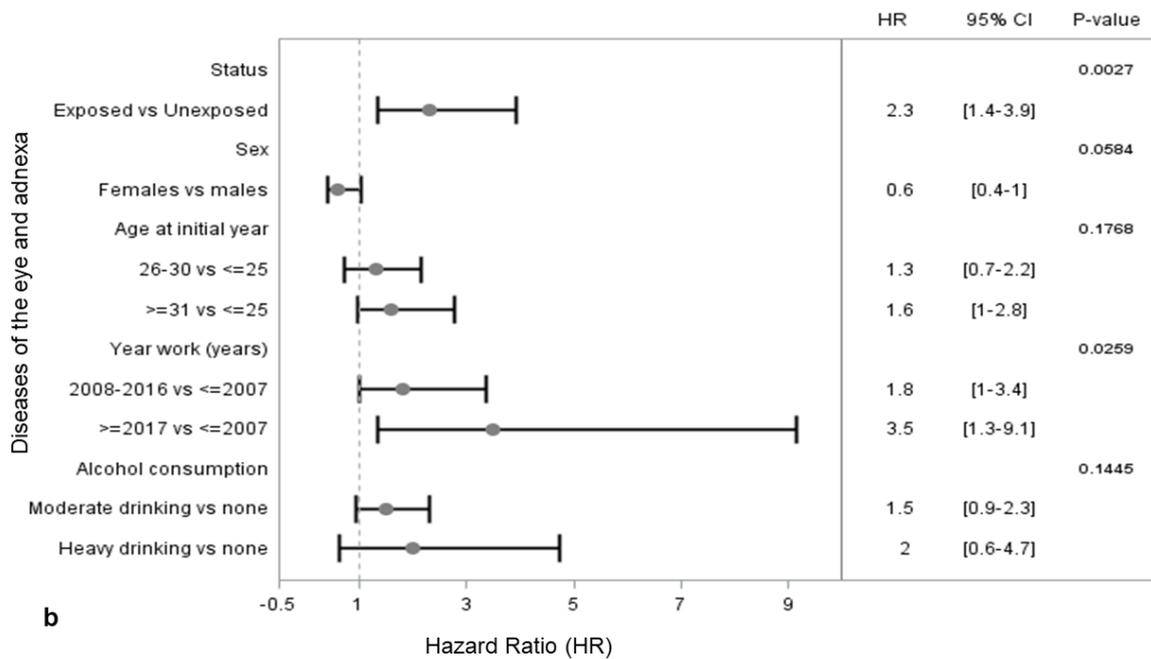
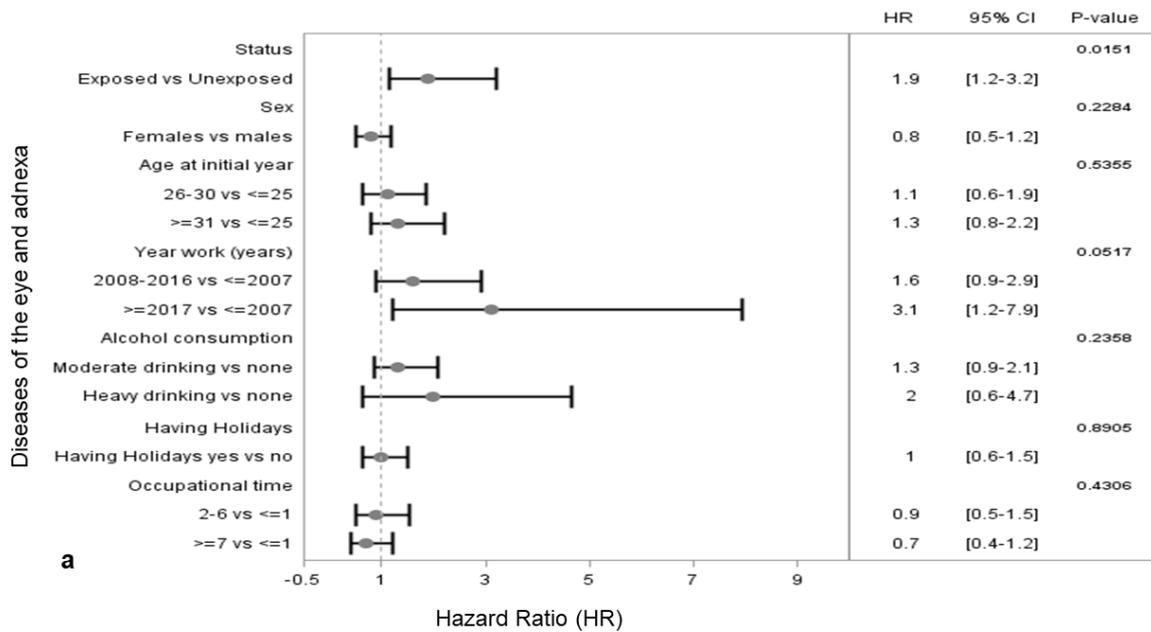


Fig. 3 Hazard Ratios of diseases of the eye and adnexa in univariable (a) and multivariable (b) events analysis by confounders factors

Age at initial year [26-30] period of age at initial year of employment (year) ; *Age at initial year* [≥ 30] period of age at initial year of employment (year) ; *Year work* [2008-2016] period of year of first employment; *Year work* [≥ 2017] period of year of first employment; *Having Holidays* Having Holidays during a career (yes or no); *Occupational time* [2-6] No. of years of work as exposed or unexposed worker (years); *Occupational Time* [≥ 7] No. of years of work as exposed or unexposed worker (years).

Hazard ratios (HRs) were estimated from a single Cox proportional hazards multiple regression model.

(fig.3b) Adjusted for sex, age at initial year of employment, smoking, alcohol drinking, year of first employment, departments of Benin; Survival time (Entry = date of first entry into the workplace, Out = date of events) for events and (Entry = date of first entry into the workplace, Out = date of survey) for no events; Proportional hazards assumptions verified for sex, age at initial year of employment (year), smoking, alcohol consumption, occupational time, having holidays patterns.

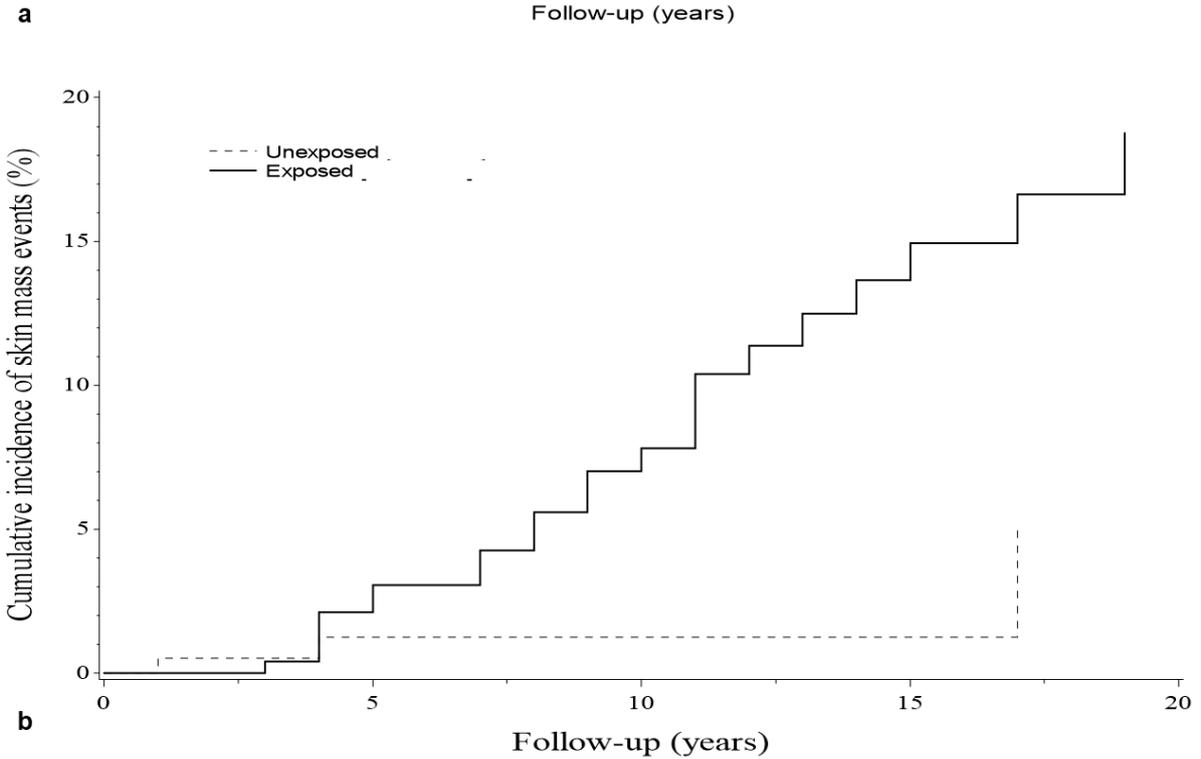
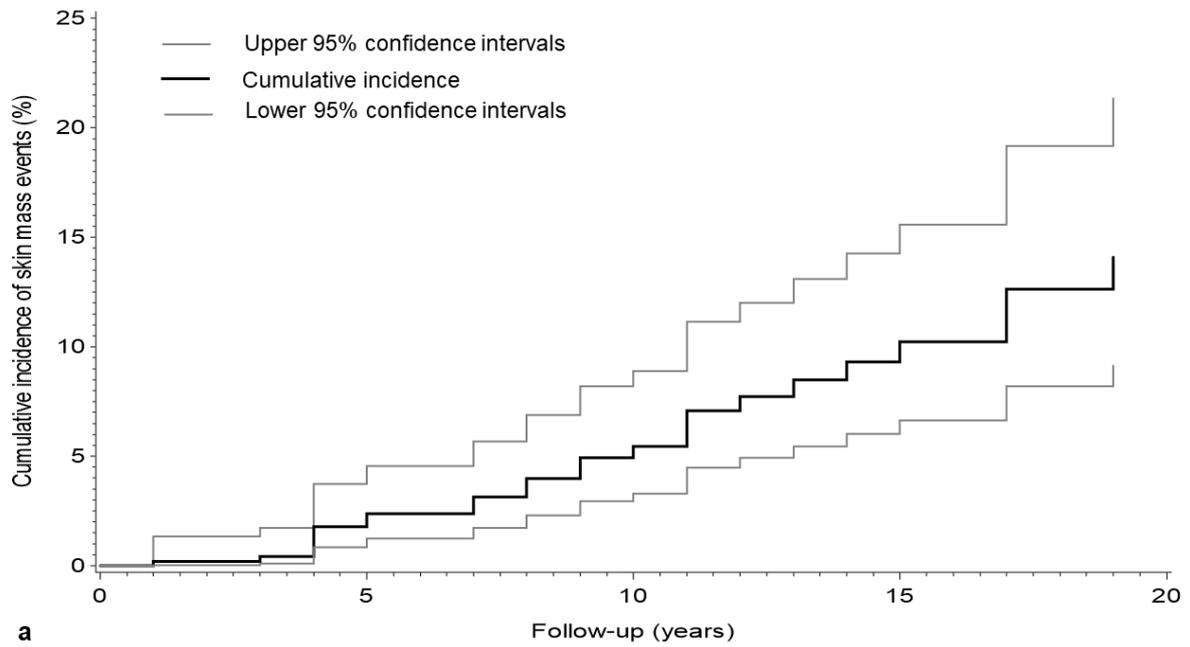


Fig. 4 The cumulative incidence curves of skin mass (a) in cohort (exposed and unexposed) and stratified by exposure status (b) between 1972 and 2020

Skin mass = other disorders of skin and subcutaneous tissue related to radiation according to ICD-10 classification

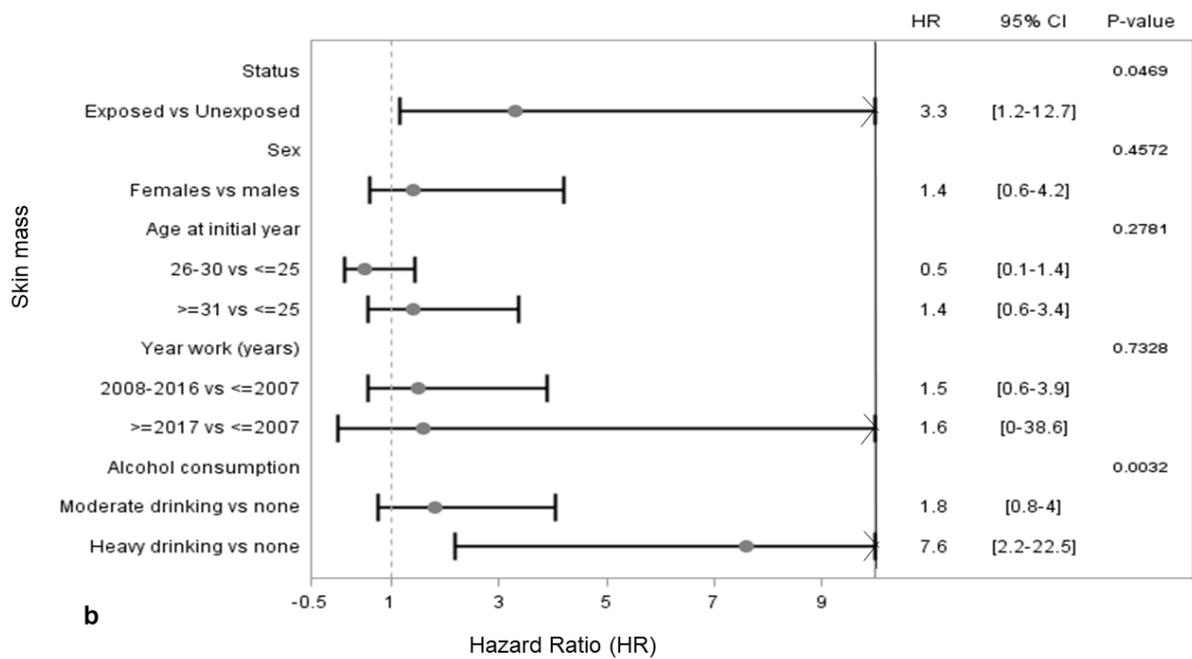
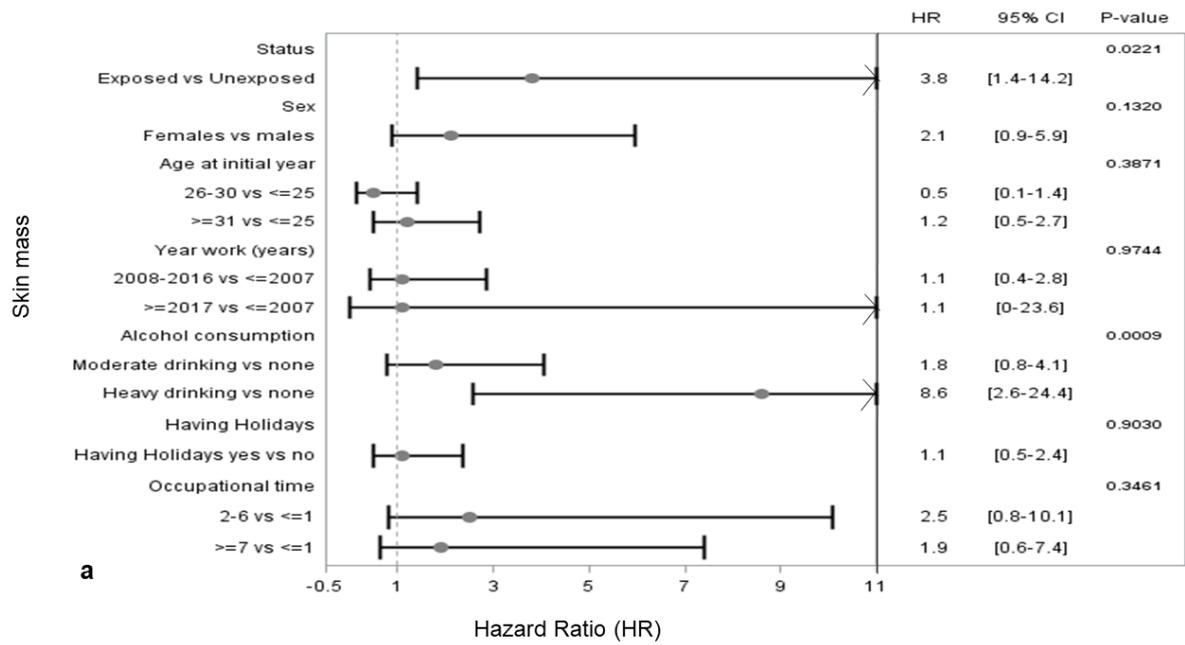
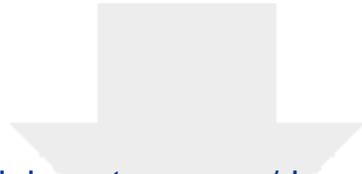


Fig. 5 Hazard Ratios of skin mass in univariable (a) and multivariable (b) events analysis by confounders factors. Skin mass = other disorders of skin and subcutaneous tissue related to radiation according to ICD-10 classification

Age at initial year [26-30] period of age at initial year of employment (year) ; *Age at initial year* [≥ 30] period of age at initial year of employment (year) ; *Year work* [2008-2016] period of year of first employment; *Year work* [≥ 2017] period of year of first employment; *Having Holidays* Having Holidays during a career (yes or no); *Occupational time* [2-6] No. of years of work as exposed or unexposed worker (years); *Occupational Time* [≥ 7] No. of years of work as exposed or unexposed worker (years).

Hazard ratios (HRs) were estimated from a single Cox proportional hazards multiple regression model. (fig.3b) Adjusted for sex, age at initial year of employment, alcohol drinking, year of first employment; departments of Benin; Survival time (Entry = date of first entry into the workplace, Out = date of events) for events

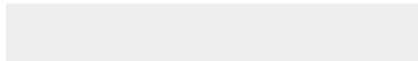
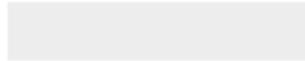
and (Entry = date of first entry into the workplace, Out = date of survey) for no events;
Proportional hazards assumptions verified for age at initial year of employment (year), occupational time, having holidays, year work patterns.



[Click here to access/download](#)

Supplementary Material

[Supplementary materials of main manuscript.docx](#)



Titre : Etude épidémiologique chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants dans les centres d'imagerie médicale du Bénin

Mots clés : rayonnement X; maladies des yeux ; masse sous-cutanée ; estimation rétrospective ; dose ; morbidité

Résumé : Dans un contexte d'absence de suivi dosimétrique et de contrôles des niveaux d'exposition en milieu professionnel depuis 1972, les travailleurs du secteur de la radiologie médicale du Bénin sont probablement exposés à un risque accru d'irradiation. Si aujourd'hui à travers la littérature, les effets liés à une exposition aiguë sont bien connus, le risque suite à des expositions prolongées à faibles doses de rayonnements ionisants comme chez les travailleurs médicaux n'est pas encore clairement estimé. L'objectif de la thèse visait à évaluer (i) la morbidité chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (RI) au Bénin (ii) les équipements de protection collective (EPC) (iii) les niveaux d'exposition individuels et

(iv) à étudier de l'association éventuelle entre ces niveaux d'exposition individuels et la morbidité. Nos résultats ont permis de (i) montrer l'association entre l'exposition aux RI et les maladies des yeux et masses sous-cutanées (ii) mettre en évidence les équivalents de dose ambiants de neuf (9) EPC qui sont au-delà des niveaux de référence 7,5 μSv sur une heure (iii) estimer la médiane de dose efficace cumulée à 0,82 mSv entre 1972 et 2019 (iv) constater une différence significative des doses médianes cumulées entre les travailleurs ayant déclaré des maladies des yeux ($P = 0,0005$) ou de masses sous-cutanées ($P = 0,0011$) et ceux n'ayant rien déclaré.

Title : Epidemiological study of exposed workers to ionizing radiation in medical imaging centers in Benin

Keywords : X-rays ; eye diseases ; skin mass ; retrospective estimation ; dose ; morbidity

Abstract : In a context of the lack of dosimetric monitoring and controls of exposure levels in the workplace since 1972, medical workers in X-ray sector in Benin were probably exposed to an increased risk of irradiation. If actually through the literature, the effects related to acute exposure are well known, the risk related to protracted exposure to low doses of ionizing radiation as in medical workers is not yet clearly estimated. The objective of the thesis was to assess (i) morbidity among workers exposed to ionizing radiation (RI) in Benin, (ii) the workplace (EPC), (iii) individual exposure levels and (iv) to study the probably association between these individual exposure levels and morbidity.

Our results allowed to (i) show the association between exposure to IR and eye diseases and skin masses (ii) highlight the ambient dose equivalents of nine (9) EPC which are beyond reference levels 7.5 μSv over one hour (iii) estimate the median cumulative effective dose at 0.82 mSv between 1972 and 2019 (iv) note a significant difference in median cumulative doses between workers who reported eye diseases ($P = 0.0005$) or skin masses ($P = 0.0011$) and those who declared nothing.