



HAL
open science

Évaluation de l'exposition au champ magnétique statique des manipulateurs en Électroradiologie Médicale d'un centre de recherche travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T à l'aide d'un dispositif portable

Mathilde Gimbert

► To cite this version:

Mathilde Gimbert. Évaluation de l'exposition au champ magnétique statique des manipulateurs en Électroradiologie Médicale d'un centre de recherche travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T à l'aide d'un dispositif portable. Médecine humaine et pathologie. 2022. hal-04042780

HAL Id: hal-04042780

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04042780>

Submitted on 23 Mar 2023

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

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



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN MÉDECINE

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

par

Mathilde GIMBERT

Le 24 juin 2022 à Nancy

**Évaluation de l'exposition au champ magnétique statique des
manipulateurs en Électroradiologie Médicale d'un centre de recherche
travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T à l'aide d'un dispositif portable**

Membres du Jury :

Monsieur le Professeur Damien MANDRY

Président du Jury

Monsieur le Professeur Jacques FELBLINGER

Directeur de Thèse

Madame le Docteur Isabelle THAON

Juge

Madame le Docteur Marie Line LEPORI

Juge

Monsieur le Docteur Matthieu DOYEN

Juge

Président de l'Université de Lorraine :
Madame Hélène BOULANGER

Doyen de la Faculté de Médecine
Professeur Marc BRAUN

Vice-doyenne
Pr Louise TYVAERT

Assesseurs :

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

Chargé de mission
PASS : Pr Mathias POUSSEL

=====

DOYENS HONORAIRES

Professeur Jacques ROLAND - Professeur Patrick NETTER - Professeur Henry COUDANE

=====

PROFESSEURS HONORAIRES

Etienne ALIOT - Jean-Marie ANDRE - Alain AUBREGE - Gérard BARROCHE - Alain BERTRAND - Pierre BEY - Marc-André BIGARD - Patrick BOISSEL – Pierre BORDIGONI - Jacques BORRELLY - Michel BOULANGE - Jean-Louis BOUTROY - Laurent BRESLER - Serge BRIANÇON – Jean-Claude BURDIN - Claude BURLET - Daniel BURNEL - François CHERRIER - Henry COUDANE - Jean-Pierre CRANCE - Jean-Pierre DESCHAMPS - Gilbert FAURE - Gérard FIEVE – Bernard FOLIGUET - Jean FLOQUET - Robert FRISCH - Pierre GAUCHER - Jean-Luc GEORGE - Alain GERARD - Hubert GERARD - Jean-Marie GILGENKRANTZ - Simone GILGENKRANTZ – Gilles GROSDIDIER - Philippe HARTEMANN - Bruno HOEN - Gérard HUBERT - Claude HURIET – Jean-Pierre KAHN - Gilles KARCHER - Michèle KESSLER - François KOHLER - Pierre LANDES - Pierre LASCOMBES - Marie-Claire LAXENAIRE - Michel LAXENAIRE - Alain LE FAOU – Jacques LECLERE - Pierre LEDERLIN - Bernard LEGRAS - Bruno LEHEUP - Jean-Pierre MALLIÉ - Philippe MANGIN - François MARCHAL - Jean-Claude MARCHAL – Yves MARTINET – Pierre MATHIEU - Thierry MAY - Michel MERLE - Daniel MOLÉ - Pierre MONIN - Pierre NABET - Patrick NETTER - Jean-Pierre NICOLAS - Francis PENIN - Claude PERRIN - François PLENAT - Jean-Marie POLU - Jacques POUREL - Francis RAPHAEL - Antoine RASPILLER - Denis REGENT - Jacques ROLAND - Daniel SCHMITT - Michel SCHMITT - Jean-Luc SCHMUTZ – Michel SCHWEITZER - Daniel SIBERTIN-BLANC - Claude SIMON - Jean-François STOLTZ – Michel STRICKER - Gilbert THIBAUT - Paul VERT - Hervé VESPIGNANI - Colette VIDAILHET - Michel VIDAILHET - Jean-Pierre VILLEMOT - Denis ZMIROU - Faïez ZANNAD

=====

PROFESSEURS ÉMÉRITES

Etienne ALIOT - Laurent BRESLER - Serge BRIANÇON - Henry COUDANE - Jean-Pierre CRANCE – Gilbert FAURE - Bruno HOEN- Jean-Pierre KAHN – Gilles KARCHER - Michèle KESSLER - Alain LE FAOU - Bruno LEHEUP - Thierry MAY - Patrick NETTER - Jean-Pierre NICOLAS - Jean-Luc SCHMUTZ - Paul VERT - Faiez ZANNAD

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

(Disciplines du Conseil National des Universités)

42° Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{re} sous-section : Anatomie

Professeur Marc BRAUN - Professeure Manuela PEREZ

2° sous-section : Histologie, embryologie et cytogénétique

Professeur Christo CHRISTOV

3° sous-section : Anatomie et cytologie pathologiques

Professeur Guillaume GAUCHOTTE – Professeur Hervé SARTELET

43e Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

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

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

2° sous-section : Radiologie et imagerie médicale

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

44° Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

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

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

2° sous-section : Physiologie

Professeur Christian BEYAERT - Professeur Bruno CHENUUEL - Professeur Mathias POUSSEL

3° sous-section : Biologie cellulaire

Professeure Véronique DECOT-MAILLERET

4° sous-section : Nutrition

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

45° Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

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

Professeur Alain LOZNIEWSKI – Professeure Evelyne SCHVOERER

2° sous-section : Parasitologie et Mycologie

Professeure Marie MACHOUART

3° sous-section : Maladies infectieuses ; maladies tropicales

Professeure Céline PULCINI - Professeur Christian RABAUD

46° Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

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

Professeure Nelly AGRINIER - Professeur Francis GUILLEMIN

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

Professeure Eliane ALBUISSON - Professeur Nicolas JAY

47° Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

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

Professeur Pierre FEUGIER – Professeur Thomas LECOMPTE

2° sous-section : Cancérologie ; radiothérapie

Professeur Thierry CONROY - Professeur Frédéric MARCHAL - Professeur Didier PEIFFERT

3° sous-section : Immunologie

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

4° sous-section : Génétique

Professeur Philippe JONVEAUX

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

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

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

2^e sous-section : Médecine intensive-réanimation

Professeur Sébastien GIBOT - Professeur Bruno LÉVY - Professeur Antoine KIMMOUN

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

Professeur Pierre GILLET - Professeur Jean-Yves JOUZEAU

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

Professeur Nicolas GIRERD - Professeur Patrick ROSSIGNOL

5^e sous-section : Médecine d'urgence

Professeur Tahar CHOUIHED

49° Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION

1^{re} sous-section : Neurologie

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

2^e sous-section : Neurochirurgie

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

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

Professeur Vincent LAPREVOTE - Professeur Raymund SCHWAN

4^e sous-section : Pédo-psychiatrie ; addictologie

Professeur Bernard KABUTH

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

Professeur Jean PAYSANT

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

1^{re} sous-section : Rhumatologie

Professeure Isabelle CHARY-VALCKENAERE - Professeur Damien LOEUILLE

2^e sous-section : Chirurgie orthopédique et traumatologique

Professeur Laurent GALOIS - Professeur Didier MAINARD - Professeur François SIRVEAUX

3^e sous-section : Dermato-vénéréologie

Professeure Anne-Claire BURSZTEJN

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

Professeur François DAP - Professeur Gilles DAUTEL - Professeur Etienne SIMON

51° Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE

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

Professeur Jean-François CHABOT - Professeur Ari CHAOUAT

2^e sous-section : Cardiologie

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

3^e sous-section : Chirurgie thoracique et cardiovasculaire

Professeur Juan-Pablo MAUREIRA - Professeur Stéphane RENAUD

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

Professeur Sergueï MALIKOV - Professeur Denis WAHL – Professeur Stéphane ZUILY

52° Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF ET URINAIRE

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

Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI - Professeur Laurent PEYRIN-BIROULET

2^e sous-section : Chirurgie viscérale et digestive

Professeur Ahmet AYAV - Professeur Laurent BRUNAUD – Professeure Adeline GERMAIN

3^e sous-section : Néphrologie

Professeur Luc FRIMAT - Professeure Dominique HESTIN

4^e sous-section : Urologie

Professeur Pascal ESCHWEGE - Professeur Jacques HUBERT

53° Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE ET MÉDECINE GÉNÉRALE

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

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

3^e sous-section : Médecine générale

Professeur Jean-Marc BOIVIN - Professeur Paolo DI PATRIZIO

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

1^{re} sous-section : Pédiatrie

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

2° sous-section : Chirurgie infantile

Professeur Pierre JOURNEAU - Professeur Jean-Louis LEMELLE

3° sous-section : Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale

Professeur Philippe JUDLIN - Professeur Olivier MOREL

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

Professeur Bruno GUERCI - Professeur Marc KLEIN - Professeur Georges WERYHA

55° Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

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

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

2° sous-section : Ophtalmologie

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

3° sous-section : Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie

Professeure Muriel BRIX

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

61° Section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

Professeur Walter BLONDEL

64° Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Professeure Sandrine BOSCHI-MULLER - Professeur Pascal REBOUL

65° Section : BIOLOGIE CELLULAIRE

Professeure Céline HUSELSTEIN

66° Section : PHYSIOLOGIE

Professeur Nguyen TRAN

=====

PROFESSEUR ASSOCIÉ DE MÉDECINE GÉNÉRALE

53° Section, 3° sous-section : Médecine générale

Professeure associée Sophie SIEGRIST

Professeur associé Olivier BOUCHY

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

42° Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{re} sous-section : Anatomie

Docteur Bruno GRIGNON

44° Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

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

Docteure Shyue-Fang BATTAGLIA - Docteure Sophie FREMONT - Docteure Isabelle GASTIN –

Docteure Catherine MALAPLATE - Docteur Marc MERTEN

2° sous-section : Physiologie

Docteure Iulia-Cristina IOAN (stagiaire) - Docteur Jacques JONAS

45° Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

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

Docteure Corentine ALAUZET - Docteure Hélène JEULIN - Docteure Véronique VENARD

2° sous-section : Parasitologie et mycologie

Docteure Anne DEBOURGOGNE

46° Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

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

Docteur Cédric BAUMANN - Docteure Frédérique CLAUDOT - Docteur Arnaud FLORENTIN –

Docteur Jonathan EPSTEIN – Docteur Abdou OMOROU (stagiaire)

2° sous-section Médecine et Santé au Travail

Docteure Isabelle THAON

47° Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

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

Docteur Julien BROSEUS – Docteure Maud D'AVENI

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

Docteure Lina BOLOTINE

3^e sous-section : *Immunologie*

Docteure Alice AARNINK

4^e sous-section : *Génétique*

Docteure Céline BONNET - Docteure Mathilde RENAUD

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

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

Docteur Philippe GUERCI

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

Docteur Nicolas GAMBIER - Docteure Françoise LAPICQUE - Docteur Julien SCALA-BERTOLA

49° Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION

2^e sous-section : *Neurochirurgie*

Docteur Fabien RECH

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

Docteur Thomas SCHWITZER

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

Docteur Fabienne ROUYER-LIGIER

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

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

Docteure Laetitia GOFFINET-PLEUTRET

51° Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE

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

Docteur Fabrice VANHUYSE

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

Docteure Nicla SETTEMBRE

52° Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF ET URINAIRE

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

Docteur Anthony LOPEZ

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

1^{re} sous-section : *Pédiatrie*

Docteure Cécile POCHON – Docteur Amandine DIVARET-CHAUVEAU (stagiaire)

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

Docteur Charline BERTHOLD (stagiaire)

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

Docteure Eva FEIGERLOVA

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

Docteur Mikaël AGOPIANTZ

55° Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

1^{re} sous-section : *Oto-Rhino-Laryngologie*

Docteur Patrice GALLET

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

5^e Section : SCIENCES ÉCONOMIQUES

Monsieur Vincent LHUILLIER

7^e Section : SCIENCES DU LANGAGE : LINGUISTIQUE ET PHONÉTIQUE GÉNÉRALES

Madame Christine DA SILVA-GENEST

19^e Section : SOCIOLOGIE, DÉMOGRAPHIE

Madame Joëlle KIVITS

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

Madame Pauline SOULET LEFEBVRE

64^e Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Madame Marie-Claire LANHERS - Monsieur Nick RAMALANJAONA

65^e Section : BIOLOGIE CELLULAIRE

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

69^e Section : NEUROSCIENCES

Madame Sylvie MULTON

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

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

Docteur Cédric BERBE – Docteur Antoine CANTON - Docteur Jean-Charles VAUTHIER

=====

DOCTEURS HONORIS CAUSA

Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)

Brown University, Providence (U.S.A)

Professeure Mildred T. STAHLMAN (1982)

Vanderbilt University, Nashville (U.S.A)

Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)

Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)

Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)

*Research Institute for Mathematical Sciences
de Kyoto (JAPON)*

Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)

Université d'Helsinki (FINLANDE)

Professeur Duong Quang TRUNG (1997)

Université d'Hô Chi Minh-Ville (VIËTNAM)

Professeur Daniel G. BICHET (2001)

Université de Montréal (Canada)

Professeur Marc LEVENSTON (2005)

Institute of Technology, Atlanta (USA)

Professeur Brian BURCHELL (2007)

*Université de Dundee (Royaume-
Uni)*

Professeur Yunfeng ZHOU (2009)

Université de Wuhan (CHINE)

Professeur David ALPERS (2011)

Université de Washington (U.S.A)

Professeur Martin EXNER (2012)

Université de Bonn (ALLEMAGNE)

REMERCIEMENTS

À notre Maître et Président du Jury

M. le Professeur Damien MANDRY

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier du CHRU de Nancy

Vous me faites l'honneur de vous intéresser à mon sujet de thèse en acceptant de présider mon jury.

Veillez trouver ici l'expression de ma plus vive reconnaissance.

À notre Maître et Directeur de Thèse

Monsieur le Professeur Jacques FELBLINGER

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier du CHRU de Nancy

Vous m’avez fait l’honneur de me proposer de travailler avec vous pour ma thèse. Vous m’avez transmis votre intérêt pour le sujet et cela me tient à cœur de poursuivre ce travail avec vous après ma soutenance. Je vous suis reconnaissante pour l’intérêt que vous portez à la santé au travail.

Veillez trouver ici mes plus sincères remerciements.

À notre Maître et Juge

Madame le Docteur Isabelle THAON

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier du CHRU de Nancy

Vous m’avez accompagnée depuis le début de mon internat de santé au travail et inculquée l’importance de la rigueur dans un travail scientifique.

Vos conseils ont été précieux afin de produire un écrit soigné et utile au domaine de la santé au travail

À notre Maître et Juge

Madame le Docteur Marie Line LEPORI

Médecin du travail du CHRU de Nancy

Vous me faites l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez accordé à mon sujet.

Je vous suis également très reconnaissante de m'avoir transmis au quotidien votre savoir et j'espère tout au long de ma carrière suivre un parcours aussi remarquable que le vôtre.

À notre Maître et Juge

Monsieur le Docteur Matthieu DOYEN

Ingénieur pour l'Université de Lorraine, l'INSERM et le laboratoire IADI

Je te remercie sincèrement pour le sérieux avec lequel tu t'es impliqué dans ma thèse.

Tu as accepté de donner de ton temps pour que je puisse rendre un article de grande qualité et je t'en suis très reconnaissante.

À Nicolas WEBER, je te remercie pour tes réponses à mes questions dans des domaines que seul toi maîtrisais.

Aux manipulateurs radio du CEA, qui gardent un intérêt constant depuis plusieurs années au sujet de la mesure de l'exposition au champ magnétique statique. Merci d'avoir accepté de porter notre prototype dès que vous le pouviez.

À M. Alexandre VIGNAUD (chercheur au CEA) et au Dr Isabelle FABRE (médecin du travail du CEA) d'avoir porté de l'intérêt à mon projet et d'avoir accepté de répondre à mes sollicitations chaque fois que j'en ai eu besoin.

À Antoine DELMAS, à qui je dois beaucoup pour le développement de cet exposimètre et qui m'a permis de nourrir par le biais de ses écrits un intérêt grandissant pour l'évaluation de l'exposition au CMS.

Au service de MTPH du CHRU, qui m'a soutenue au quotidien et qui a continué à éveiller mon intérêt pour les autres domaines de la santé au travail en dehors de ces longues heures de travail au sujet de l'IRM.

À ma maman, qui m'a toujours encouragée à valoriser mes compétences et qui m'a portée jusqu'à l'aboutissement de mes études grâce à ses conseils avisés et sa patience. Merci aussi pour ta fermeté dans les moments de doutes qui m'a permis de ne jamais baisser les bras et de devenir la femme épanouie que je suis aujourd'hui.

À mon papa, dont je ne peux parler qu'avec fierté. Tu m'as prouvé que tout est possible lorsque l'on y met de la passion et de la détermination. Je t'écoutais en souriant lorsque tu m'incitais à choisir la médecine du travail et maintenant que je suis heureuse d'être là, je t'en suis extrêmement reconnaissante.

À ma sœur, Juliette, qui est pour moi un modèle de réussite. Avec ta douceur, ta patience et ta bienveillance je ne peux qu'imaginer le bonheur que ce doit être de t'avoir pour sage-femme. J'admire tellement ta résilience et ta capacité à aller vers de nouveaux horizons.

À mon frère, Gauthier, qui est incroyablement intelligent et doué quoi qu'il en dise. J'ai adoré t'aider à grandir et je suis extrêmement fière de ton parcours. Tu mérites sincèrement de t'épanouir et de réussir dans la voie que tu as choisie. Tu es à la fois drôle et sensible et les moments passés en ta compagnie sont toujours un véritable bonheur.

À mes grands-parents, qui depuis toute petite m'ont toujours fait me sentir capable de grandes choses. Je vous aime pour l'admiration que vous me portez et je vous remercie de m'avoir autant encouragée dans ce qui m'épanouissait.

À Benoit, qui a été présent à mes côtés durant ces longues heures de travail. Merci au quotidien de me faire naturellement comprendre que je suis importante et de me donner confiance en moi. J'ai véritablement hâte de m'impliquer dans ces nouveaux projets avec toi.

À Pierre et Sophie, même si nos soirées jeux de sociétés jusqu'à 2h du matin m'ont valu quelques retards dans l'avancement de mon travail, j'adore ces moments passés avec vous. Votre humour et votre bienveillance sont notamment ce qui rendent ces moments toujours aussi agréables.

À Valérie et Éric, parce que je suis convaincue que sans votre aide je n'aurais pas pu me réjouir d'en être arrivée là aujourd'hui. Je vous suis extrêmement reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi et je vous souhaite autant de bonnes choses que vous avez pu m'en apporter.

À Thomas, Emma, Aaron et Eden, pour m'avoir accueillie avec toujours autant d'enthousiasme. La simplicité et la naïveté des moments que nous avons passés ensemble ont été vraiment précieux pour moi. J'espère que vous saurez récompenser mon travail en m'avouant votre signe de Kems, élu secret le mieux gardé depuis 10 ans.

À Meghann et Bastian parce que vous êtes d'une gentillesse et d'un altruisme précieux. J'ai hâte de profiter de ces moments avec vous plus souvent.

À mes co-internes de médecine du travail et amis, Aurélie, Clémence, Amélie, Yan, Matthias et Cédric, pour ces moments passés avec vous. Je suis ravie que nos liens d'amitié se poursuivent encore aujourd'hui après l'internat et je vous souhaite tout autant d'épanouissement que moi dans cette spécialité.

À Charlotte, Bruno, Caroline, Amine et Louis, car je me sens toujours la bienvenue chez vous grâce à votre accueil chaleureux et votre bienveillance.

À François, à qui je dois beaucoup pour m'avoir orientée vers le Pr FELBLINGER et ainsi m'avoir permis de trouver ce sujet de thèse que j'ai d'emblée trouvé passionnant.

À monsieur le Docteur Serge PARISOT, qui grâce à ses compétences, sa bienveillance et sa patience m'a encouragée sans le savoir à faire des études de médecine.

À toutes les autres personnes que je n'ai pas citées et qui m'ont permis grâce à leurs qualités propres à chacune d'arriver jusqu'ici.

SERMENT

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

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

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

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

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	19
TABLE DES TABLEAUX	20
ABRÉVIATIONS	21
INTRODUCTION	22
I. Les champs électromagnétiques :	22
1. Principe :	22
2. Les champs électromagnétiques dans l'industrie :	22
3. Les champs électromagnétiques dans le domaine de la santé :	22
II. Fonctionnement d'une IRM :	24
1. Le champ magnétique statique :	24
2. Autres champs magnétiques utilisés en IRM :	26
III. Les effets des champs magnétiques de l'IRM sur le corps humain :	28
1. Effets à court terme :	28
2. Mécanisme des effets sensoriels et pour la santé :	30
3. Effets à long terme, risque cancérogène et risque tératogène :	33
IV. Prévention des effets liés aux champs magnétiques :	35
1. Notion de VA et VLE :	35
2. Directive européenne :	35
3. Décret Français :	36
4. Valeurs seuils :	37
a. Directive Européenne et décret Français :	37
b. ICNIRP :	38
V. Analyse de l'exposition au CMS :	39
1. Méthodes de mesure du CMS :	39
2. Intérêt de mesurer l'exposition au CMS :	42
a. Pour tous les acteurs de la prévention des risques :	42
b. Pour le médecin du travail :	42
c. Justification de l'étude :	43

ARTICLE DE RECHERCHE	44
RESUME.....	44
ABSTRACT	46
INTRODUCTION.....	47
METHODE	54
RESULTATS	60
DISCUSSION	64
CONCLUSION	70
REFERENCES.....	71
DISCUSSION	76
I. Caractérisation de l'exposition au CMS chez les salariés travaillant à proximité d'IRM : ..	
.....	76
1. Exposition cumulée :.....	76
a. B0 cumulée :.....	76
b. TWA :.....	77
2. Control Chart :.....	77
3. Calcul de l'exposition au CMS en fonction de la fréquence :.....	78
II. La mesure du CMS à l'aide d'un exposimètre	80
1. Discussion autour de notre dispositif :	80
2. Où porter le dosimètre :.....	81
3. Ondes RF et dosimètre :	82
III. Prévention des risques liés au CMS de l'IRM :	83
1. Conseils de prévention utiles à la pratique du médecin du travail :.....	83
2. Adapter sa pratique à son exposition :	84
CONCLUSION	86
BIBLIOGRAPHIE	87

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Lignes de champ de l'IRM Magnetom Prisma ^{fit} 3T, Siemens Healthineers, Allemagne, extrait du manuel de l'exploitant MAGNETOM Prisma ^{Fit}	25
Figure 2 : Schéma des différentes zones autour d'une IRM telles que définies par la Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (MHRA)	27
Figure 3 : Représentation imagée des VLE et VA	36

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : VLE pour une induction magnétique externe (B_0) comprise entre 0Hz et 1Hz.... 38

Tableau 2 Caractéristiques des études d'évaluation du CMS à proximité d'IRM à l'aide de dispositifs portables individuels..... 41

ABRÉVIATIONS

<u>ASH</u>	: Agent des Services Hospitaliers
<u>CEA</u>	: Centre pour l'Énergie Atomique
<u>CEM</u>	: Champ Électro-Magnétique
<u>CHSCT</u>	: Comité d'Hygiène de Sécurité et des Conditions de Travail
<u>CHRU</u>	: Centre Hospitalier Régional Universitaire
<u>CIRC</u>	: Centre International de Recherche sur le Cancer
<u>CMS</u>	: Champ Magnétique Statique
<u>DREETS</u>	: Direction Régionale de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités
<u>HTA</u>	: Hypertension Artérielle
<u>IADÉ</u>	: Infirmier Anesthésiste Diplômé d'État
<u>IADI</u>	: Imagerie Adaptative, Diagnostique et Interventionnelle
<u>IBODE</u>	: Infirmier de Bloc Opératoire Diplômé d'État
<u>ICNIRP</u>	: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
<u>IRM</u>	: Imagerie par Résonance Magnétique
<u>MERM</u>	: Manipulateur en Électroradiologie Médicale
<u>MHRA</u>	: Medicines and Healthcare products Regulatory Agency
<u>MRSO</u>	: Magnetic Resonance Safety Officer
<u>OMS</u>	: Organisation Mondiale de la Santé
<u>RF</u>	: Radio Fréquence
<u>SD</u>	: Secure Digital
<u>SNC</u>	: Système Nerveux Central
<u>SNP</u>	: Stimulation Nerveuse Périphérique
<u>TA</u>	: Tension Artérielle
<u>TWA</u>	: Time Weight Average
<u>UE</u>	: Union Européenne
<u>VA</u>	: Valeurs déclenchant l'Action
<u>VLE</u>	: Valeurs Limites d'Exposition

INTRODUCTION

I. Les champs électromagnétiques :

1. Principe :

Un champ électromagnétique est généré par des charges électriques se propageant dans un conducteur. Il peut donc être présent à proximité de nombreux appareils du quotidien utilisant l'électricité comme source d'énergie : lampe, télévision, plaque de cuisson, etc. (1).

2. Les champs électromagnétiques dans l'industrie :

Dans le domaine industriel, les sources de champs électromagnétiques sont nombreuses et existent dans toutes les gammes de fréquences (2) :

- 0 Hz : Champ Magnétique Statique (CMS) : cuves à électrolyse pour la préparation industrielle d'aluminium.
- 50-60 Hz : Champ très basses fréquences : distribution d'électricité, procédés de soudage par résistance ainsi que certaines presses.
- 50 Hz à plusieurs MHz : moyennes fréquences : procédés industriels qui utilisent l'induction comme les fours de fonderie.
- Quelques MHz : Radiofréquences (RF) : soudage de matières thermoplastiques.
- Plusieurs GHz : Micro-Ondes : certains fours industriels.
- Gammes très larges de fréquences : outils de télécommunications.

3. Les champs électromagnétiques dans le domaine de la santé :

Dans le domaine médical, les champs électromagnétiques peuvent être utilisés à visée thérapeutique. Le CMS est par exemple utilisé dans la « Stimulation Magnétique Transcrânienne » pour traiter les dépressions résistantes à tout autre thérapeutique (3). Le « Système de Navigation Magnétique Robotisée » est un robot utilisé en électrophysiologie

cardiaque (4). Il utilise le CMS d'aimants puissants pour maintenir une sonde sur le tissu cardiaque et des ondes RF pour réaliser des ablations de faisceaux électriques défilants au niveau du cœur. On peut également réaliser des ablations de tumeurs grâce aux ondes radiofréquences.

En chimie et biochimie, la spectroscopie par « Résonance Magnétique Nucléaire » utilise les propriétés de résonance magnétique des noyaux de certains atomes (^{13}C , ^{19}F , ^{31}P , ^{23}Na et ^1H) pour caractériser des échantillons biologiques et chimiques.

Nous nous intéressons ici à l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) qui est une technique qui utilise les propriétés de résonance magnétique du proton (^1H) pour produire des images médicales. Elle est particulièrement performante pour l'exploration des tissus mous : cerveau, seins, articulations ...

En 2017, le nombre d'appareils d'IRM en France était d'environ 940 et ce chiffre est en constante augmentation (5). En 2020, plus de 400 millions d'exams avaient déjà été réalisés dans le monde depuis les débuts de l'IRM (6).

Les salariés qui peuvent être amenés à s'approcher d'une IRM sont nombreux et leurs métiers variés : Manipulateurs en Électro-Radiologie Médicale (MERM), radiologues, chirurgiens, Infirmiers du Bloc Opératoire Diplômés d'État (IBODE), anesthésistes, Infirmiers Anesthésistes Diplômés d'État (IADE), Agents des Services Hospitaliers (ASH), mais aussi des techniciens, agents de maintenance, ... En 2013, le nombre de salariés travaillant à proximité d'IRM était estimé à 100 000 en Europe (7).

II. Fonctionnement d'une IRM :

1. *Le champ magnétique statique :*

Un appareil d'IRM est composé d'un aimant permanent (ou aimant supraconducteur) qui génère un CMS intense nommé B_0 . La valeur de B_0 est également nommée induction magnétique ou densité de flux magnétique. B_0 fait tourner les protons ^1H sur eux-mêmes et autour de son axe à la manière d'une toupie. Ce mouvement dit de précession a une fréquence angulaire proportionnelle à B_0 . Cette fréquence est également nommée fréquence de Larmor. Elle est de 63,87 MHz pour une IRM 1,5 T et de 127,74 MHz pour une IRM 3 T.

Les appareils d'IRM sont classés en fonction de la valeur maximale de B_0 située au centre du tunnel (ou isocentre) qui s'exprime en Teslas (T) :

- 1,5 T : IRM hauts champs
- 3 T : IRM très hauts champs
- A partir de 7 T : IRM ultra hauts champs, qui sont essentiellement utilisés pour la recherche. Le CHRU de Poitiers est le seul en France à disposer d'une IRM 7T pour la clinique.

Le CMS de l'IRM est très grand par rapport au champ magnétique terrestre. Ce dernier varie en fonction de la localisation sur Terre mais a une valeur moyenne de $50\mu\text{T}$ (8).

Un blindage actif (grâce à un aimant supraconducteur autour de la machine dont la direction du champ est opposée à celle de la machine) permet à B_0 d'être maximal au milieu du tunnel et de décroître très rapidement à sa sortie. Certaines machines d'IRM possèdent un blindage passif (grâce à des éléments métalliques qui entourent l'IRM) qui fait également décroître B_0 aux alentours mais de façon plus progressive. Cette décroissance rapide du champ magnétique permet une moindre exposition du salarié à mesure qu'il s'éloigne du tunnel mais le soumet à des variations de champ magnétique dans le temps (dB/dt) importantes lors de ses déplacements

à proximité de l'IRM. En effet, par exemple, pour une IRM 3T, le champ magnétique résiduel au bout de la table est de l'ordre de 0,1T alors qu'il est de 3T au centre du tunnel (9). Ces différences de champ magnétique sont donc de l'ordre de quelques Teslas par mètre. Les gradients de champ magnétique, dB/dt, s'expriment en T.s⁻¹. Ils peuvent également être générés par un salarié statique dans l'espace mais qui tourne sur lui-même ou bouge sa tête dans le CMS.

La répartition des lignes de champ de différentes valeurs (isocourbes ou lignes de Gauss) dépend du modèle d'IRM et du type de blindage (*figure 1*).

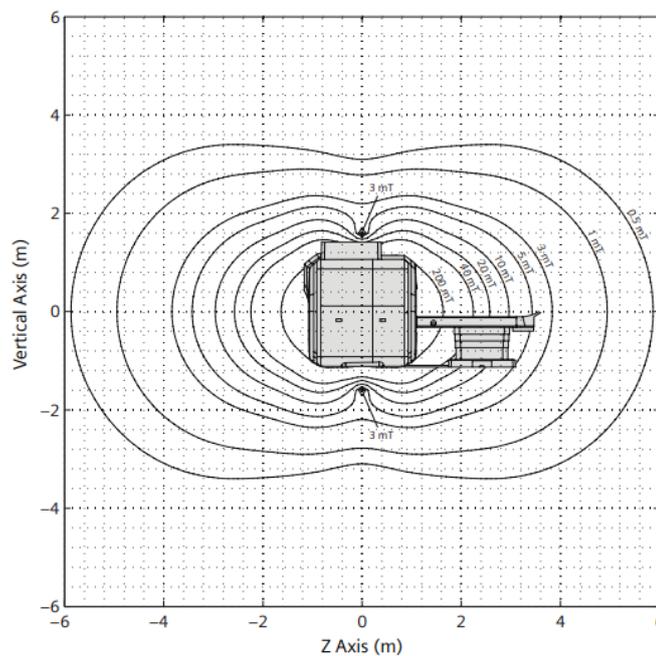


Figure 1 : Lignes de champ de l'IRM Magnetom Prisma^{Fit} 3T, Siemens Healthineers, Allemagne, extrait du manuel de l'exploitant MAGNETOM Prisma^{Fit}

Comme le CMS est permanent, il est le champ magnétique auquel un MERM est le plus exposé (7) :

- Avant l'acquisition : lorsqu'il installe le patient sur la table, installe une antenne, fait entrer le patient dans la machine ou pour injecter un produit de contraste
- Pendant l'acquisition : lorsqu'il s'agit d'IRM interventionnelle, en pédiatrie pour rassurer un enfant ou encore en cas d'urgence

- Après l'acquisition : lorsqu'il fait sortir le patient du tunnel, enlève l'antenne, aide le patient à se remettre debout ou sur le brancard et lorsqu'il l'accompagne vers la sortie de la salle
- Entre chaque acquisition : lorsqu'il désinfecte la machine

2. *Autres champs magnétiques utilisés en IRM :*

Durant l'acquisition d'images, l'IRM produit également des champs variables :

- Des gradients de champ magnétique ou gradients de codage spatial (dB/dt) : de fréquence variable entre 0 et 10kHz. Ils vont permettre de coder spatialement l'image et donc de sélectionner différentes coupes au niveau de la région anatomique à étudier.
- Des impulsions radio fréquences (B_1) : Une antenne émettrice d'ondes RF transfère de l'énergie aux protons à la fréquence de Larmor également. Une antenne réceptrice analyse ensuite les signaux de relaxation de ces protons pour enfin donner une image en contraste. Certaines antennes sont à la fois émettrices et réceptrices. Des antennes sont intégrées à la machine et d'autres peuvent être ajoutées sur le patient pour augmenter le signal.

La salle dans laquelle se trouve généralement l'appareil d'IRM se nomme la cage de Faraday (*figure 2*). Cette cage de Faraday empêche les ondes RF de l'extérieur d'y pénétrer ce qui pourrait perturber le signal IRM. A l'inverse, elle permet de ne pas transmettre les ondes RF de l'IRM à l'extérieur ce qui pourrait être à l'origine d'interférences avec d'autres dispositifs. Seul le personnel formé est autorisé à accéder à cette salle.

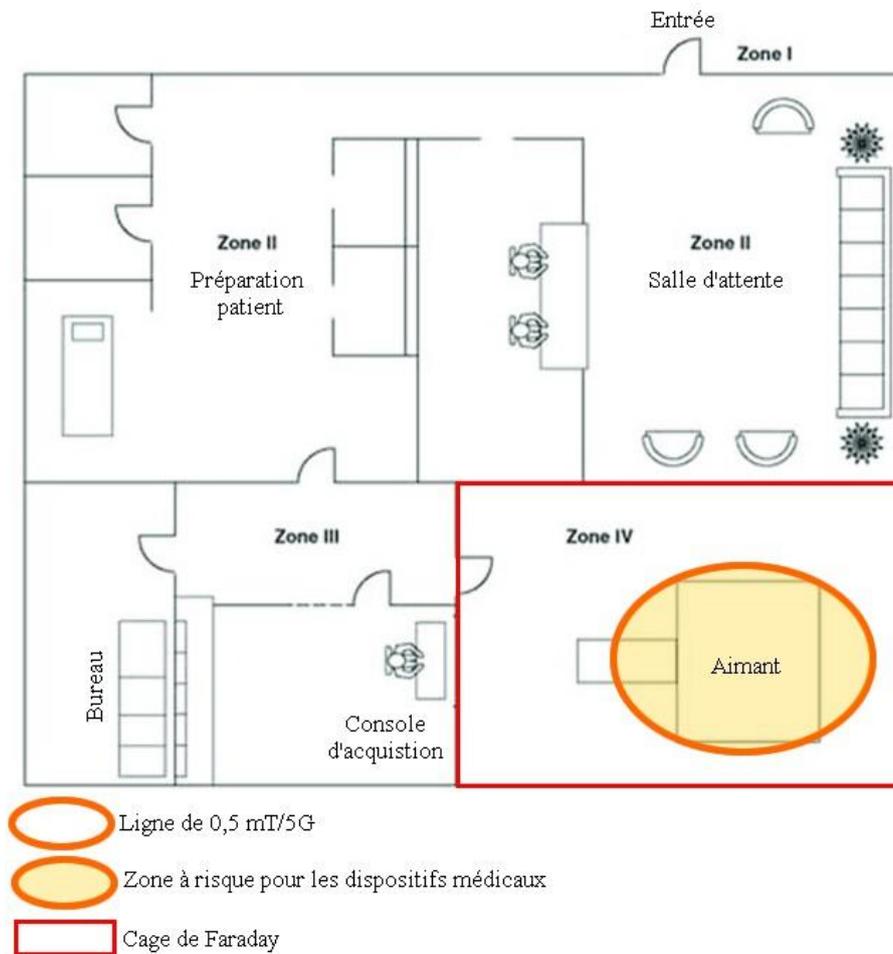


Figure 2 : Schéma des différentes zones autour d'une IRM telles que définies par la Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (MHRA)

Concernant ces deux derniers champs (gradients de champ et B_1), les MERM n'y sont exposés que dans de rares cas : par exemple pour rassurer un patient au cours d'une acquisition, lors de situations d'urgences ou parfois lors de procédures interventionnelles. La plupart du temps durant l'acquisition d'image, les MERM sont à la console informatique où ils ne sont donc pas exposés aux différents champs électromagnétiques (10).

III. Les effets des champs magnétiques de l'IRM sur le corps humain :

1. Effets à court terme :

La littérature scientifique est abondante au sujet de ces effets à court terme.

Effets indirects :

Ils résultent de l'action du champ magnétique sur des objets, ce qui peut constituer un risque pour la santé ou la sécurité du salarié. Il peut s'agir d'une force d'attraction sur un objet (téléphone, bijoux, objets ferromagnétiques dans les poches de blouse, etc.) ou sur un dispositif médical implanté ferromagnétique. B_0 , B_1 et dB/dt , peuvent également être à l'origine d'interférences avec un dispositif médical implanté actif (pacemaker, pompe à insuline, etc.) et le rendre dysfonctionnel (11). Il est donc important de réaliser une analyse de risques approfondie chez les salariés qui porteraient un tel dispositif afin d'estimer s'il est compatible avec un poste à proximité d'une IRM.

Effets directs :

Ce sont les effets des champs magnétiques sur le corps humain. Ils sont transitoires et réversibles. La directive Européenne 2013/35/UE a choisi de classer les effets biophysiques des champs magnétiques en 2 catégories (12) :

- Les « effets sensoriels » : ils concernent les symptômes liés à une stimulation des organes sensoriels (oreille, langue, yeux). Ils comprennent notamment les vertiges et nausées (13-23). L'apparition d'un goût métallique dans la bouche a également été décrit comme effets du CMS (14,21,22,24,25) ainsi que des phosphènes (taches fictives dans le champ visuel) (25). Ces effets sont la plupart du temps causés par un déplacement ou des mouvements de tête du salarié dans B_0 et sont d'autant plus fréquents que ceux-ci sont rapides (14,16,17,19,24,26). Des vertiges peuvent également survenir lorsque le sujet est statique dans un CMS intense (18,27-29). Ils seraient

d'autant plus fréquents que le champ magnétique statique est intense (13,15,17,19,21,28). Ces symptômes étant subjectifs, afin de les mettre en évidence la plupart des études utilisent un questionnaire avec une liste de symptômes suspectés d'être liés au CMS à renseigner après exposition (13-15,19-23). Certaines à l'inverse, demandent aux personnes exposées de s'exprimer oralement sur leur ressenti pendant l'exposition au moyen d'un microphone ou juste après l'exposition (19,25,26,29). Pour que le lien entre ces symptômes et l'exposition soit considéré comme significatif, les questionnaires contenaient souvent des items avec des symptômes qui n'ont pas de rapport avec l'exposition (symptômes d'allergie par exemple) (13,14,19-20) et certaines études exposaient leurs volontaires à l'aveugle (18,19,29) ou dans des répliques d'IRM sans champ magnétique (23,25,28). D'autres études ont étudié de façon objective les effets du champ magnétique statique sur le système vestibulaire en le corrélant à la présence d'un nystagmus (mouvements rapides des globes oculaires) (16,19,29) ou au moyen de tests recherchant des troubles de l'équilibre (28).

Des effets neurocognitifs mineurs et passagers lors de mouvements ou déplacements dans un CMS ont également été mis en évidence : diminution de la sensibilité aux contrastes en vision de près (30), réduction de la vitesse de la coordination des yeux et des mains (19,30-32), diminution de la vitesse de suivi oculaire (32), troubles de l'attention (33). Dans ces études, les effets disparaissent après arrêt de l'exposition.

- Les « effets pour la santé » : Ils concernent les effets biophysiques qui touchent des organes non sensoriels (cœur, système nerveux périphérique, etc.). Pour le CMS, il s'agirait d'une perturbation de la fonction cardiaque (telle qu'une dépolarisation cardiaque) ou d'une modification du flux sanguin mais ces effets n'ont pas été démontrés pour des inductions $< 8T$ (34) ou $< 9,4T$ (25). Pour les gradients de champs

magnétiques, il s'agit d'effets à type de stimulations nerveuses périphériques (SNP) ou musculaires (35,36) : picotements, fourmillements. Ils peuvent survenir en raison des gradients de champs produits par la machine où ceux générés par un salarié en mouvement dans le CMS. Pour les ondes RF, il s'agit d'échauffements de certains tissus du corps humain (effets thermiques). Ils ne peuvent survenir que pendant l'acquisition. Pour protéger les salariés de ces effets, la directive Européenne de 2013/35/UE (12), fixe des valeurs de Débit d'Absorption Spécifique (DAS) exprimées en $W.kg^{-1}$ à ne pas dépasser. Le DAS correspond à la puissance absorbée par un tissu biologique et est par exemple utilisé pour déterminer la quantité d'ondes RF émise par un téléphone portable avec des normes à respecter par les fabricants.

2. Mécanisme des effets sensoriels et pour la santé :

Dans la littérature, certains principes physiques ont été décrits pour expliquer les effets sensoriels et pour la santé :

Effets pour la santé :

L'effet magnétohydrodynamique (37) ou effet Hall expliquerait ces effets. Le sang est un fluide en mouvement dans le corps humain. Le champ magnétique lorsque sa direction n'est pas parallèle à un vaisseau sanguin exerce une force inverse sur le flux sanguin. Cette force serait maximale lorsque l'angle est de 90° entre le vaisseau et la direction du champ magnétique. Elle augmenterait également avec la valeur du champ magnétique. Cependant la plupart des gros vaisseaux amenant le sang au cœur étant parallèles au champ magnétique à l'intérieur du tunnel de l'IRM, la modification du flux sanguin est considérée comme négligeable pour des IRM $<8T$. L'effet magnétohydrodynamique du champ magnétique statique intense induirait également un courant électrique à la surface du vaisseau (38). Ces courants n'induisent pas

d'effets néfastes sur la conduction cardiaque en dessous de 8T mais ils peuvent tout de même être à l'origine d'artefacts lorsque l'on veut réaliser un électrocardiogramme au sein de l'IRM.

Effets sensoriels :

Le système vestibulaire est situé au sein de l'oreille interne. Il est composé de canaux dans les 3 directions de l'espace (les canaux semi-circulaires) et des organes otolithiques (utricules et saccules). Ces différentes structures sont remplies d'un liquide nommé « endolymphe ». Lors d'un mouvement du corps humain, l'endolymphe bouge à l'intérieur de ces canaux et fait bouger la cupule. Cette membrane est rattachée à des cils qui vont se déplacer également. Le mouvement des cils génère un influx nerveux vers le Système Nerveux Central (SNC) par l'intermédiaire du nerf vestibulo-cochléaire. Cela donne ainsi des indications au cerveau sur la position et les mouvements du corps humain.

Les vertiges sont une fausse sensation de mouvement de l'environnement ou du corps humain. Ils sont causés par une stimulation inadéquate des différentes structures précitées (endolymphe, cupule, cils, SNC) qui donne au corps une sensation de mouvement erronée. Les nausées ainsi que les nystagmus sont également provoqués par cette activation inadaptée du système vestibulaire (39).

Le champ magnétique statique peut être à l'origine d'une stimulation du système vestibulaire par le fait de plusieurs mécanismes :

- L'effet magnétohydrodynamique : il pourrait s'appliquer au fluide qu'est l'endolymphe (22,38) en particulier en cas de mouvement rapide de la tête faisant circuler ce fluide (18).
- Les forces magnéto-mécaniques et le torque : les molécules s'orientent naturellement à l'intérieur d'un champ magnétique pour être au plus faible niveau d'énergie libre (32,36). En fonction des propriétés magnétiques d'un tissu, l'action du champ magnétique va être plus ou moins importante sur l'orientation des

molécules qui le composent. Cependant si cet effet est important sur des objets ferromagnétiques, il serait très faible sur les tissus du corps humain (38).

- La force de Lorentz : elle s'exercerait sur les ions circulant dans les différents fluides du corps humain lorsqu'ils sont soumis à un champ électromagnétique intense (37). Au sein de l'oreille interne, elle aurait un effet sur les ions potassium de l'endolymphe. Elle générerait de ce fait une hyperpression sur une des membranes engendrant un déplacement des cils (27). Le mouvement de ces cils induirait ainsi un faux message de déplacement au corps humain (18). La force de Lorentz expliquerait surtout l'effet du champ magnétique sur un corps statique (27,29). Cette force serait d'autant plus importante sur les organes de l'oreille interne lorsque leur membrane est perpendiculaire au CMS et lorsque l'induction magnétique est importante (27).
- Les courants induits ou loi de Faraday : C'est l'effet le plus décrit dans la littérature. Le corps humain est un conducteur qui lorsqu'il se déplace dans un champ magnétique variable ou tourne sur lui-même dans un champ uniforme génère une tension induite (40,41). Ce courant induit s'exprime en $V.m^{-1}$. A partir d'une certaine induction magnétique, les courants induits seraient suffisants pour engendrer une dépolarisation (et donc une activation) de certaines structures nerveuses du corps humain (cellules ciliées, nerf vestibulo-cochléaire pour les vertiges et nausées ; nerf optique pour les phosphènes ; papilles gustatives pour le goût métallique dans la bouche, nerfs des muscles pour les SNP) (36,41).

3. Effets à long terme, risque cancérogène et risque tératogène :

Effets à long terme :

À ce jour, il n'y a pas de preuves d'effets à long terme ou cumulatifs du champ magnétique statique de l'IRM sur l'être humain. Seules quelques études se sont penchées sur le sujet.

Une étude rétrospective a été réalisée à partir d'une cohorte de 5173 salariés ayant travaillé au sein d'une usine fabriquant des appareils d'imagerie aux Pays-Bas (42). L'étude a porté sur 538 salariés dont 135 appartenaient à un groupe contrôle non exposé au CMS. Les données de tension artérielle (TA) provenaient de visites périodiques de santé au travail. L'exposition cumulée au CMS entre la première et la dernière mesure de TA a été estimée grâce à une matrice « emploi-exposition » développée dans un autre article (43). Cette étude a montré une association statistiquement significative entre de fortes expositions cumulées au CMS ($>7413\text{T}\cdot\text{min}^{-1}$) sur une période inférieure à dix ans et l'apparition d'une hypertension artérielle (HTA). Le risque de développer une hypertension était même plus élevé lorsqu'il était ajusté avec des facteurs confondants tels que la consommation d'alcool et de tabac.

Une autre étude (44) a été réalisée à partir de cette même cohorte à laquelle il a été envoyé un questionnaire en ligne pour estimer la corrélation entre l'exposition au CMS et le risque de blessure ainsi que d'accident de trajet dans l'année précédente. 1393 salariés (30% des salariés de la cohorte) ont rempli entièrement le questionnaire. Parmi eux, 951 n'avaient jamais exposés au CMS. Les résultats montraient un risque significativement plus élevé de blessure chez les personnes les plus exposées au CMS l'année précédente ($> 1796\text{T}\cdot\text{min}^{-1}$) et d'accident au cours d'un trajet « domicile-travail » chez les personnes les plus exposées sur l'ensemble de leur carrière. Seul l'alcool a été pris en compte en tant que facteur confondant mais il n'a pas montré d'influence sur les résultats.

Une autre étude (45) a également évalué le risque d'accident de trajet chez des MERM de centres d'imageries aux Pays-Bas grâce à un questionnaire en ligne. Ce questionnaire se

distinguaient du précédent car il prenait en compte un nombre plus important de facteurs confondants tels que le stress, le nombre de gardes de nuit, la qualité du sommeil ou la consommation de café. 490 MERM ont répondu à cette étude dont 257 avaient été exposés au CMS dans l'année précédente. Les résultats montraient un risque d'accident de trajet d'autant plus important que l'exposition était fréquente. Ce lien était même renforcé en tenant compte du nombre de gardes de nuits, de l'âge et du stress. Les auteurs de ces études préconisent cependant des études supplémentaires afin de prouver ces effets et d'en comprendre le mécanisme.

Effets cancérogènes :

Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) n'a pas rapporté de risque cancérogène pour les champs magnétiques présents à proximité de l'IRM. Seule l'exposition chronique aux ondes de très basses fréquences des lignes à haute tension (46) et aux ondes RF des téléphones sans fil (47) sont classées 2B « peut-être cancérogène pour l'Homme ».

Effets tératogènes :

Aucune étude scientifique menée sur des femmes ou des souris enceintes exposées au CMS de l'IRM n'a jusqu'alors démontré un risque tératogène ou de risque sur le déroulement de la grossesse (avortement, naissance prématurée, etc.). Les études menées sur ce sujet recommandent cependant toutes des évaluations complémentaires pour conclure à l'absence de risque. Une étude publiée en 1993 (48) a été menée auprès de 1915 femmes travaillant dans des centres d'imagerie aux États-Unis auxquelles il a été demandé de compléter un questionnaire. 1421 femmes ont déclaré une grossesse parmi lesquelles 280 travaillaient à proximité d'IRM pendant leur grossesse. Les résultats de cette étude montraient un risque légèrement supérieur d'avortement spontané, de prématurité et de petit poids à la naissance mais aucun n'était statistiquement significatif et aucune étude de ce type n'a été reconduite depuis.

IV. Prévention des effets liés aux champs magnétiques :

1. Notion de VA et VLE :

Pour prévenir les effets de certains risques sur le corps humain, il est défini des Valeurs déclenchant l'Action (VA) et Valeurs Limite d'Exposition (VLE). Les VA correspondent à la valeur au-delà de laquelle des mesures de prévention doivent être prises pour diminuer l'exposition des salariés. Les VLE ne devraient jamais être dépassées. Les VA sont donc plus contraignantes que les VLE afin de garantir qu'en respectant les VA, les VLE le soient également.

2. Directive européenne :

Dans le but de prévenir les risques liés aux champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz, la Directive Européenne 2004/40/CE a défini des VLE et VA (49), mais ces valeurs seuils étaient trop contraignantes pour l'utilisation de l'IRM (50,51). En effet, elles imposaient par exemple que l'exposition au champ magnétique statique ne dépasse pas 0,2T. Cela ne permettrait donc même pas à un salarié de s'approcher de l'IRM pour installer un patient.

Une nouvelle Directive Européenne a donc été éditée en 2013 avec de nouvelles VA et VLE : la 2013/35/UE (12). Elle donne des lignes de conduite aux états membres de l'Union Européenne (UE) pour protéger la santé et la sécurité de leurs salariés qui travaillent à proximité de sources émettant des champs électromagnétiques et notamment pour les salariés travaillant à proximité d'IRM.

Dans le domaine des champs électromagnétiques, seules les VA peuvent être mesurées à l'aide d'un dispositif externe au corps humain. Les VLE doivent être calculées en fonction des capacités d'absorption des champs électromagnétiques de chaque tissu du corps humain. (Figure 3).



Figure 3 : Représentation imagée des VLE et VA

Elles sont établies afin d'éviter les effets biophysiques connus à court terme des champs électromagnétiques. On distingue les VLE relatives « aux effets sur la santé » et les VLE relatives « aux effets sensoriels ».

Tout employeur doit évaluer les risques auxquels ses salariés sont exposés et mettre en place des mesures pour les prévenir (52). Le « guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE » a été créé pour les aider à mesurer l'exposition de leurs salariés aux champs électromagnétiques et mettre en place des mesures de prévention si ces valeurs dépassaient les VA voir les VLE (9).

3. Décret Français :

La Directive Européenne a été transposée dans le droit français par le décret du 3 août 2016 (53) applicable à partir du 1^{er} janvier 2017. Ce décret se distingue de la Directive européenne en ce qui concerne l'exposition des salariées enceintes au CMS. La Directive Européenne recommande une « évaluation des risques individuelles » pour cette population alors que le décret français préconise que leur niveau d'exposition soit « aussi faible qu'il est raisonnablement possible » et précise que cette exposition ne devrait pas dépasser les VLE « public » soit 0,5mT. Il restreint donc indirectement le travail aux abords des IRM des salariées enceintes. D'autres pays tels que le Royaume-Uni (54), l'Australie (55), ou encore les Etats-

Unis (56) ont jugé les données existantes suffisantes pour autoriser l'accès à l'IRM à leur salariées enceintes quel que soit le terme de la grossesse pour installer le patient, réaliser une injection de produit de contraste, être à la console de traitement des images ou encore en cas d'urgence. Ils préconisent cependant qu'elles ne restent pas à proximité de l'IRM au cours de l'acquisition.

Tout comme la Directive Européenne, ce décret autorise un dépassement des VA et des VLE pour les effets sensoriels uniquement (section 8) lorsqu'aucune alternative n'existe et que ces dépassements sont temporaires. Cette dérogation s'applique donc notamment à l'IRM. Dans ce cas précis, l'employeur doit en informer le Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT) et le médecin du travail. De plus, les travailleurs doivent être avisés des effets transitoires de ces dépassements. Les éventuels symptômes que pourraient présenter les salariés devraient être signalés à leur médecin du travail. Ces effets s'ils se produisent sont sans danger pour le salarié mais peuvent altérer ses capacités à prodiguer des soins en sécurité au patient. Ce décret conserve (section 9) une partie dérogatoire spécifique à l'IRM. Il y autorise un dépassement des VLE et VA sensorielles et santé. L'employeur doit dans ce cas faire une demande d'autorisation de travail nominative auprès de la Direction Régionale de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités (DREETS).

4. Valeurs seuils :

a. Directive Européenne et décret Français :

Les VLE santé d'exposition au CMS ne devraient pas être dépassées afin d'éviter les effets sur le flux sanguin et le rythme cardiaque. Les VLE sensorielles d'exposition au CMS sont définies pour éviter les effets à type de vertiges, nausées, goûts métalliques dans la bouche ainsi que les SNP (57) (tableau 1).

Pour l'exposition à B_0 , les VLE sont identiques aux VA car le CMS incident n'est quasiment pas modifié par le corps humain. Donc la densité de flux magnétique statique B_0 mesurée à l'extérieur du corps humain est égale à celle à l'intérieur du corps humain (58).

Tableau 1 : VLE pour une induction magnétique externe (B_0) comprise entre 0Hz et 1Hz

	VLE RELATIVES AUX EFFETS SENSORIELS
Exposition tête et tronc	2T
Exposition localisée des membres	8T
	VLE RELATIVES AUX EFFETS SUR LA SANTE
Conditions de travail contrôlées	8T

Il est donc impossible pour des IRM dont le B_0 au centre est inférieur à 8T de dépasser les VLE santé et les VLE sensorielles pour l'exposition localisée des membres au CMS.

On parle de conditions de travail contrôlées lorsque l'exposition est temporaire et justifiée par la pratique, les salariés ont été formés et informés sur l'apparition d'effets indésirables et des mesures préventives sont prises par les opérateurs telles que le contrôle de leurs mouvements. On considère donc que le travail des MERM se fait dans des conditions de travail contrôlées.

b. ICNIRP :

La Directive Européenne et le décret français, rendent possible un dépassement des VLE sensorielles pour les salariés travaillant à proximité d'IRM. Donc l'exposition au CMS des MERM peut dépasser 2T et être à l'origine de symptômes. En 2014, l'ICNIRP a édité des recommandations complémentaires pour contrôler le mouvement dans un champ magnétique statique afin d'éviter ces situations (59). Dans des conditions de travail contrôlées, pour éviter les vertiges, il est donc recommandé de ne pas dépasser $2,7T \cdot s^{-1}$ (dB/dt) et $2T/3s$ ($\Delta B/t$). Le système vestibulaire qui est à l'origine de ces vertiges est stimulé de façon maximale à des niveaux inférieurs au seuil de stimulation nerveuse périphérique. Ce seuil de $2,7T \cdot s^{-1}$ permettrait donc également d'éviter les SNP lors de mouvements contrôlés dans le CMS.

V. Analyse de l'exposition au CMS :

1. Méthodes de mesure du CMS :

Le parlement européen a commandité une étude afin d'évaluer l'exposition des salariés aux champs magnétiques à proximité d'IRM (50). Publiée en 2008, cette étude utilise les relevés d'un teslamètre et des enregistrements vidéo des positions et mouvements des salariés pour modéliser l'exposition au CMS à proximité d'une IRM. Elle confirmait notamment la non-conformité de certaines tâches avec l'ancienne Directive de 2004. D'autres études ont utilisé des modélisations et simulations de tâches numériques pour l'évaluer (41,60–65). Cette méthode d'étude peut être utile afin de prévoir l'exposition la plus élevée possible (« pire cas ») d'une action et notamment lorsqu'elle est réalisée trop rarement pour être monitorée en temps réel. Elle permet également de calculer les courants induits par un mouvement dans le champ magnétique statique. Elle ne peut cependant pas estimer avec précision les variations d'exposition d'une journée à l'autre pour un même MERM et entre 2 MERM différents.

Un groupement d'experts mandaté par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini « l'étude des effets du CMS par des dispositifs à type d'exposimètres qui pourraient enregistrer le champ magnétique statique, les gradients de champ magnétique, la durée de l'exposition et dans la mesure du possible la vitesse de variation du champ due aux mouvements » comme une priorité élevée (66). Ils précisent que ces relevés pourraient servir à de futures études épidémiologiques afin de pallier le manque de données concernant les effets à long terme du CMS.

Des dispositifs commerciaux tels que des teslamètres et magnétomètres (THM1176 Metrolab, Suisse ; Holaday HI3550, holaday industries, inc., Etats-Unis) ont été utilisés pour évaluer les expositions individuelles de salariés au CMS, mais ils ont le désavantage d'être des objets de mesure encombrants et sont parfois reliés à une sonde par un câble ce qui peut gêner les mouvements des salariés.

Plusieurs dispositifs portables ont également été développés spécifiquement pour mesurer l'exposition au CMS des salariés travaillant à proximité d'une IRM : Talete System Magnetic Dosimeter (TSMD, Tecnorad, Italy) ; Queensland (67), DosIRM (68), Mr. Dose (Wave Instrument Pty Ltd, Australie). Aucun n'a cependant déjà été commercialisé à grande échelle. Le tableau 2 résume les caractéristiques des principales études de mesure de l'exposition au CMS à proximité d'IRM.

Tableau 2 : Caractéristiques des études d'évaluation du CMS à proximité d'IRM à l'aide de dispositifs portables individuels.

Auteur principal	Année	Dispositif	Types d'IRM	Nombres de personnes incluses	Nombre d'acquisitions	Conditions d'observations	Variables étudiées par les mesures du dosimètre
ACRI (69)	2018	TALETE	0,35 ; 1,5 et 3T	13	25	Conditions réelles et simulations de situations d'urgence	B ₀ , dB/dt
ANDREUC CETI (70)	2013	THM1176 METROLAB	1,5 et 3T	NC	9	Simulation de 8 actions	B ₀ , dB/dt
ANDREUC CETI (71)	2017	THM1176 METROLAB	1,5 ; 3 et 7T	3	55	Simulation de 25 actions	B ₀ , dB/dt, ΔB/3sec,
BATISTATOU (72)	2016	QUEENSLAND	1,5 et 3T	98	175	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt, dB/dt>2,7T.s ⁻¹
BONNELO (73)	2016	THM1176 METROLAB	1,5 T	9	39	Conditions réelles	B ₀
BRADLEY (74)	2007	HI 3550	0,6 ; 1,5 et 3T	19	91	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
DE VOCHT (75)	2009	Mr. DOSE	1 à 3T	10	22	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
DE VOCHT (20)	2015	QUEENSLAND	1,5 et 3T	104	166	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
DELMAS (76)	2017	DOSIRM	1,5 et 3T	18	123	Conditions réelles	B ₀
FATAHI (77)	2017	THM1176 METROLAB	3 et 7T	5	60	3 types d'actions simulées	B ₀ , dB/dt, ΔB/3sec, dB/dt>2,7T.s ⁻¹
FILICE (78)	2019	TALETE	3T	8	NC	Conditions réelles et 2 situations d'urgence simulées	B ₀ , dB/dT, ΔB/3sec,
FUENTES (79)	2008	QUEENSLAND	1,5 ; 2 et 4T	NC	30	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
GROEBNER (80)	2011	Capteur portable avec un câble développé par leurs soins	1,5 ; 3 et 7T	25	25	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
HARTWIG (81)	2020	Capteur portable développé par leurs soins et THM1176 METROLAB	3T	5	6	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt, ΔB/3sec, dB/dt>2,7T.s ⁻¹
SANNINO (65)	2017	TALETE et THM1176 METROLAB	1,5T	4	44	Conditions réelles	B ₀
SCHAAP (82)	2014	QUEENSLAND	0,2 à 11,7T	271	475	Conditions réelles	B ₀ , dB/dt
VAN NIEROP (83)	2015	QUEENSLAND	7T	30	90	Mouvements de têtes simulés à plusieurs distances	B ₀ , dB/dt
YAMAGUSHI (84)	2014	THM1176 METROLAB	3T	4	103	Conditions réelles	B ₀

Conditions réelles : signifie que la personne qui portait le dispositif a effectué son travail comme à son habitude sans qu'on lui impose certaines tâches.

Simulation : signifie que des tâches sont imposées au salarié pour évaluer leur impact en particulier

Aucune de ces études n'a évalué l'exposition au CMS à proximité d'une IRM sur plusieurs années.

2. Intérêt de mesurer l'exposition au CMS :

a. Pour tous les acteurs de la prévention des risques :

La mesure de l'exposition au champ magnétique statique des salariés qui travaillent à proximité d'IRM peut avoir plusieurs intérêts :

- Évaluer si leurs pratiques sont à l'origine de dépassements des VLE et VA réglementaires. Si des dépassements sont constatés, des mesures de prévention devraient être mises en place afin de limiter cette exposition. L'analyse des résultats avec les salariés pourrait leur être utile afin de connaître les mesures de prévention qui sont adaptées à leur pratique individuel.
- Si des symptômes étaient rapportés, il pourrait être intéressant de les corrélés à leur exposition individuelle pour les aider à les éviter en modifiant leurs pratiques.
- Ces données pourraient servir à long terme à des études rétrospectives portant sur les effets chroniques du champ magnétique statique qui n'ont pour le moment pas été démontrés.

b. Pour le médecin du travail :

Le rôle du médecin du travail est d' « éviter toute altération de la santé des travailleurs du fait de leur travail » (85).

Il assure ce rôle :

- A l'échelle individuelle : en s'assurant que l'état de santé de chaque salarié est compatible avec les risques professionnels auxquels il pourrait être exposé à son poste. Pour cela, il peut proposer des mesures d'aménagements individuels (restrictions, aménagement matériel, etc.).

- A l'échelle collective : il peut proposer des aménagements des locaux de travail afin de réduire le risque à la source. Il est conseiller de l'employeur dans le domaine de la prévention des risques.

Dans le cadre de l'exposition aux champs magnétiques de l'IRM, le médecin du travail a essentiellement un rôle à l'échelle individuelle. Les données d'exposition au champ magnétique statique pourraient donc lui être utiles afin d'adapter ses conseils de prévention à chaque salarié. Si un salarié lui rapportait des symptômes à proximité de l'IRM, le médecin du travail pourrait les corrélérer à l'exposition et les pratiques de ce salarié. Ces données pourraient également être utiles afin de s'assurer que l'exposition d'un salarié porteur d'un dispositif médical ne dépasse pas les valeurs préconisées par le fabricant.

c. Justification de l'étude :

Un dispositif portable de mesure du CMS a été créé au Centre Hospitalier Régional Universitaire (CHRU) de Nancy par le laboratoire « Imagerie Adaptative, Diagnostique, Interventionnelle » (IADI) sous le brevet Pasquier et al (68). Il a été utilisé dans une première étude réalisée sur des MERM travaillant à proximité d'IRM 1,5T et 3T du service de neuroradiologie du CHRU de Nancy ou il était appelé « DosIRM » (76). Il a également été proposé à des salariés d'un centre de recherche disposant d'un département de neuro-imagerie de le porter au quotidien lors de leurs activités à proximité d'IRM 3T et 7T à partir de 2016. Nous avons utilisé les données collectées entre 2016 et 2020, pour analyser de façon rétrospective l'exposition au CMS de ces salariés.

ARTICLE DE RECHERCHE

Évaluation de l'exposition au champ magnétique statique des manipulateurs en électroradiologie médicale d'un centre de recherche travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T à l'aide d'un dispositif portable

Assessment of occupational exposure to static magnetic field of radiographers from a research facility working in the vicinity of 3T and 7T MRI scanners with a portable magnetic monitoring device.

M. GIMBERT¹, M. DOYEN^{2,3}, N. WEBER², A. DELMAS^{2,4}, A. VIGNAUD⁵, I. FABRE⁶, C. GINISTY⁷, Y. LECOMTE⁷, V. BERLAND⁷, S. DESMIDT BECUWE⁸, S. ROGER⁷, J. FELBLINGER^{2,4}

¹ CHRU de Nancy, Université de Lorraine, Service de santé au travail, F-54000 Nancy, France

² IADI, INSERM-U1254, Université de Lorraine, CHRU de Nancy, F-54000 Nancy, France

³ CHRU de Nancy, Nancyclotep Imaging Platform, F-54000 Nancy, France

⁴ CIC-IT 1433, F-54000 Nancy, France

⁵ CEA, NeuroSpin, Université de Paris-Saclay, CNRS BAOBAB, F-91190 Gif-Sur-Yvette, France

⁶ CEA, Service de santé au travail, F-91190 Gif-Sur-Yvette, France

⁷ CEA, NeuroSpin, Université de Paris-Saclay, Unité INSERM UNIACT, F-91190 Gif-Sur-Yvette, France

⁸ CEA, NeuroSpin, Université de Paris-Saclay, Unité INSERM UNICOG, F-91190 Gif-Sur-Yvette, France

Nom du laboratoire : CIC-IT 1433, IADI, Unité INSERM U1254, Université de Lorraine, CHRU de Nancy, Rue du Morvan, F-54000 Nancy, France

Correspondance : GIMBERT Mathilde, Service de santé au travail, CHRU de Nancy, rue du Morvan, F-54000 Nancy, France, m.gimbert@chru-nancy.fr

MOTS CLÉS : Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), Exposition professionnelle, Champs Électromagnétiques, Évaluation des risques, France

RESUME

Introduction - Un appareil d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) émet de façon permanente un Champ Magnétique Statique (CMS), B_0 . La Directive Européenne 2013/35/UE, retranscrite dans le droit français avec le décret du 3 août 2016 restreint l'exposition des salariés au CMS à 2T. Elle permet cependant aux salariés formés qui travaillent à proximité d'une IRM de dépasser ce seuil. Un salarié qui se déplace dans un CMS génère un gradient de champ magnétique, dB/dt . L'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) recommande de ne pas atteindre une exposition à $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$ ou $\Delta B/3sec > 2T$ afin d'éviter la survenue de symptômes transitoires tels que des vertiges.

Méthode – Entre 2016 et 2020, 5 manipulateurs en électroradiologie médicale (MERM) travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T au sein du département de neuro-imagerie d'un centre de recherche ont porté un dispositif portable de mesure de l'exposition au CMS développé à Nancy. Les enregistrements ont été analysés afin de quantifier le nombre d'évènements correspondant à une exposition à $B_0 > 2T$, ainsi que le nombre de $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$ et de $\Delta B/3sec > 2T$. Le temps moyen passé par chaque MERM parmi les 5 catégories d'exposition suivantes a également été évalué : $[0,1T-0,5T[$; $[0,5T-1T[$; $[1T-1,5T[$; $[1,5T-2T[$; $> 2T$.

Résultats – Au total, 966 journées de port de l'exposimètre ont été évaluées correspondant à 1160,8 heures d'enregistrement dont environ 332 heures où l'exposition était supérieure à 0,1T. 111 évènements où l'exposition à B_0 était supérieure à 2T ont été identifiés. Un MERM a totalisé 80 évènements et a obtenu le B_0 le plus élevé de 2,67T. Seul un évènement était précédé d'un $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$. 14 évènements étaient suivis d'un $\Delta B/3sec > 2T$.

Conclusion - Ce dispositif pourrait aider les salariés qui travaillent à proximité d'IRM à contrôler leurs mouvements pour respecter les limites d'exposition recommandées par la Directive Européenne et ne pas expérimenter de symptômes au cours de leur travail.

ABSTRACT

Introduction - Magnetic Resonance Imaging (MRI) scanners permanently produce a Static Magnetic Field (SMF), B_0 . The European Directive 2013/35/EU, transposed into French law with the decree of August 3rd, 2016 restricts workers' exposure regarding the SMF to 2T. It does however allow trained employees working in the vicinity of MRI scanners to exceed this threshold. A worker moving in the SMF generates a motion-induced time-varying magnetic field, dB/dt. *The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) recommends not to reach an exposition to $\text{dB/dt} > 2.7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ or $\Delta B/3\text{sec} > 2\text{T}$ to avoid transient symptoms such as vertigo.

Method - Between 2016 and 2020, 5 radiographers working in the vicinity of a 3T and a 7T MRI scanners from the neuro-imaging department in an MRI research facility wore a portable magnetic monitoring device developed in Nancy. All recorded data were analyzed in order to quantify the number of events corresponding to an exposure to $B_0 > 2\text{T}$, and the number of $\text{dB/dt} > 2.7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ and $\Delta B/3\text{sec} > 2\text{T}$. The average time spent by each radiographers for the 5 following exposure categories was also assessed: [0.1T-0.5T]; [0.5T-1T]; [1T-1.5T]; [1.5T-2T]; >2T.

Results - In total, 966 shifts carrying the device were analyzed, corresponding to 1160.8 hours of recording, including approximately 332 hours with an exposure greater than 0.1T. 111 events with an exposure to $B_0 > 2\text{T}$ were identified. A radiographer totalized 80 events and was exposed to the higher B_0 of 2,67T. Only one event was preceded by a $\text{dB/dt} > 2.7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$. 14 events were followed by a $\Delta B/3\text{sec} > 2\text{T}$.

Conclusion - This device might help MRI workers control their movements in order to comply with the exposure threshold recommended by the European Directive and not experience symptoms during their work.

KEYWORDS: Magnetic Resonance Imaging (MRI), Occupational exposure, Electromagnetic fields, Risk assessment, France

INTRODUCTION

Les champs électromagnétiques dans le milieu du travail :

Dans le domaine industriel, les sources de champs électromagnétiques sont nombreuses et concernent toutes les gammes de fréquences [1] : les cuves à électrolyse pour la préparation industrielle d'aluminium produisent un Champ Magnétique Statique (CMS) de 0 Hz, les procédés de soudage par résistance génèrent des champs électromagnétiques très basses fréquences (50-60Hz) et certains fours industriels engendrent des micro-ondes de plusieurs GHz.

Dans le domaine médical, le CMS peut être utilisé pour traiter des dépressions résistantes à tout traitement avec la « Stimulation Magnétique Transcrânienne » et les ondes Radiofréquences (RF) peuvent traiter certains troubles du rythme cardiaque comme la fibrillation atriale [2].

Cet article traite de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) qui utilise les propriétés de résonance magnétique du proton de l'eau (^1H) pour produire des images du corps humain.

Principes de l'IRM :

Un appareil d'IRM émet plusieurs types de champs électromagnétiques :

- Un CMS : nommé B_0 , il est intense, permanent, s'exprime en Tesla (T), et décroît avec la distance. Un salarié qui se déplace à proximité d'une IRM sera donc exposé à un gradient de champ magnétique dont la valeur sera directement corrélée à sa vitesse de déplacement, ainsi qu'à sa position dans la salle d'examen. En effet, un blindage actif autour de la machine permet à B_0 d'être maximal au milieu du tunnel et de décroître très rapidement à sa sortie. D'autres IRM possèdent un blindage passif qui fait également décroître B_0 aux alentours mais de façon plus progressive. Pour un déplacement équivalent, le gradient de champ magnétique sera donc plus important à mesure que l'on s'approche du centre de l'aimant (position du patient).

- Des gradients de champ magnétique à l'intérieur de l'IRM : il s'agit de modifications locales (jusqu'à 80 mT/m) très brèves (quelques ms) et répétitives du champ magnétique. Ils ont une fréquence allant jusqu'à quelques dizaines de kHz. On les appelle également *gradients de position* car ils permettent de sélectionner les différentes coupes anatomiques qui seront imagées. Si le travailleur ne reste pas proche du tunnel de l'IRM pendant le temps de l'imagerie, celui-ci n'est pas exposé à ce gradient de champ magnétique appliqué pendant une séquence.
- Des ondes radiofréquences (RF) : nommées B_1 : produites par une antenne émettrice et analysées par une antenne réceptrice pour donner une image en contraste. L'IRM est placée dans une *cage de Faraday* afin d'éviter les interactions entre les RF utilisées pour l'imagerie et les RF présentes dans l'environnement (radiophonie, téléphonie etc.). La cage de Faraday autour de l'IRM est une zone dont l'accès est réservé au personnel formé. Comme pour les gradients de champ magnétique, ces ondes radiofréquences sont produites seulement pendant une séquence.

Exposition des salariés travaillant à proximité d'une IRM :

Les salariés qui peuvent s'approcher d'une IRM sont nombreux et leurs métiers variés : Manipulateurs en Electro-Radiologie Médicale (MERM), radiologues, chirurgiens, Infirmiers du Bloc Opératoire Diplômés d'Etat (IBODE), anesthésistes, Infirmiers Anesthésistes Diplômés d'Etat (IADE), Agents des Services Hospitaliers (ASH), mais aussi techniciens, agents de maintenance, ... En 2013, le nombre de salariés travaillant à proximité d'un appareil d'IRM était estimé à 100 000 en Europe et ce chiffre est en constante augmentation [3].

En dehors des situations d'urgence qui nécessitent de s'approcher de l'IRM pendant l'acquisition d'images, les MERM ne sont que rarement exposés aux gradients de champ magnétique et ondes RF émis (figure 1). B_0 est donc le champ auquel les MERM sont les plus exposés à proximité d'une IRM.

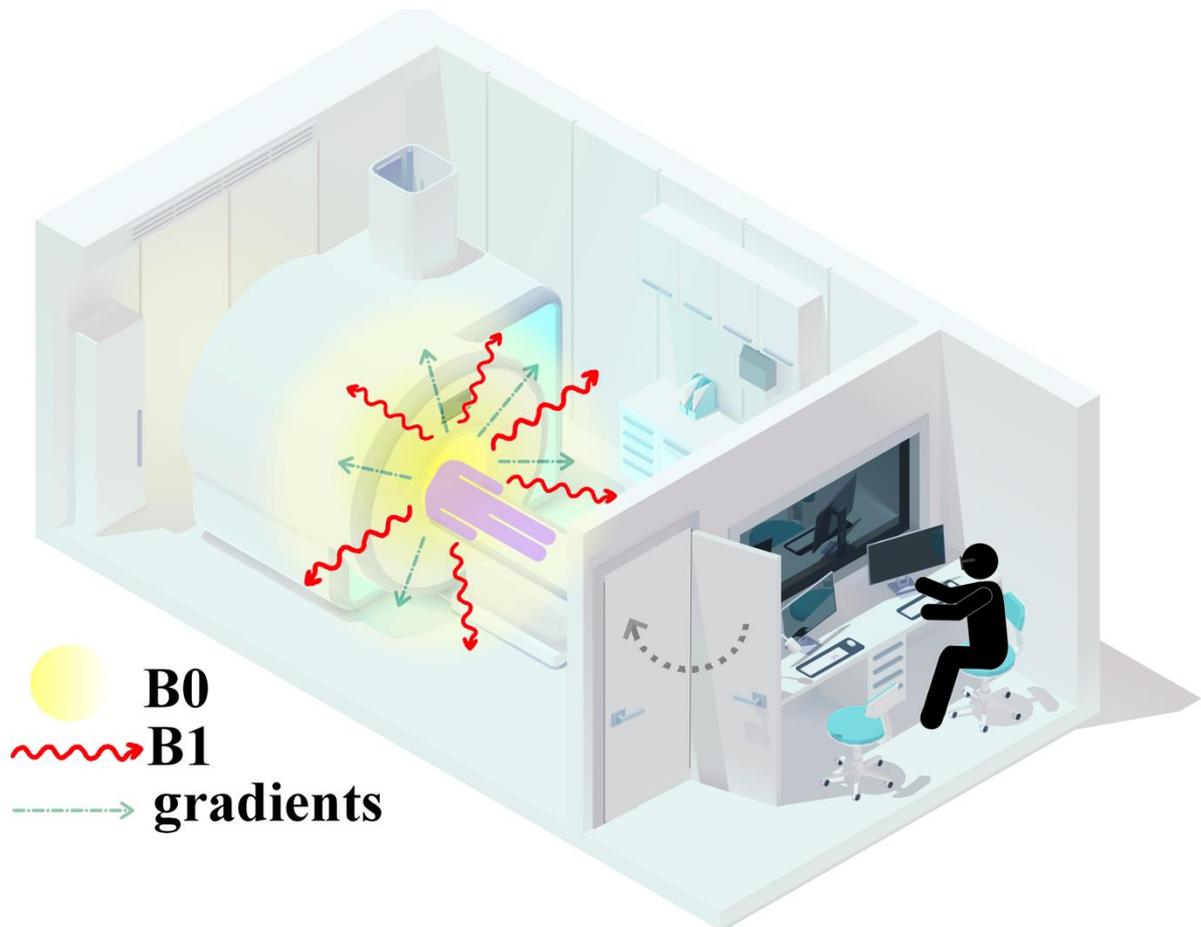


Figure 1 : Champs présents lors d'une acquisition d'image. Une fois la porte de la cage de Faraday fermée, le MERM est à sa console : il n'est exposé à aucun champ magnétique. B_0 est toujours présent à proximité de l'IRM. Lorsque le MERM lance l'acquisition, l'IRM produit B_1 et des gradients de champ magnétique

Effets de l'IRM sur le corps humain :

A ce jour, il n'a pas été prouvé ni infirmé d'effets à long terme ou cumulatifs du champ magnétique statique de l'IRM sur l'être humain.

Le CMS intense de l'IRM peut avoir des effets *indirects*, c'est-à-dire représenter un danger pour la personne qui s'approche d'une IRM car il a une force d'attraction sur les éléments ferromagnétiques à proximité de l'anneau et peut faire dysfonctionner des appareils électroniques. Ainsi, il est important d'évaluer les risques liés à une exposition au CMS chez

les salariés porteurs d'un dispositif médical ferromagnétique passif (prothèse, etc.) ou actif (pacemaker, pompe à insuline, etc.). B_0 peut également avoir des effets directs sur le corps humain. Ces effets sont transitoires et réversibles. On distingue :

- Les effets *sensoriels* : vertiges, nausées [4-7]. L'apparition d'un goût métallique dans la bouche [8] ainsi que des phosphènes (taches fictives dans le champ visuel) [9] ont également été décrits comme effets du CMS. Ces effets sont la plupart du temps causés par un déplacement ou des mouvements de tête du salarié dans B_0 et sont d'autant plus fréquents que ceux-ci sont rapides.
- Effets *pour la santé* : Il s'agirait d'une perturbation de la fonction cardiaque (telle qu'une dépolarisation cardiaque) ou d'une modification du flux sanguin mais ces effets n'ont pas été démontrés pour des inductions $< 8T$ [10] et $< 9,4T$ [9]. Le dB/dt engendré par les mouvements du salarié dans le CMS peut provoquer des Stimulations Nerveuses Périphériques (SNP) (fourmillements, picotements dans les extrémités) surtout si ces mouvements sont réalisés en présence de gradients de champ magnétique produits par l'IRM [11].

Prévention des risques :

Afin de prévenir ces effets, la Directive Européenne 2013/35/UE définit des Valeurs déclenchant l'Action (VA), mesurables à l'extérieur du corps humain, qui imposent des mesures de prévention si elles sont dépassées et des Valeurs Limites d'Exposition (VLE) induites à l'intérieur du corps humain et donc mesurables uniquement par simulation numérique, qui ne devraient pas être dépassées [12]. Les VA sont plus contraignantes que les VLE, de telle sorte que respecter les VA garantit donc le respect des VLE.

La Directive Européenne a été transposée dans le droit français par le décret du 3 août 2016 applicable à partir du 1^{er} janvier 2017 dans le code du travail [13].

Pour B_0 , les VLE sont identiques aux VA car le CMS incident n'est quasiment pas modifié par le corps humain (tableau 1). On parle de conditions de travail contrôlées lorsque l'exposition est temporaire et justifiée par la pratique, les salariés ont été formés et informés sur l'apparition d'effets indésirables et des mesures préventives sont prises par les opérateurs telles que le contrôle des mouvements. On considère donc que les MERM exercent leur travail dans des conditions contrôlées.

Tableau 1 : VLE pour une induction magnétique externe (B_0) comprise entre 0 Hz et 1 Hz

	VLE RELATIVES AUX EFFETS SENSORIELS
Exposition tête et tronc	2T
Exposition localisée des membres	8T
	VLE RELATIVES AUX EFFETS SUR LA SANTE
Conditions de travail contrôlées	8T

La section 8 du décret français (tout comme la Directive Européenne), autorise de façon dérogatoire pour l'IRM un dépassement des VA et des VLE pour les effets sensoriels.

Pour des IRM dont l'induction magnétique est de 3T ou 7T, il est donc possible et autorisé que les MERM dépassent les VLE relatives aux effets sensoriels pour l'exposition du tronc et de la tête. Ces effets s'ils se produisent sont sans danger pour le salarié mais peuvent altérer ses capacités à prodiguer des soins en sécurité au patient.

En 2014, l'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) a donc édité des recommandations complétant la Directive Européenne pour que les salariés travaillant à proximité d'IRM adaptent leurs mouvements dans un CMS [11]. Dans des conditions de travail contrôlées, pour éviter les vertiges, elles recommandent de ne pas dépasser $2,7T.s^{-1}$ (dB/dt) et $2T/3sec$ ($\Delta B/t$) (figure 2). Le système vestibulaire qui est à l'origine de ces vertiges serait stimulé de façon maximale à des niveaux inférieurs au seuil de SNP. Un $dB/dt < 2,7T.s^{-1}$ permettrait donc également d'éviter les SNP lors de mouvements dans le CMS.

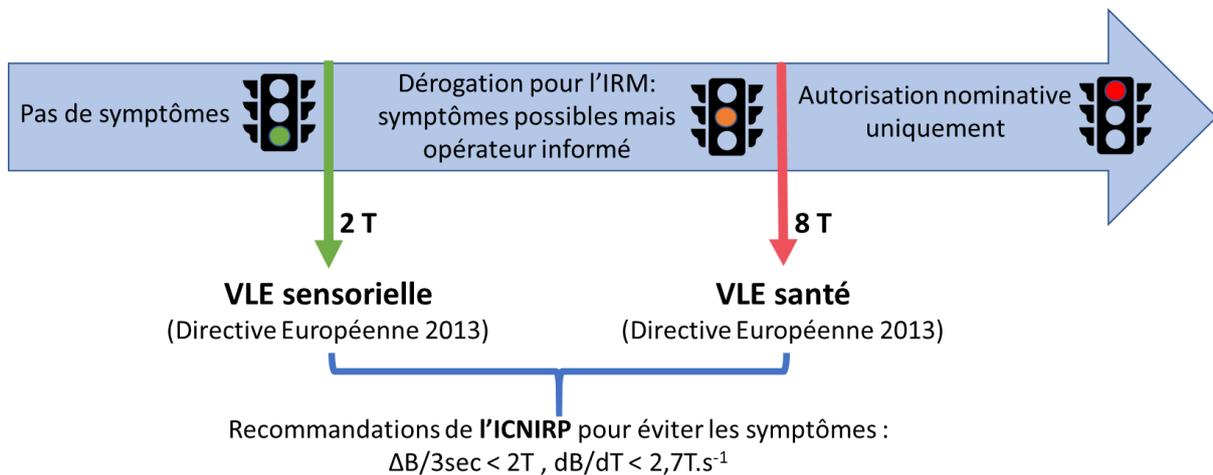


Figure 2 : Synthèse des recommandations d'exposition au CMS

Mesure du CMS :

L'exposition au CMS peut être modélisée et simulée de façon numérique [14–17]. Cette méthode ne permet cependant pas d'estimer avec précision les variations d'exposition d'une journée à l'autre pour un même MERM et entre deux MERM différents.

Des dispositifs commerciaux tels que des teslamètres et magnétomètres (THM1176 Metrolab, Suisse ; Holaday HI3550, Holaday industries, inc., Etats-Unis) ont été utilisés dans des études pour évaluer les expositions individuelles de salariés au CMS [18–22]. Ce sont des appareils de grande taille et parfois reliés à une sonde par un câble, qui ne peuvent donc pas être portés par les salariés de façon routinière.

D'autres études ont utilisé des dispositifs portables développés spécifiquement pour mesurer l'exposition au CMS des salariés travaillant à proximité d'une IRM. Le *Talete System Magnetic Dosimeter* (TSMD, Tecnorad, Italy) développé en Italie, est l'un de ces dispositifs porté par des salariés de centres d'IRM cliniques dans plusieurs études [14,23,24]. Le *Mr. Dose* (Wave Instrument Pty Ltd, Australie), développé aux Pays-Bas, a été utilisé dans une étude pour mesurer l'exposition au CMS des salariés de l'industrie des IRM [25]. Le *dosimètre du Queensland* développé en Australie, est celui qui a été utilisé dans le plus d'études de mesure

de l'exposition individuelle au CMS d'IRM cliniques et de recherche [26]. Parmi ces études, celle de Schaap et al. [27] a monitoré le plus de salariés (n=271) et a analysé le plus d'acquisitions (n=475). Aucune étude n'a réalisé une analyse de données d'exposition à l'aide d'un dispositif portable sur plusieurs années.

Ces dispositifs n'étant pour le moment pas commercialisés à grande échelle, un prototype semblable a été créé à Nancy [28]. Les étapes du développement de cet outil que nous nommerons *exposimètre* sont décrites dans une thèse [29] ainsi que plusieurs articles [30,31]. Il a été utilisé pour une première preuve de concept dans une étude qui étudiait l'exposition au CMS des MERM du service de neuroradiologie du CHRU de Nancy qui travaillaient à proximité d'IRM cliniques 1,5T et 3T [30].

Justification de l'étude :

En 2016, il a été proposé aux MERM d'un centre de recherche disposant d'IRM 3T et 7T de porter cet exposimètre à chaque fois qu'ils devaient travailler à proximité d'une IRM. Grâce à cela, nous disposons aujourd'hui d'un nombre important de données d'exposition au CMS de ces MERM. Dans cette étude, ces données ont été analysées avec pour objectif de mettre en avant l'intérêt de ce dispositif dans la prévention des risques liés au CMS à proximité d'IRM.

METHODE

Description de l'étude :

Il s'agit d'une étude rétrospective descriptive portant sur des données d'exposition au CMS de 5 MERM travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T dans un centre de recherche. L'analyse des données a portée sur une période allant du 5/10/2016 au 12/10/2020. À chaque début de vacation, les MERM choisissaient de porter le dispositif verticalement dans leur poche de blouse ou de l'attacher à une sangle portée autour du cou et sous leur blouse pour le maintenir. Il est nommé ici *acquisition* tout enregistrement de l'exposimètre déchargé sur ordinateur après une journée durant laquelle le MERM a travaillé au minimum une fois à proximité de l'IRM.

Caractéristiques de l'outil utilisé pour la mesure du CMS :

Le CHRU (Centre Hospitalier Régional Universitaire) de Nancy associé au laboratoire « Imagerie Adaptative, Diagnostique et Interventionnelle » (IADI) au sein de l'unité INSERM 1254 a développé un dispositif portable afin de mesurer l'exposition au champ magnétique statique des salariés qui travaillent à proximité d'IRM.

Il est constitué des composants suivants, tous compatibles avec les champs magnétiques présents à proximité d'une IRM [29] :

- Un capteur à effet Hall : grâce à trois magnétomètres montés orthogonalement dans les trois directions de l'espace. Ce capteur, pour mesurer l'induction magnétique, se base sur le fait qu'elle varie proportionnellement à la tension entrant et sortant de celui-ci.
- Un dispositif MPU-6000 : qui intègre un accéléromètre trois axes et un gyroscope trois axes permettant de caractériser les mouvements du MERM dans les trois directions de l'espace.
- Une carte Secure Digital (SD) et un microcontrôleur (AVR, Atmega 328p, Atmel, USA) : qui permettent d'enregistrer des données sur toute une journée de travail et de les transférer en fin de journée sur un ordinateur.

- Une batterie : rechargeable lorsque le dispositif est connecté avec un câble à un ordinateur (autonomie de 15h).

La correction de non-linéarité et non-orthogonalité initiale du capteur à effet Hall garantit en partie sa fiabilité de mesure [31].

Son poids (45g) et sa taille (50x40x20 mm) lui permettent de tenir dans une poche de blouse.

Une encoche supérieure permet d'y attacher une sangle (Figure 3).



Figure 3 : Photos de l'exposimètre :

Vue de l'accroche pour sangle ; vue du port de chargement, bouton d'allumage, port d'insertion de la carte SD ; vue intérieure.

Population :

Cet exposimètre a été proposé à 5 MERM (dont 4 femmes et 1 homme) d'un centre de recherche en 2016. Il leur a été suggéré de le porter à chaque vacation d'IRM, donc en conditions réelles de travail. Les MERM 1 et 2 ne travaillaient plus à proximité d'IRM à partir de 2019 et les MERM 4 et 5 ont commencé à travailler dans ce centre en 2019.

Caractéristiques du lieu d'étude et des examens pratiqués :

Le centre de recherche dans lequel a été réalisée cette étude dispose d'un département spécialisé dans la recherche en neurosciences. Dans le cadre de protocoles de recherche clinique, il pratique des IRM cérébrales sur des patients ou volontaires sains. Il dispose pour cela d'une IRM 3T (Magnetom Prisma^{fit} 3T, Siemens Healthineers, Allemagne) à blindage actif et d'une IRM 7T (Magnetom 7T Investigative Device, Siemens Healthineers, Allemagne) à blindage passif.

La durée moyenne d'un examen d'IRM dans ce centre de recherche est de 1h30 à 2h et comprend :

- L'installation du patient sur la table, l'installation de l'antenne puis le déplacement de la table dans l'anneau de l'IRM (à la force des bras jusqu'en décembre 2017 pour l'IRM 7T ou motorisée pour les autres situations) (figure 4).
- L'acquisition des images durant laquelle le MERM est à la console de commande.
- Le changement éventuel d'antenne entre les acquisitions d'images.
- A la fin des acquisitions : la sortie du patient du tunnel, et son accompagnement vers la sortie de la salle.
- D'éventuels aléas : replacer un capteur, rassurer un patient, etc.

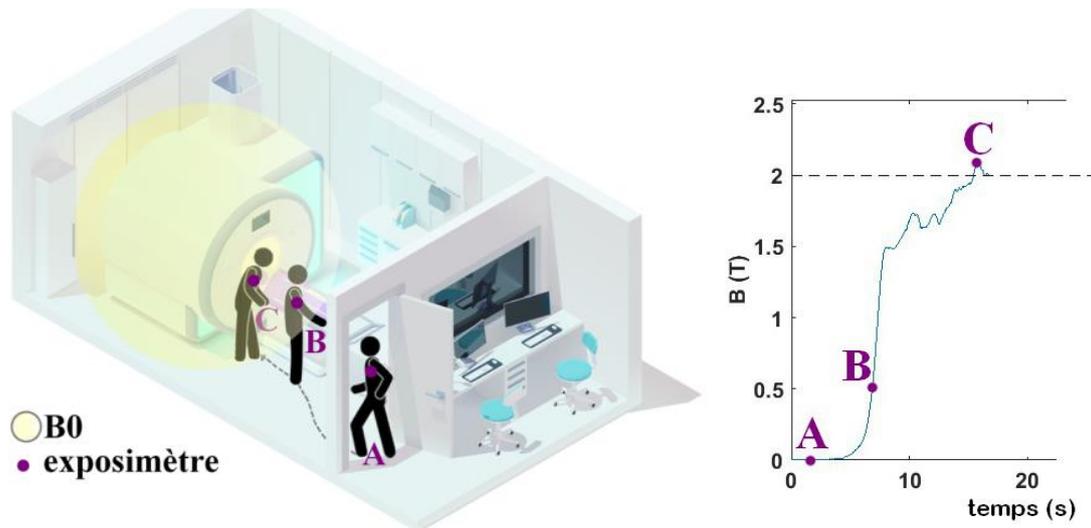


Figure 4 : Simulation des déplacements correspondant à une courbe d'exposition à B_0 en fonction du temps extraite des données de l'exposimètre du MERM 2

Il n'y avait pas d'injection de produit de contraste pour ces acquisitions durant la période étudiée. En dehors de possibles situations d'urgence qui nécessiteraient d'intervenir durant une séquence d'acquisition des images, les MERM ne sont exposés qu'à B_0 et au dB/dt lié à un déplacement dans B_0 .

Méthode d'analyse des données :

Les données ont tout d'abord été observées via une interface graphique développée spécifiquement pour cette étude avec un script *Python*.

Le logiciel Matlab (MathWorks, Natick, MA, USA) a été utilisé ensuite pour l'analyse chiffrée des données.

Variables étudiées :

La moyenne de temps passée par chaque MERM en fonction du $|B_0|$ mesuré par l'exposimètre a été reportée selon les intervalles d'exposition suivants :

- $[0,1T-0,5T[$
- $[0,5T-1T[$

- $[1T-1,5T[$
- $[1,5T-2T[$
- $> 2T$

Nous avons également analysé les expositions qui dépassaient $2T$, seuil fixé par la Directive 2013/35/UE pour prévenir des effets sensoriels. Nous avons nommé *évènement* toute situation correspondant à $|B_0| > 2T$. Nous avons considéré la fin de l'évènement lorsque $|B_0|$ après dépassement des $2T$ avait atteint une valeur $< 0,5T$ (soit 25% du seuil de dépassement) (figure 5). Nous avons nommé *proportion d'évènements*, le rapport du nombre d'évènements sur le nombre d'acquisitions multiplié par 100.

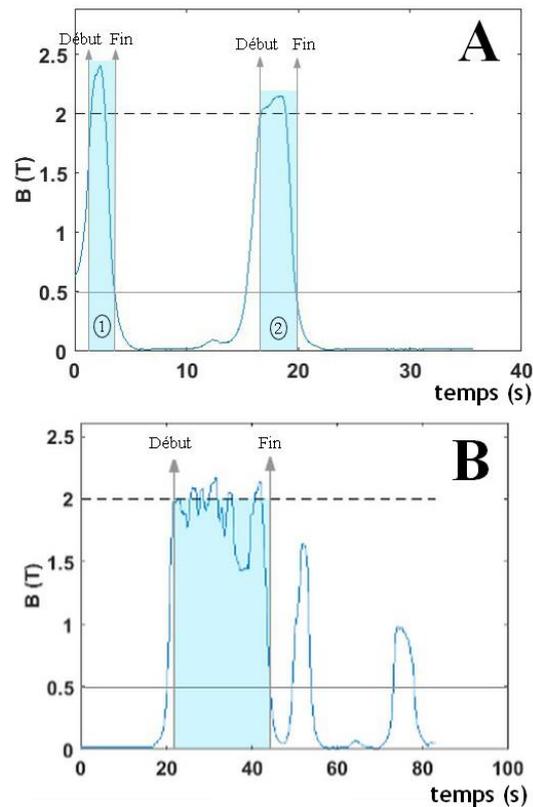


Figure 5 :

A : Exemple d'une acquisition comportant plusieurs évènements : B_0 revient deux fois sous $0,5T$ après avoir atteint $2T$, nous considérons donc 2 évènements.

B : Exemple d'un évènement unique avec oscillation autour de la ligne des $2T$: même si B_0 oscille autour de la ligne de $2T$ nous n'avons considéré qu'un seul évènement car B_0 ne redescend qu'une seule fois sous $0,5T$ après avoir atteint $2T$.

En tenant compte des recommandations de l'ICNIRP, nous avons également recensé les situations suivantes :

- $|\Delta B/t| > 2T/3\text{sec}$, durant les 30 secondes précédant et suivant l'évènement : pouvant engendrer des vertiges
- $|dB/dt| > 2,7 \text{ T}\cdot\text{s}^{-1}$, durant les 30 secondes précédant et suivant l'évènement : pouvant engendrer des vertiges et des SNP. $|dB/dt|$ a été calculé en dérivant $|B_0|$ par rapport au temps.

RESULTATS

Recueil de données :

Du 5/10/2016 au 12/10/2020, les 5 MERM ont totalisé 1010 acquisitions. Nous avons exclu d'emblée les fichiers *corrompus* dont l'ensemble des données étaient illisibles ou impossibles à ouvrir. Parmi les autres fichiers, nous avons choisi d'exclure de notre étude ceux qui présentaient des *données non conformes* (échelles de temps anormales) ou aberrantes (dB/dt extrêmement élevé). Les données des fichiers restants ont été considérées comme fiables et exploitables et ont été analysées (figure 6).

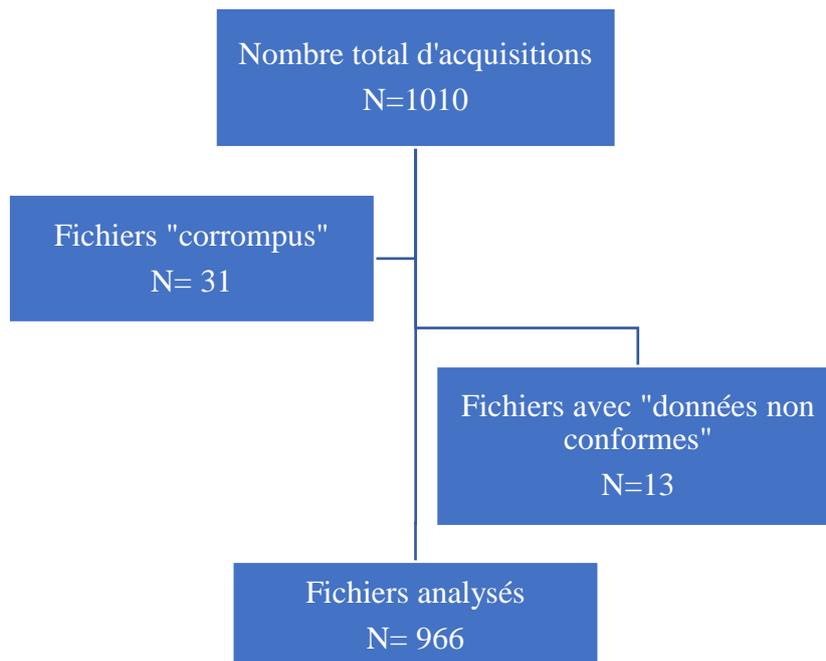


Figure 6 : Organigramme des données analysées

Au total, nous avons analysé 1160 heures 48 minutes et 18 secondes d'enregistrements dont 332 heures 12 minutes et 34 secondes où l'exposition était $> 0,1$ T (figure 7) (tableau 2).

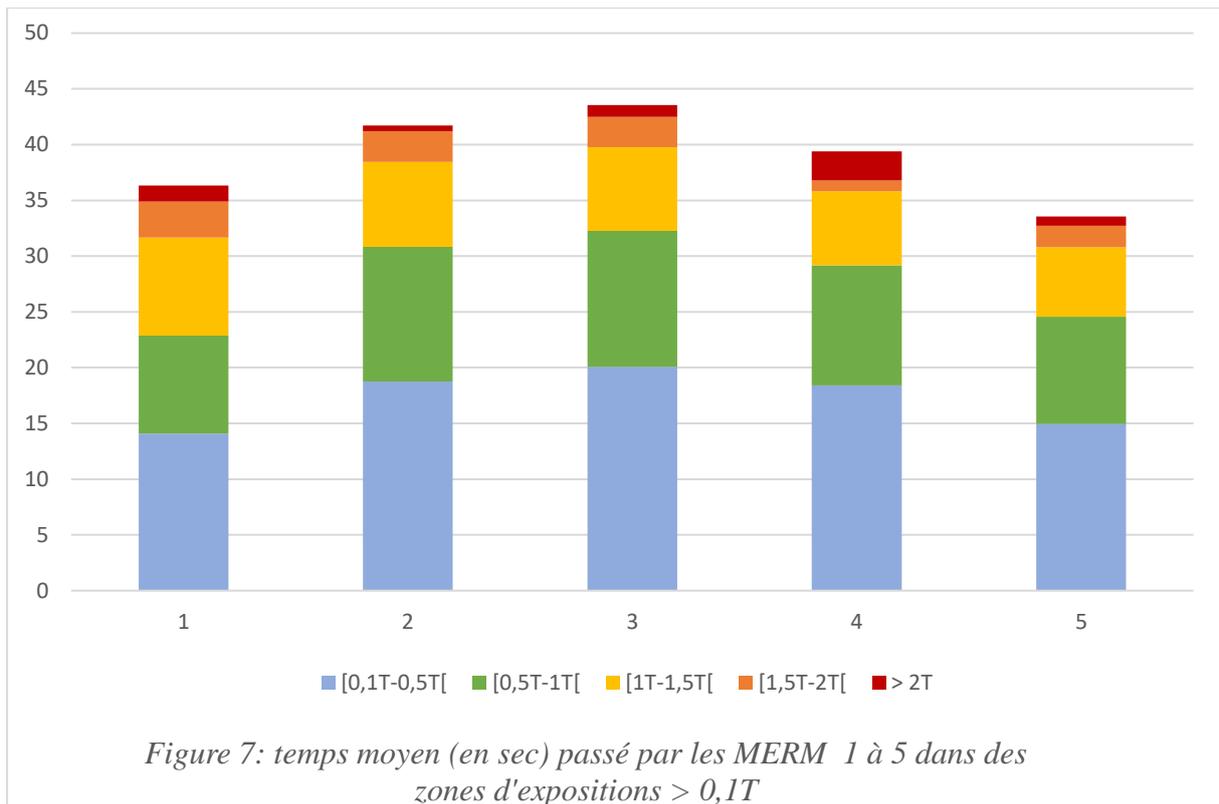


Tableau 2 : valeurs maximales de B_0 et dB/dt sur l'ensemble des acquisitions (durant les évènements et hors évènements)

	B_{0max} (en T)	dB/dt max (en $T.s^{-1}$)
MERM 1	2,67	2,75
MERM 2	2,01	1,84
MERM 3	2,29	2,81
MERM 4	2,56	1,52
MERM 5	2,26	5,87

Nous avons recensé 111 évènements pour l'ensemble des MERM répartis sur 69 journées d'enregistrement (tableau 3).

Tableau 3 : nombre d'acquisitions et d'évènements par MERM et par année

		2016	2017	2018	2019	2020	TOTAL
MERM 1	Nombre d'évènements	7	59	14			80
	Nombre d'acquisitions	26	74	66			166
	Proportion d'évènements	26,92	79,73	21,21			48,19
MERM 2	Nombre d'évènements	0	1	0			1
	Nombre d'acquisitions	9	77	27			113
	Proportion d'évènements	0	1,30	0			0,88
MERM 3	Nombre d'évènements	4	5	3	2	4	18
	Nombre d'acquisitions	28	97	77	75	52	329
	Proportion d'évènements	14,29	5,15	3,90	2,67	7,69	5,47
MERM 4	Nombre d'évènements				1	0	1
	Nombre d'acquisitions				92	55	147
	Proportion d'évènements				1,09	0	0,68
MERM 5	Nombre d'évènements				1	10	11
	Nombre d'acquisitions				120	91	211
	Proportion d'évènements				0,83	10,99	5,21
Proportion d'évènements par année pour tous les MERM		17,46	26,21	10,00	1,39	7,07	11,49

En raison de la crise sanitaire liée au Covid-19, le MERM 3 n'a réalisé aucune acquisition entre le 13 mars 2020 et le 15 juin 2020. Le MERM 4 n'a pas réalisé d'acquisitions entre le 17 mars 2020 et le 16 juin 2020 et le MERM 5 entre le 7 mars 2020 et le 9 mai 2020. Un seul évènement parmi ceux de 2020 a eu lieu avant l'interruption liée à la pandémie, le 17 février 2020 chez le MERM 5.

Dans les 30 secondes précédant un évènement, seul le MERM 1 a présenté un $\text{dB}/\text{dt} > 2,7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$, avec une valeur de $2,75 \text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ mais aucun n'a présenté un $\Delta\text{B}/3 \text{ sec} > 2\text{T}$. Aucun MERM n'a présenté un $\text{dB}/\text{dt} > 2,7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les 30 secondes après un évènement mais le MERM 1 a présenté des $\Delta\text{B}/3\text{sec} > 2\text{T}$ (n=14) dans cet intervalle.

Les dépassements $> 2,7\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ sur l'ensemble des enregistrements (durant et hors évènement) concernaient les MERM 1 (n=1), 3 (n=1) et 5 (n=10).

Seul le MERM 1 a présenté des $\Delta\text{B}/3\text{sec} > 2\text{T}$ (n=22) hors évènement répartis sur 9 jours différents.

DISCUSSION

Sur l'ensemble des fichiers analysés les MERM de cette étude ont totalisé 111 évènements où l'exposition était supérieure à 2T. Chaque MERM a présenté au minimum 1 évènement. Le nombre d'évènements constatés pour l'ensemble des MERM varie au cours des années.

En 2018, la proportion d'évènements a diminué de plus de la moitié par rapport à 2017 (de 26,21% à 10% des acquisitions). Il s'agit également de l'année où la table a été motorisée pour l'IRM 7T. Ce changement a probablement facilité le travail des MERM en limitant les mouvements supplémentaires nécessaires afin d'insérer ou sortir la table sur laquelle se trouve le patient dans l'IRM.

Il a été constaté à l'inverse une augmentation de la proportion d'évènements en 2020, année marquée par la pandémie de Covid-19 (1,39% en 2019 à 7,07% en 2020). Cette différence est même d'autant plus importante si l'on compare les acquisitions réalisées uniquement à partir du 13 mars, date du premier confinement en 2020 (1,39% du 14 mars au 31 décembre 2019 à 9,03% du 14 mars au 31 décembre 2020). Après une période d'arrêt de leur activité durant le confinement de mars à mai 2020, les MERM du centre ont repris leur activité de recherche avec des procédures de désinfection des IRM plus fréquentes du fait de la situation sanitaire. Afin d'atteindre le centre de l'IRM avec leur balai amagnétique, les MERM pourraient avoir besoin de pencher leur tronc et leur tête plus proche du centre de l'IRM. Ce mouvement pourrait donc être responsable de valeurs d'exposition plus importantes – et donc de symptômes - dues à une difficulté à adapter leurs mouvements lors des fréquentes procédures de désinfection. Une étude avait déjà pu montrer une fréquence plus élevée de symptômes transitoires au moment du nettoyage des IRM [7]. Une autre étude allait également dans le sens de cette hypothèse et proposait l'utilisation du « SIR HELMET », heaume de protection au-dessus de la tête du patient qui limiterait l'émission de particules virales à l'intérieur de l'anneau [32]. Ainsi seul le heaume de protection nécessiterait d'être nettoyé entre chaque acquisition, cette tâche pouvant

notamment être effectuée à distance du CMS. Des études comparatives de l'exposition au CMS dans des centres réalisant plus d'acquisitions et donc plus de désinfections entre chacune d'entre elles pourraient être intéressantes.

Dans ce département de recherche, plusieurs facteurs pourraient être responsables d'une exposition moindre des MERM au CMS par rapport à ceux d'un service d'imagerie classique. Les patients du centre étaient pour la plupart assez autonomes pour se mouvoir et s'installer sur la table seuls mais il pourrait être moins aisé de contrôler ses mouvements lorsqu'il s'agit d'installer un patient dépendant. De plus, les acquisitions y sont longues. Le temps moyen d'une acquisition en dehors du domaine de la recherche pour une imagerie cérébrale est de 15 à 30 minutes. Donc sur une journée de travail les MERM de cette étude passent plus de temps à la console et réalisent moins d'exams d'IRM que les salariés des centres d'imagerie. Ils sont donc moins souvent exposés au CMS ce qui diminue la probabilité d'évènements. Des études notaient une augmentation statistiquement significative de ce que nous avons nommé *évènement* chez les personnes réalisant des injections de produit de contraste [33,34]. Or, aucune injection de produit de contraste n'était réalisée dans ce département de neuro-imagerie au cours de la période étudiée.

A l'échelle inter-individuelle, les résultats ont pu être biaisés par le côté de la poche dans lequel a été porté l'exposimètre. En effet, ce dernier peut se retrouver du côté du torse le plus éloigné du tunnel durant certaines tâches et donc engendrer une sous-estimation de l'exposition de l'autre côté du torse (et inversement). Pour éviter ce biais, il pourrait être utile de définir une position standardisée de port de l'exposimètre tenant compte de la morphologie de chaque personne.

Notre étude inclut certes un faible nombre de participants mais analyser l'exposition au CMS d'une catégorie de salariés exécutant tous le même type de tâche est intéressant pour mettre en évidence une différence de pratiques et donc d'exposition d'un MERM à l'autre.

Nous n'avons cependant pas séparé les expositions à l'IRM 3T ou 7T car nous ne disposions pas de ces informations dans nos données rétrospectives. Des études ont montré une augmentation significative de la valeur maximale moyenne enregistrée de B_0 pour des IRM à inductions magnétiques plus élevées [25,33,35,36] et à blindage passif [33,35]. Une étude réalisée à proximité d'IRM 1,5T et 3T avec le même exposimètre que celui de notre étude ne montrait qu'un seul évènement pour 123 acquisitions (soit une proportion d'évènements de 0,81%) [67]. La proportion d'évènements constatée dans notre étude étant largement supérieure à celle-ci, nous pouvons donc supposer que la plupart des expositions de plus de 2T ont eu lieu à proximité de la machine à 7T.

Dans nos résultats, nous avons constaté que le MERM 1 avait un nombre important d'évènements correspondant à une exposition $> 2T$ ($n=80$). On constate d'ailleurs à son départ en 2019, que la proportion d'évènements par rapport au nombre total d'acquisitions par année passe de 10% en 2018 à 1,39% en 2019. Lors d'une analyse intermédiaire des résultats, nous avons déjà constaté cette propension au dépassement chez ce MERM. Les exposimètres étaient chacun nominatifs. Nous avons donc cherché à éliminer une anomalie de mesure de l'exposimètre en faisant porter celui du MERM 1 aux autres MERM. Nous n'avons alors pas constaté d'augmentation du nombre d'évènements chez les MERM portant l'exposimètre du MERM 1. De plus, lors du développement de cet outil, une méthode de correction de la non-orthogonalité a été définie et validée afin de contrôler les exposimètres défectueux d'emblée où qui le seraient devenus au fur et à mesure des ports répétés [29,31].

Au moment de prendre leur poste, les MERM du centre de recherche sont déjà préalablement formés à l'IRM. Nous pourrions penser que la personne qui a eu beaucoup d'évènements manquait d'expérience pour contrôler ses mouvements ou se positionner proche du tunnel. Cependant les MERM 4 et 5 n'ont pas présenté de multiples évènements et ce même juste après

leur arrivée au centre de recherche en mars 2019 (n=1 pour le MERM 4 et n = 1 pour le MERM 5).

Il aurait été intéressant de corréler le nombre de dépassements à la taille des MERM. Une étude a montré une association statistiquement significative entre la taille du MERM et la valeur maximale de B_0 mesurée individuellement par un exposimètre [33]. En effet dans cette dernière étude, il est constaté une diminution de l'exposition de 1% pour chaque cm de taille supplémentaire. Dans le même sens, Trakic et al. [37] proposait de baisser la hauteur de l'entrée du tunnel d'IRM afin d'éloigner le torse et la tête des MERM de l'entrée du tunnel et diminuer leur exposition. Ces études suggèrent donc que le MERM qui a eu le plus de dépassement était probablement plus petit que les autres.

Le MERM 1 a réalisé des mouvements qui selon les définitions de l'ICNIRP auraient pu être responsables de symptômes tels qu'un $\Delta B/3\text{sec} > 2T$ ou un $\text{dB}/\text{dt} > 2,7T \cdot \text{s}^{-1}$ autour d'un évènement. Le fait que certains MERM aient présenté des évènements sans $\text{dB}/\text{dt} > 2,7T \cdot \text{s}^{-1}$ ni $\Delta B/3\text{sec} > 2T$ dans les 30 secondes avant ou après pourrait signifier que ces MERM se déplacent lentement à proximité du tunnel et donc de l'endroit où l'exposition atteint $2T$: un mouvement minime entraînerait ensuite un dépassement de cette valeur.

Nous avons évalué les données d'exposition au CMS des MERM d'un département de recherche en neuro-imagerie sur une période de 4 ans. A notre connaissance, il s'agit la première étude réalisée avec un dispositif portable sur une durée aussi longue. Le nombre de données analysées pour chaque personne incluse est également inédit et pourrait donc avoir un intérêt pour des études épidémiologiques comme le suggérait une étude commanditée par le parlement européen [38]. De nombreuses études d'évaluation de l'exposition au CMS ont été réalisées à l'aide de magnétomètres déjà existants, mais ils peuvent être encombrants ou reliés à des câbles et ainsi gêner le mouvement des salariés en conditions réelles. Le dispositif utilisé

dans notre étude a été créé dans le but d'être utilisé facilement à grande échelle, afin de généraliser son utilisation.

La Directive Européenne autorise les MERM qui travaillent à proximité d'IRM à dépasser les VLE sensorielles. Tenant compte de cela, nous avons proposé dans notre étude, une évaluation de l'exposition au CMS en fonction des valeurs limites données par la Directive Européenne et de celles proposées par l'ICNIRP au-delà desquelles les MERM auraient pu expérimenter des symptômes susceptibles de perturber leur travail. L'utilisation de notre outil de mesure portatif a donc pour objectif principal de permettre aux MERM d'analyser leurs mouvements et éviter ceux qui pourraient donner lieu à une exposition au CMS assez importante pour générer des symptômes.

Actuellement les IRM 1,5 et 3T sont majoritaires dans le domaine de la clinique humaine. Les IRM 7T, utilisées pour le moment surtout à des fins de recherche, seront amenées à se développer à plus grande échelle. Notre dispositif pourrait donc aider les salariés non familiers de ce type d'IRM à contrôler leurs mouvements pour travailler en sécurité dans cet environnement.

Dans ce centre de recherche, le dispositif remplit déjà cet objectif puisque lorsque les MERM transfèrent leurs données sur leur poste informatique, ils peuvent afficher les courbes de leur exposition au CMS en termes de B_0 , constater les dépassements $> 2T$ en fonction du moment de la journée et s'interroger sur les raisons de ces dépassements pour adapter leurs pratiques. On pourrait supposer que la décroissance progressive de la proportion d'événements entre 2017 et 2019 peut être liée à une adaptation des pratiques des MERM grâce à l'utilisation de cet outil. Notre exposimètre étant doté d'un accéléromètre et d'un gyroscope, il serait possible d'analyser les mouvements d'un salarié qui aurait dépassé un certain seuil d'exposition ou ressenti un symptôme. Pour cela des modèles de mouvements associés à chaque tâche pourraient être

définis afin d'associer un dépassement ou un symptôme à un mouvement. Une analyse approfondie de ces modèles fera l'objet d'une future étude.

Enfin, la présence d'un responsable sécurité spécifique à l'IRM est demandée dans le code du travail [39] et décrite dans un article rédigé par un groupe de travail de société savantes européennes [40]. Ce responsable sécurité devrait avoir pour rôle de contrôler et mettre à jour les bonnes pratiques de sécurité et assurer le suivi des salariés en termes d'exposition, de formation et d'information. Cette fonction pourrait être tenue par un MERM formé. L'exposimètre de cette étude pourrait les aider dans leurs missions.

CONCLUSION

Nous avons proposé aux MERM d'un centre de recherche de porter sur eux un dispositif portable pour mesurer leur exposition au CMS des IRM 3T et 7T autour desquelles ils travaillaient. L'analyse des données de 2016 à 2020 a montré des valeurs de B_0 , dB/dt et $\Delta B/3\text{sec}$ variables dans le temps et d'un MERM à l'autre. Certaines des valeurs auraient pu être à l'origine de symptômes au moment où elles ont été enregistrées. Au quotidien, les données recueillies par cet outil par les salariés qui l'ont porté ou une personne formée spécifiquement, pourrait aider toute personne travaillant à proximité d'une IRM à adapter ses pratiques afin de respecter les valeurs limites d'exposition imposées par la Directive Européenne et ne pas expérimenter de symptômes. Les médecins du travail pourraient également se servir des données de cet outil afin de prodiguer des conseils de prévention adaptés à chaque salarié et conseiller l'employeur de ceux-ci.

Remerciements : Les auteurs remercient Lionel ALLEROL et Lucie HERTZ-PANNIER pour avoir autorisé cette étude et aidé à sa réalisation, ainsi que le programme ERPT de la fondation Leducq au travers du projet NEUROVASC 7T. Ils remercient également le F.E.D.E.R. et la région Grand-Est pour leur soutien financier.

Déclaration de lien d'intérêts : Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflit d'intérêt en relation avec cet article.

REFERENCES

- [1] DEMARET P. Les sources de rayonnement électromagnétiques industriels. Colloque de l'INRS : rayonnements optiques & électromagnétiques au travail 20-22 octobre 2015; Paris. Hors-série Hygiène & sécurité du travail, HST ; 2016. 32-6.
- [2] Innover avec les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA/NIEAW) Conditions d'un développement dynamique et sûr en France. [En ligne]. 2020 [cité le 12 avril 2022]. Disponible: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/ondes-usages-emergents.pdf
- [3] Hansson Mild K, Hand J, Hietanen M, Gowland P, Karpowicz J, Keevil S, et al. Exposure classification of MRI workers in epidemiological studies. *Bioelectromagnetics*. janv 2013;34(1):81-4.
- [4] Schaap K, Portengen L, Kromhout H. Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers. *Occup Environ Med*. mars 2016;73(3):161-6.
- [5] Glover PM, Cavin I, Qian W, Bowtell R, Gowland PA. Magnetic-field-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics*. juill 2007;28(5):349-61.
- [6] Mian OS, Li Y, Antunes A, Glover PM, Day BL. On the vertigo due to static magnetic fields. *PloS One*. 2013;8(10):e78748.
- [7] de Vocht F, Batistatou E, Mölter A, Kromhout H, Schaap K, van Tongeren M, et al. Transient health symptoms of MRI staff working with 1.5 and 3.0 Tesla scanners in the UK. *Eur Radiol*. sept 2015;25(9):2718-26.
- [8] Cavin ID, Glover PM, Bowtell RW, Gowland PA. Thresholds for perceiving metallic taste at high magnetic field. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1357-61.
- [9] Atkinson IC, Renteria L, Burd H, Pliskin NH, Thulborn KR. Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1222-7.

- [10] Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H, Young DC. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 Tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging JMRI*. sept 2003;18(3):346-52.
- [11] ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields below 1 Hz. *Health Phys*. mars 2014;106(3):418-25.
- [12] DIRECTIVE 2013/35/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE.
- [13] Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.
- [14] Sannino A, Romeo S, Scarfi MR, Massa R, d'Angelo R, Petrillo A, et al. Exposure Assessment and Biomonitoring of Workers in Magnetic Resonance Environment: An Exploratory Study. *Front Public Health*. 2017;5:344.
- [15] Fuentes MA, Trakic A, Wilson SJ, Crozier S. Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Trans Biomed Eng*. avr 2008;55(4):1355-64.
- [16.] Laakso I, Kännälä S, Jokela K. Computational dosimetry of induced electric fields during realistic movements in the vicinity of a 3 T MRI scanner. *Phys Med Biol*. 21 avr 2013;58(8):2625-40.
- [17] Gurrera D, Gallias KK, Spanò M, Abbate BF, D'Alia F, Iacoviello G, et al. Moving across the static magnetic field of a 1.5 T MRI scanner: Analysing compliance with Directive 2013/35/EU. *Phys Medica PM Int J Devoted Appl Phys Med Biol Off J Ital Assoc Biomed Phys AIFB*. janv 2019;57:238-44.
- [18] Andreuccetti D, Biagi L, Burriesci G, Cannatà V, Contessa GM, Falsaperla R, et al. Occupational exposure in MR facilities due to movements in the static magnetic field. *Med Phys*. nov 2017;44(11):5988-96.

- [19] Fatahi M, Karpowicz J, Gryz K, Fattahi A, Rose G, Speck O. Evaluation of exposure to (ultra) high static magnetic fields during activities around human MRI scanners. *Magma* N Y N. juin 2017;30(3):255-64.
- [20] Bradley JK, Nyekiova M, Price DL, Lopez LD, Crawley T. Occupational exposure to static and time-varying gradient magnetic fields in MR units. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1204-9.
- [21] Riches SF, Collins DJ, Charles-Edwards GD, Shafford JC, Cole J, Keevil SF, et al. Measurements of occupational exposure to switched gradient and spatially-varying magnetic fields in areas adjacent to 1.5 T clinical MRI systems. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1346-52.
- [22] Yamaguchi-Sekino S, Nakai T, Imai S, Izawa S, Okuno T. Occupational exposure levels of static magnetic field during routine MRI examination in 3T MR system. *Bioelectromagnetics*. janv 2014;35(1):70-5.
- [23] Acri G, Testagrossa B, Causa F, Tripepi MG, Vermiglio G, Novario R, et al. Evaluation of occupational exposure in magnetic resonance sites. *Radiol Med (Torino)*. mars 2014;119(3):208-13.
- [24] Filice S, Rossi R, Crisi G. ASSESSMENT OF MOVEMENT-INDUCED TIME-VARYING MAGNETIC FIELDS EXPOSURE IN MAGNETIC RESONANCE IMAGING BY A COMMERCIAL PORTABLE MAGNETOMETER. *Radiat Prot Dosimetry*. 31 déc 2019;185(3):326-30.
- [25] de Vocht F, Muller F, Engels H, Kromhout H. Personal exposure to static and time-varying magnetic fields during MRI system test procedures. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2009;30(5):1223-8.
- [26] Crozier S, James Wilson S, Ian G. Magnetic field dosimeter, us 7936168 b2. Classification aux États-Unis 324/247, 324/251 ; Classification internationale G01R33/07, G01R33/02; Classification coopérative G01D9/005, G01R33/022, G01R33/02; Classification européenne G01D9/00S, G01R33/02. 2005.

- [27] Schaap K, Christopher-De Vries Y, Crozier S, De Vocht F, Kromhout H. Exposure to static and time-varying magnetic fields from working in the static magnetic stray fields of MRI scanners: a comprehensive survey in the Netherlands. *Ann Occup Hyg.* nov 2014;58(9):1094-110.
- [28] Pasquier C, Felblinger J, Jovanovic S. Apparatus for Monitoring in a Magnetic Environment and Method Associated Therewith. CIB : G01R33/02; G01R33/24 ; G01R33/28 ; G01V3/15. 67. 2013.
- [29] DELMAS A. Définition, validation et mise en place d'un suivi de l'exposition au champ magnétique statique des travailleurs en IRM [thèse de doctorat]. Nancy, France : Université de Lorraine; 2017.
- [30] Delmas A, Weber N, Piffre J, Pasquier C, Felblinger J, Vuissoz P-A. MRI « EXPOSIMETRY »: HOW TO ANALYZE, COMPARE AND REPRESENT WORKER EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELD? *Radiat Prot Dosimetry.* 1 déc 2017;177(4):415-23.
- [31] Delmas A, Belguerras L, Weber N, Odille F, Pasquier C, Felblinger J, et al. Calibration and non-orthogonality correction of three-axis Hall sensors for the monitoring of MRI workers' exposure to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* févr 2018;39(2):108-19.
- [32] Ong SJ, Renfrew I, Anil G, Tan AP, Sia SY, Low CK, et al. SIR HELMET (Safety In Radiology HEalthcare Localised Metrological EnviromenT): a low-cost negative-pressure isolation barrier for shielding MRI frontline workers from COVID-19 exposure. *Clin Radiol.* sept 2020;75(9):711.e1-711.e4.
- [33] Schaap K, Christopher-De Vries Y, Cambron-Goulet É, Kromhout H. Work-related factors associated with occupational exposure to static magnetic stray fields from MRI scanners. *Magn Reson Med.* mai 2016;75(5):2141-55.
- [34] Karpowicz J, Gryz K. The pattern of exposure to static magnetic field of nurses involved in activities related to contrast administration into patients diagnosed in 1.5 T MRI scanners. *Electromagn Biol Med.* juin 2013;32(2):182-91.

- [35] Bongers S, Christopher Y, Engels H, Slottje P, Kromhout H. Retrospective assessment of exposure to static magnetic fields during production and development of magnetic resonance imaging systems. *Ann Occup Hyg.* janv 2014;58(1):85-102.
- [36.] Batistatou E, Mölter A, Kromhout H, van Tongeren M, Crozier S, Schaap K, et al. Personal exposure to static and time-varying magnetic fields during MRI procedures in clinical practice in the UK. *Occup Environ Med.* nov 2016;73(11):779-86.
- [37] Trakic A, Wang H, Liu F, Lopez HS, Weber E, Crozier S. Minimizing the induced fields in MRI occupational workers by lowering the imager. *Concepts Magn Reson Part B Magn Reson Eng.* févr 2008;33B(1):39-54.
- [38]. Capstick M, McRobbie D, Hand J, Christ A, Kühn S, Mild KH, et al. An Investigation into Occupational Exposure to Electromagnetic Fields for Personnel Working With and Around Medical Magnetic Resonance Imaging Equipment Foundation for Research on Information Technologies in Society. CH; 2008. p. 1-287.
- [39] Code du travail - Dispositions particulières encadrant le dépassement des valeurs limites d'exposition relatives aux effets sensoriels - Article R4453-23 - Code du travail [En ligne] 2017 Disponible:
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032980694/2017-01-01
- [40] Calamante F, Ittermann B, Kanal E, Safety TI-SWG on M, Norris D. Recommended responsibilities for management of MR safety. *J Magn Reson Imaging.* 2016;44(5):1067-9.

DISCUSSION

I. Caractérisation de l'exposition au CMS chez les salariés travaillant à proximité d'IRM :

1. Exposition cumulée :

a. B0 cumulée :

La surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs n'est pas une considération récente et elle est de ce fait bien intégrée par les acteurs de la prévention des risques professionnels. Elle repose essentiellement sur la mesure de la dose cumulée de rayonnements ionisants reçue par le corps humain grâce à des dosimètres standardisés, dont le port est généralisé à l'ensemble des salariés exposés. Les risques à long terme, notamment cancérogènes (leucémies, etc.), sont bien décrits facilitant le suivi des salariés (bilans sanguins, etc.). La mesure de l'exposition au CMS est d'intérêt plus récent mais prend de plus en plus d'importance.

Pour le moment il n'a pas été prouvé d'effets à long terme de l'exposition au CMS et les recommandations actuelles de l'ICNIRP et de la Directive Européenne 2013/35/UE ne tiennent pas compte de l'exposition cumulée. Dans notre étude nous avons donc analysé l'exposition au CMS de notre population au moyen de B_0 , dB/dt et $\Delta B/3sec$ qui sont des valeurs instantanées. L'OMS (66) a cependant souligné l'importance de collecter des données pour réaliser des études à long terme. Une étude récente (42) a d'ailleurs montré chez des salariés de l'industrie une association statistiquement significative entre de fortes expositions cumulées et le développement d'une HTA à long terme. Les IRM à très hauts champs et ultra-hauts champs étant amenées à se multiplier à l'avenir, si d'autres études parvenaient à prouver une corrélation

entre de fortes expositions et des effets à long terme, l'utilisation d'un exposimètre pourrait s'imposer.

b. TWA :

Les recommandations de l'OMS de 2006 (66) ainsi que celles de l'ICNIRP en 1994 (86) préconisaient de mesurer l'exposition moyenne pondérée sur une journée de travail grâce au TWA (Time Weight Average) et que cette grandeur ne dépasse pas 200 mT par journée de travail. Elle consiste à calculer la somme des expositions sur une journée de travail et à la diviser par le temps de travail (en général 8h).

Le TWA est utilisé dans de nombreuses études (14,20,74,75,79,82,83) même postérieures à la nouvelle Directive Européenne et aux recommandations de l'ICNIRP de 2010 et 2014 qui déconseillent pourtant d'utiliser cette métrique. Dans toutes ces études, le TWA reste d'ailleurs largement inférieur à 200 mT. Cette variable a le désavantage de ne pas pouvoir distinguer de fortes expositions ponctuelles et des expositions minimales sur de longues durées. Elle permet cependant de comparer différentes études d'exposition au CMS dans des centres et pays différents.

2. Control Chart :

DELMAS et al. a réalisé une étude (76) sur l'exposition au CMS des MERM d'un service de neuroradiologie travaillant à proximité d'IRM 1,5 et 3T. Une seule des 123 acquisitions montrait un $B_0 > 2T$. Dans cette étude, il était donc proposé une interface graphique utilisant un outil de contrôle qualité - *le control chart* - permettant aux MERM de situer simplement leur pratique par rapport à leurs collègues sur une ou plusieurs journées. Les grandeurs représentées étaient le Total Exposition Duration (TED) (le temps total où l'exposition est $> 0,025T$), et la valeur maximale de B_0 . L'écart-type d'exposition était défini sur la moyenne des 30 premières acquisitions. Était considéré comme comportement « s'écartant de la norme » - c'est-à-dire

ayant une faible probabilité d'occurrence par rapport à un processus qui se répète identique à lui-même - une personne qui obtenait dans son enregistrement une valeur $> 80\%$ de 3 écarts types. Les rapports d'exposition étaient générés à la demande du salarié ou systématiquement au moment du déchargement des données en cas de valeur « s'écartant de la norme ». Cette méthode permettrait de cibler une certaine catégorie de MERM à entraîner en ne tenant pas uniquement compte des recommandations de la Directive Européenne et des recommandations de l'ICNIRP. Avec le TED, elle tient compte de l'ensemble des expositions du MERM, même les plus faibles. Cette interface graphique utilisée au quotidien par les MERM de notre étude, utilise un code couleur pour représenter la proportion de temps passé dans chaque zone de B_0 . Comme nous l'avons vu plus haut, les pratiques de leur lieu de travail s'éloignent de celles de la plupart des autres centres d'IRM en France. Cette interface pourrait donc être utile pour personnaliser les conseils d'adaptation des pratiques à un centre en particulier.

3. Calcul de l'exposition au CMS en fonction de la fréquence :

Le seuil de stimulation du système nerveux central étant maximal pour les vertiges, l'ICNIRP suggère que dans des conditions d'exposition contrôlées, respecter les limites qui permettent d'éviter les vertiges ($B_0 < 2T$, $\Delta B/3\text{sec} < 2T$, $\text{dB}/\text{dt} < 2,7 \text{ T}\cdot\text{s}^{-1}$), évite toute autre stimulation du SNC (nausées, goût métallique dans la bouche, phosphènes) et du système nerveux périphérique (stimulations nerveuses périphériques). La fréquence des mouvements du corps humain est difficilement estimable mais elle est fortement susceptible d'être inférieure à 10Hz (57). Les mouvements de tête d'un salarié qui se déplace seraient compris entre 0,4 et 4Hz (36). Dans des conditions d'exposition contrôlées, les valeurs limites pour l'effet vertiges et SNP ne dépendent pas de la fréquence. Les MERM peuvent se retrouver exceptionnellement dans des situations d'exposition non contrôlées, lorsqu'en cas d'urgence par exemple ils effectuent des mouvements rapides qui ne correspondent pas à leur pratique routinière. Dans ces conditions à partir de 0,66Hz, le seuil de perception des phosphènes et des SNP dépend de la fréquence.

Dans des conditions d'exposition non contrôlées, le seuil au-delà duquel des phosphènes et SNP sont susceptibles d'apparaître atteint un minimum à 10Hz ($\text{dB}/\text{dt} = 0,22\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$) (35,59). Pour mesurer le risque d'apparition de phosphènes dans des conditions non contrôlées, il faut corréler le dB/dt à la fréquence du mouvement. Pour cela l'ICNIRP recommande d'utiliser la méthode du « weighted peak » (35,59) décrite également par Mc Robbie en 2012 (10) et utilisée dans certaines études (50,50,53,55,59–62,68,72). Elle consiste à l'aide de calculs complexes à mesurer un indice qui doit être <1 pour être conforme avec la Directive Européenne. Elle peut être utilisée pour des études ponctuelles et spécifiques mais ne s'applique pas à une évaluation quotidienne et routinière.

II. La mesure du CMS à l'aide d'un exposimètre :

1. *Discussion autour de notre dispositif :*

Notre exposimètre pourrait être amélioré dans ses futures versions.

Des recommandations (9,36,59) existent pour définir des seuils à ne pas dépasser afin d'éviter l'apparition de certains symptômes. Cependant certaines études ont mis en évidence une subjectivité de ces symptômes (13,14,20,23,24,71,77) notamment parce qu'ils pouvaient être rapportés à des seuils inférieurs à ceux proposés dans les recommandations (14,20,24,77). D'autres études utilisant des procédures standardisées pour rechercher des symptômes (hochement de tête, suivre une lumière de la tête, entrée et sortie de la table à l'intérieur du tunnel à une vitesse donnée) ne montraient des symptômes que chez certains participants (16,18,19,24,25,28). De Vocht et al. (20) concluait dans son étude que les symptômes étaient liés à la durée de travail sur une semaine plutôt qu'au pic de B_0 et la valeur de l'induction magnétique de l'IRM. Dans son étude, des MERM avaient présenté des symptômes sur une IRM 1,5 T donc en dessous du seuil admis de 2T et avec un dB/dt toujours inférieur à $2,7 \text{ T}\cdot\text{s}^{-1}$. Schaap et al. (13) a montré une corrélation entre l'augmentation du CMS de l'isocentre de l'IRM et la survenue de symptômes. Cependant, étant donné qu'un sous-groupe rapportait plus souvent des symptômes, elle faisait l'hypothèse d'une sensibilité individuelle au CMS. Nous suggérons l'ajout d'un bouton sur un prochain prototype d'exposimètre qui permettrait au MERM de signaler immédiatement la présence d'un symptôme. Cela permettrait à la fin de son poste d'avoir une estimation précise des données d'exposition (B_0 , dB/dt, $\Delta B/3\text{sec}$, données de l'accéléromètre et du gyroscope) du MERM au moment où il a renseigné un symptôme et qu'il puisse adapter sa pratique de façon individuelle à posteriori.

A l'inverse, la subjectivité de ces symptômes implique que certains MERM pourraient dépasser les valeurs de la Directive Européenne et des recommandations de l'ICNIRP sans présenter de symptômes les informant de ce dépassement. Dans les études d'Andreuccetti et al. (71) et Fatahi

et al. (77), qui avaient pour objectif de corréler les expositions aux symptômes, certaines personnes ont eu des dépassements sans présenter de symptômes. Dans notre étude, nous avons montré que ces dépassements étaient très occasionnels. Une alarme qui sonnerait ponctuellement pour indiquer un dépassement d'exposition au CMS à la manière d'un dosimètre opérationnel pourrait permettre à un MERM d'adapter ses mouvements immédiatement. Dans ce sens, Hartwig et al. (87) a créé récemment un dosimètre avec un écran LCD qui permettrait de lire en temps réel l'exposition avec des alarmes visuelles et sonores mais il n'est pas encore commercialisé à grande échelle.

2. Où porter le dosimètre :

La plupart des symptômes dus à l'exposition au CMS intense proviennent d'une stimulation du système vestibulaire qui se situe donc au niveau de la tête. Pour cette raison certaines études ont préféré faire porter leur outil de mesure à cet endroit (70,71,77,78,80,83,84). Les B_0 mesurés par Fatahi et al. (77) à la tête étaient plus élevés que ceux du torse (maximum 2505 mT à la tête et 1440 mT pour le torse). Andreuccetti et al. (71) montrait une différence d'une déviation standard de B_0 entre le port à la hanche et le port à la tête. Filice et al. (78) a cependant montré que seul le dB/dt mesuré à la tête en conditions non contrôlées était susceptible de dépasser la réglementation Européenne pour une IRM 3T. Cette étude suggère que le port du dosimètre au niveau de la tête pourrait être particulièrement utile pour étudier l'exposition au CMS dans des conditions d'exposition non contrôlées où la fréquence a son importance. Nous avons choisi de faire porter le dispositif au niveau de la poche du torse des salariés pour ne pas gêner leurs mouvements. De plus, la Directive Européenne suggère que les valeurs seuils sont valables pour le torse et la tête. La plupart des études mesurant l'exposition au CMS à l'aide d'un dosimètre portatif l'ont fait porter au niveau du torse ce qui permet l'inter comparabilité des données entre études. L'exposimètre porté au torse pourrait surestimer l'exposition à la tête d'un salarié qui se tiendrait debout devant l'anneau (exemple d'un chirurgien pendant une intervention qui ne

mettrait pas la tête dans l'anneau) alors qu'il pourrait sous-estimer l'exposition à la tête d'un salarié qui se pencherait dans le tunnel et garderait son torse à l'extérieur de celui-ci.

Une méthode d'extrapolation des valeurs à la tête pourrait être un bon compromis pour permettre aux MERM de continuer à porter ce dispositif au niveau du torse et ne pas gêner leurs mouvements. Antoine DELMAS proposait dans sa thèse (88) de porter le dispositif sur le torse et d'utiliser les données du gyroscope et de l'accéléromètre pour estimer la position et donc l'exposition de la tête. Cette méthode ne permet cependant pas d'estimer de façon précise les mouvements de tête du salarié (par exemple si le salarié effectue uniquement une rotation) qui pourraient générer des symptômes en fonction de leur fréquence dans des conditions non contrôlées.

3. Ondes RF et dosimètre :

Nous avons considéré ici uniquement l'exposition ponctuelle des MERM au CMS. Or, dans le domaine de l'IRM interventionnelle, chirurgiens, IBODE et IADE sont exposés au CMS de façon permanente durant une intervention ainsi qu'aux ondes RF (B_1) et aux gradients de champs magnétiques. Un chirurgien qui ressentirait des symptômes à type de vertiges pourrait représenter un risque important pour la sécurité de l'intervention. Il pourrait donc ne pas être pertinent dans ce dernier cas d'autoriser des dépassements $> 2T$. Des dispositifs ont déjà tenté de mesurer l'exposition aux ondes RF mais seulement sur des patients au cours d'un examen IRM (89) et non sur des salariés travaillant à proximité d'IRM.

III. Prévention des risques liés au CMS de l'IRM :

1. Conseils de prévention utiles à la pratique du médecin du travail :

Le médecin du travail est un acteur essentiel dans la prévention des risques liés au CMS de l'IRM.

Au cours de ses visites, il a la possibilité de sensibiliser chaque salarié de façon adaptée. Des symptômes peuvent être rapportés spontanément ou être retrouvés en l'interrogeant. Il peut alors être utile de rassurer le salarié sur leur bénignité et lui rappeler quelques conseils de prévention tels que le fait de s'éloigner tant que possible de l'anneau de l'IRM pour travailler. Certains gestes peuvent nécessiter tout de même de s'approcher de l'anneau et même d'y rentrer la tête. Il peut être conseillé dans ces situations de réaliser des mouvements de tête les plus lents possibles afin d'éviter tout symptômes. Si malgré ces conseils les symptômes persistaient, il peut s'avérer utile de voir le salarié travailler en conditions réelles à proximité de l'IRM pour l'aider à adapter sa pratique.

Observer les salariés travailler peut également avoir un intérêt collectif afin de se rendre compte des tâches qui nécessitent de s'approcher de l'anneau et de proposer des aménagements adaptés (comme installer un injecteur de produit de contraste à commande à distance).

Certains salariés peuvent n'avoir jamais ressenti de symptômes. Le médecin du travail peut les informer de ces symptômes, les rassurer sur le fait qu'ils sont bénins et transitoires et leur donner des conseils pour les éviter. Ces informations peuvent également être délivrées de façon collective au cours de réunions de sensibilisation.

A chacune de ces étapes le médecin du travail peut s'aider de données d'un exposimètre pour sensibiliser les MERM à leur exposition et les aider à adapter leurs pratiques.

2. Adapter sa pratique à son exposition :

Il existe dans la littérature scientifique plusieurs articles qui pourraient être utiles à la prévention des risques liés au CMS. Afin d'aider les MERM à éviter des symptômes, Hartwig et al. (81) proposait de modéliser les différentes lignes de champs sur un visuel informatique coloré pour enseigner aux salariés l'exposition correspondant à leur position dans la salle de l'IRM. Dans sa thèse Antoine DELMAS (88) proposait de créer un visuel coloré au sol à côté de l'IRM afin d'aider les salariés à repérer leur exposition en temps réel. Pour le moment seul la ligne des 5 G (0,5 mT) doit être modélisée au sol. Elle correspond à la valeur à laquelle un dispositif médical peut dysfonctionner (36). Yamagushi et al. (90), montrait qu'un MERM ne s'approchant pas à moins de 30 cm du tunnel pour des IRM 3T diminuait de façon significative son exposition au CMS. Il proposait donc de modéliser au sol cette zone de 30cm.

Hartwig et al. (91) a développé une méthode de calcul des courants induits par une tâche à partir de la vitesse de marche et des lignes de champ fournis par le constructeur de l'IRM. Le courant électrique étant proportionnel au dB/dt, cette méthode pourrait permettre aux MERM d'estimer leur exposition à dB/dt en fonction de leur vitesse de marche. En effet, en rentrant dans la salle et en restant à distance de l'anneau, se déplacer rapidement n'engendrera pas de dépassement mais leur permettra de garder une certaine vitesse et productivité dans l'exécution de leurs tâches. A l'inverse à proximité de l'anneau, il est important que les MERM ralentissent leur cadence pour ne pas expérimenter de symptômes.

Certaines études suggèrent d'entraîner les MERM à adapter leurs mouvements hors situation clinique. Galante et al. (92) utilisait une caméra capable de reconnaître 25 points du corps humain et une méthode de modélisation numérique pour estimer l'exposition au CMS de chacun de ces points lors de mouvements simulés dans un environnement IRM virtuel. Cette méthode pourrait être d'une grande utilité pour entraîner les MERM à évoluer dans un environnement IRM à ultra haut champ (développement des IRM > 11T) avant d'y être exposés.

D'autres études (93,94) ont également utilisé des caméras pour mesurer les expositions de plusieurs parties du corps en simulant des mouvements. Ces méthodes demandent des modélisations complexes qui ne sont pas utilisables en routine. De plus elles ne permettent de renseigner l'exposition que d'une personne à la fois. Cependant, elles ont l'avantage de mesurer l'exposition de plusieurs parties du corps en même temps contrairement à l'exposimètre qui ne mesure qu'un point particulier.

CONCLUSION

Afin d'éviter les effets à court terme du CMS, la Directive Européenne 2013/35/UE recommande des valeurs seuils d'exposition à ne pas dépasser. Dans certains cas spécifiques, tels que le travail à proximité d'IRM, cette directive autorise des expositions dépassant ces valeurs. Ces dépassements pouvant être à l'origine de symptômes, l'ICNIRP a proposé des recommandations supplémentaires pour éviter ces symptômes. Nous avons utilisé dans notre étude un dispositif portable pour mesurer l'expositions au CMS de salariés travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T. Cette étude a montré la réalité de ces dépassements en pratique courante. Notre dispositif pourrait donc avoir un intérêt au quotidien pour aider les salariés travaillant à proximité d'IRM à avoir conscience de leur exposition afin d'adapter leurs pratiques en conséquence. Nous avons également montré que l'analyse de cette exposition reste une tâche complexe qui pourrait donc être confiée à des personnes compétentes spécifiquement dédiées à la prévention des risques liés aux rayonnements non ionisants.

BIBLIOGRAPHIE

1. INRS. Dossier, champs électromagnétiques [En ligne]. 2021 [cité le 8 juin 2021]. Disponible : <https://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/ce-qu-il-faut-retenir.html>
2. DEMARET P. Les sources de rayonnement électromagnétiques industriels. Colloque de l'INRS : rayonnements optiques & électromagnétiques au travail 20-22 octobre 2015; Paris. Hors-série Hygiène & sécurité du travail, HST ; 2016. 32-6.
3. DRON D., PAVEL I. Innover avec les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA/NIEAW) Conditions d'un développement dynamique et sûr en France. [En ligne]. 2020 [cité le 12 avril 2022]. Disponible: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/ondes-usages-emergents.pdf
4. DA COSTA Antoine D. Place de la robotique magnétique Stéréotaxis dans l'ablation des troubles rythmiques. Cordiam. sept 2016;(13):14-8.
5. OCDE. Panorama de la santé 2019: Les indicateurs de l'OCDE [En ligne]. 2019 [cité 8 juin 2021] Disponible : https://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/panorama-de-la-sante-2019_5f5b6833-fr
6. Mcrobbie DW. Bio-effects 1: static field. Dans: Mcrobbie DW., Redacteur. Essentials of MRI Safety. Hoboken (USA): Wiley-Blackwell; 2020. p. 61
7. Hansson Mild K, Hand J, Hietanen M, Gowland P, Karpowicz J, Keevil S, et al. Exposure classification of MRI workers in epidemiological studies. Bioelectromagnetics. janv 2013;34(1):81-4.
8. CEA. MEMO D, le champ terrestre, faible mais vital[En ligne]. 2022 [cité le 19 mai 2022]. Disponible : <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/archives/fr/MemoD.pdf>

9. Commission européenne, Direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'inclusion, Unité B3. Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques ». Vol. Volume 1 — Guide pratique ; 2014. 226 p.
10. McRobbie DW. Occupational exposure in MRI. *Br J Radiol.* avr 2012;85(1012):293-312.
11. Sammet S. Magnetic resonance safety. *Abdom Radiol.* mars 2016;41(3):444-51.
12. DIRECTIVE 2013/35/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE.
13. Schaap K, Christopher-de Vries Y, Mason CK, de Vocht F, Portengen L, Kromhout H. Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5-7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms. *Occup Environ Med.* juin 2014;71(6):423-9.
14. de Vocht F, van Drooge H, Engels H, Kromhout H. Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging JMRI.* févr 2006;23(2):197-204.
15. Wilén J, de Vocht F. Health complaints among nurses working near MRI scanners--a descriptive pilot study. *Eur J Radiol.* nov 2011;80(2):510-3.
16. Glover PM, Cavin I, Qian W, Bowtell R, Gowland PA. Magnetic-field-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics.* juill 2007;28(5):349-61.
17. Schaap K, Portengen L, Kromhout H. Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers. *Occup Environ Med.* mars 2016;73(3):161-6.
18. Roberts DC, Marcelli V, Gillen JS, Carey JP, Della Santina CC, Zee DS. MRI Magnetic Field Stimulates Rotational Sensors of the Brain. *Curr Biol.* oct 2011;21(19):1635-40.

19. Heinrich A, Szostek A, Meyer P, Nees F, Rauschenberg J, Gröbner J, et al. Cognition and sensation in very high static magnetic fields: a randomized case-crossover study with different field strengths. *Radiology*. janv 2013;266(1):236-45.
20. de Vocht F, Batistatou E, Mölter A, Kromhout H, Schaap K, van Tongeren M, et al. Transient health symptoms of MRI staff working with 1.5 and 3.0 Tesla scanners in the UK. *Eur Radiol*. sept 2015;25(9):2718-26.
21. Walker M, Fultz A, Davies C, Brockopp D. Symptoms Experienced by MR Technologists Exposed to Static Magnetic Fields. *Radiol Technol*. mars 2020;91(4):316-23.
22. Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL. Human exposure to 4.0-Tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med Phys*. août 1992;19(4):1089-98.
23. Friebe B, Wollrab A, Thormann M, Fischbach K, Ricke J, Grueschow M, et al. Sensory perceptions of individuals exposed to the static field of a 7T MRI: A controlled blinded study. *J Magn Reson Imaging JMRI*. juin 2015;41(6):1675-81.
24. Cavin ID, Glover PM, Bowtell RW, Gowland PA. Thresholds for perceiving metallic taste at high magnetic field. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1357-61.
25. Atkinson IC, Renteria L, Burd H, Pliskin NH, Thulborn KR. Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1222-7.
26. Liu F, Zhao H, Crozier S. Calculation of electric fields induced by body and head motion in high-field MRI. *J Magn Reson San Diego Calif* 1997. mars 2003;161(1):99-107.
27. Antunes A, Glover PM, Li Y, Mian OS, Day BL. Magnetic field effects on the vestibular system: calculation of the pressure on the cupula due to ionic current-induced Lorentz force. *Phys Med Biol*. 21 juill 2012;57(14):4477-87.
28. Theysohn JM, Kraff O, Eilers K, Andrade D, Gerwig M, Timmann D, et al. Vestibular Effects of a 7 Tesla MRI Examination Compared to 1.5 T and 0 T in Healthy Volunteers. *PLoS ONE*. 21 mars 2014;9(3):e92104.
29. Mian OS, Li Y, Antunes A, Glover PM, Day BL. On the vertigo due to static magnetic fields. *PloS One*. 2013;8(10):e78748.

30. de Vocht F, van-Wendel-de-Joode B, Engels H, Kromhout H. Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 Tesla magnetic resonance imaging system--a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med.* oct 2003;50(4):670-4.
31. de Vocht F, Stevens T, van Wendel-de-Joode B, Engels H, Kromhout H. Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging JMRI.* mars 2006;23(3):291-7.
32. de Vocht F, Stevens T, Glover P, Sunderland A, Gowland P, Kromhout H. Cognitive effects of head-movements in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics.* mai 2007;28(4):247-55.
33. van Nierop LE, Slottje P, van Zandvoort MJE, de Vocht F, Kromhout H. Effects of magnetic stray fields from a 7 tesla MRI scanner on neurocognition: a double-blind randomised crossover study. *Occup Environ Med.* oct 2012;69(10):759-66.
34. Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H, Young DC. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 Tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging JMRI.* sept 2003;18(3):346-52.
35. ICNIRP. GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz). *Health Phys.* déc 2010;99(6):818-36.
36. ICNIRP. ON LIMITS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELDS. *Health Phys.* avr 2009;96(4):504-14.
37. Mcrobbie DW. Bio-effects 1: static field. Dans: Mcrobbie DW., Redacteur. *Essentials of MRI Safety.* Hoboken (USA): Wiley-Blackwell; 2020. p. 62
38. Schenck JF. Safety of Strong, Static Magnetic Fields. *J Magn Reson Imaging.* 2000;12(1):2-19.

39. Elsevier, *Physiologie humaine et physiopathologie: Chapitre 16, Le système vestibulaire et le sens de l'équilibre* [En ligne]. Elsevier Connect. [cité 2 janv 2022]. Disponible: <https://www.elsevier.com/fr-fr/connect/etudes-de-medecine/physiologie-humaine-et-physiopathologie>
40. Yamaguchi-Sekino S, Sekino M, Ueno S. Biological effects of electromagnetic fields and recently updated safety guidelines for strong static magnetic fields. *Magn Reson Med Sci MRMS Off J Jpn Soc Magn Reson Med*. 2011;10(1):1-10.
41. Crozier S, Liu F. Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol*. avr 2005;87(2-3):267-78.
42. Bongers S, Slottje P, Kromhout H. Development of hypertension after long-term exposure to static magnetic fields among workers from a magnetic resonance imaging device manufacturing facility. *Environ Res*. juill 2018;164:565-73.
43. Bongers S, Christopher Y, Engels H, Slottje P, Kromhout H. Retrospective assessment of exposure to static magnetic fields during production and development of magnetic resonance imaging systems. *Ann Occup Hyg*. janv 2014;58(1):85-102.
44. Bongers S, Slottje P, Portengen L, Kromhout H. Exposure to static magnetic fields and risk of accidents among a cohort of workers from a medical imaging device manufacturing facility. *Magn Reson Med*. mai 2016;75(5):2165-74.
45. Huss A, Schaap K, Kromhout H. MRI-related magnetic field exposures and risk of commuting accidents - A cross-sectional survey among Dutch imaging technicians. *Environ Res*. juill 2017;156:613-8.
46. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. *Non-ionizing Radiation, Part 1: STATIC AND EXTREMELY LOW-FREQUENCY (ELF) ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS*. Lyon, France : International Agency for Research on Cancer ; World Health Organization; 2001. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans ; 445 p.

47. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. Non-ionizing Radiation, Part 1: Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields Non-ionizing radiation. Lyon, France : International Agency for Research on Cancer ; World Health Organization; 2013. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans ; 80. 481 p.
48. Kanal E, Gillen J, Evans JA, Savitz DA, Shellock FG. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiology*. mai 1993;187(2):395-9.
49. DIRECTIVE 2004/40/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE)
50. Capstick M, McRobbie D, Hand J, Christ A, Kühn S, Mild KH, et al. An Investigation into Occupational Exposure to Electromagnetic Fields for Personnel Working With and Around Medical Magnetic Resonance Imaging Equipment [Internet]. Foundation for Research on Information Technologies in Society. CH; 2008. p. 1-287. Disponible sur: <https://itis.swiss/assets/Downloads/Papers-Reports/Reports/VT2007017FinalReportv04.pdf>
51. Riches SF, Collins DJ, Scuffham JW, Leach MO. EU Directive 2004/40: field measurements of a 1.5 T clinical MR scanner. *Br J Radiol*. juin 2007;80(954):483-7.
52. Code du travail- Articles L4121-1 à L4121-5 [en ligne]. Code du travail. [cité 10 avr 2022]. Disponible : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072050/LEGISCTA000006178066/
53. Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques

54. Magnetic resonance imaging equipment in clinical use: safety guidelines [Internet]. GOV.UK. [cité 28 avr 2022].GOV.UK. 2022 Disponible : <https://www.gov.uk/government/publications/safety-guidelines-for-magnetic-resonance-imaging-equipment-in-clinical-use>
55. RANZCR MRI Safety Guidelines Internet]. RANZCR. 2021 [cité 28 avr 2022]. Disponible : <https://www.ranzcr.com/college/document-library/ranzcr-mri-safety-guidelines>
56. Expert Panel on MR Safety, Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley WG, et al. ACR guidance document on MR safe practices: 2013. *J Magn Reson Imaging JMRI*. mars 2013;37(3):501-30.
57. Delmas A, Dessale C, Pasquier C, Vetter D, Vuissoz PA, Felblinger J. Lecture and analysis of the French decree 2016–1074 on protection of workers against risks due to electromagnetic fields exposure. Application to magnetic resonance imaging. *Radioprotection*. juill 2017;52(3):189.
58. INRS. Champs électromagnétique, ED 4209, 2ème édition - l'imagerie par résonance magnétique. 2018.
59. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields below 1 Hz. *Health Phys*. mars 2014;106(3):418-25.
60. Riches SF, Collins DJ, Charles-Edwards GD, Shafford JC, Cole J, Keevil SF, et al. Measurements of occupational exposure to switched gradient and spatially-varying magnetic fields in areas adjacent to 1.5 T clinical MRI systems. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1346-52.
61. Stuart Crozier, Trakic A, Wang H, Liu F. Numerical study of currents in workers induced by body-motion around high-ultrahigh field MRI magnets. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1261-77.
62. Gurrera D, Gallias KK, Spanò M, Abbate BF, D'Alia F, Iacoviello G, et al. Moving across the static magnetic field of a 1.5 T MRI scanner: Analysing compliance with Directive 2013/35/EU. *Phys Medica PM Int J Devoted Appl Phys Med Biol Off J Ital Assoc Biomed Phys AIFB*. janv 2019;57:238-44.

63. Zilberti L, Bottauscio O, Chiampi M. Assessment of exposure to MRI motion-induced fields based on the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) guidelines. *Magn Reson Med.* oct 2016;76(4):1291-300.
64. Laakso I, Kännälä S, Jokela K. Computational dosimetry of induced electric fields during realistic movements in the vicinity of a 3 T MRI scanner. *Phys Med Biol.* 21 avr 2013;58(8):2625-40.
65. Sannino A, Romeo S, Scarfi MR, Massa R, d'Angelo R, Petrillo A, et al. Exposure Assessment and Biomonitoring of Workers in Magnetic Resonance Environment: An Exploratory Study. *Front Public Health.* 2017;5:344.
66. Repacholi M, Saunders R, van Deventer E, Cardis E. *Environmental Health Criteria Monograph No.232 - Static Fields.* 2006;
67. Crozier S, James Wilson S, Ian G. Magnetic field dosimeter, us 7936168 b2. Classification aux États-Unis 324/247, 324/251; Classification internationale G01R33/07, G01R33/02; Classification coopérative G01D9/005, G01R33/022, G01R33/02; Classification européenne G01D9/00S, G01R33/02. 2005.
68. Pasquier C, Felblinger J, Jovanovic S. Apparatus for Monitoring in a Magnetic Environment and Method Associated Therewith. CIB: G01R33/02; G01R33/24; G01R33/28; G01V3/15. 67. 2013.
69. Acri G, Inferrera P, Denaro L, Sansotta C, Ruello E, Anfuso C, et al. dB/dt Evaluation in MRI Sites: Is ICNIRP Threshold Limit (for Workers) Exceeded? *Int J Environ Res Public Health.* 21 juin 2018;15(7):E1298.
70. Andreuccetti D, Contessa GM, Falsaperla R, Lodato R, Pinto R, Zoppetti N, et al. Weighted-peak assessment of occupational exposure due to MRI gradient fields and movements in a nonhomogeneous static magnetic field. *Med Phys.* janv 2013;40(1):011910.
71. Andreuccetti D, Biagi L, Burriesci G, Cannatà V, Contessa GM, Falsaperla R, et al. Occupational exposure in MR facilities due to movements in the static magnetic field. *Med Phys.* nov 2017;44(11):5988-96.

72. Batistatou E, Mölter A, Kromhout H, van Tongeren M, Crozier S, Schaap K, et al. Personal exposure to static and time-varying magnetic fields during MRI procedures in clinical practice in the UK. *Occup Environ Med.* nov 2016;73(11):779-86.
73. Bonello J, Sammut CV. Experimental analysis of radiographer exposure to the static field from a 1.5-T magnetic resonance imaging machine. *Int J Occup Saf Ergon JOSE.* mars 2017;23(1):133-8.
74. Bradley JK, Nyekiova M, Price DL, Lopez LD, Crawley T. Occupational exposure to static and time-varying gradient magnetic fields in MR units. *J Magn Reson Imaging JMRI.* nov 2007;26(5):1204-9.
75. de Vocht F, Muller F, Engels H, Kromhout H. Personal exposure to static and time-varying magnetic fields during MRI system test procedures. *J Magn Reson Imaging JMRI.* nov 2009;30(5):1223-8.
76. Delmas A, Weber N, Piffre J, Pasquier C, Felblinger J, Vuissoz PA. MRI « EXPOSIMETRY »: HOW TO ANALYZE, COMPARE AND REPRESENT WORKER EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELD? *Radiat Prot Dosimetry.* 1 déc 2017;177(4):415-23.
77. Fatahi M, Karpowicz J, Gryz K, Fattahi A, Rose G, Speck O. Evaluation of exposure to (ultra) high static magnetic fields during activities around human MRI scanners. *Magma N Y N.* juin 2017;30(3):255-64.
78. Filice S, Rossi R, Crisi G. ASSESSMENT OF MOVEMENT-INDUCED TIME-VARYING MAGNETIC FIELDS EXPOSURE IN MAGNETIC RESONANCE IMAGING BY A COMMERCIAL PORTABLE MAGNETOMETER. *Radiat Prot Dosimetry.* 31 déc 2019;185(3):326-30.
79. Fuentes MA, Trakic A, Wilson SJ, Crozier S. Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Trans Biomed Eng.* avr 2008;55(4):1355-64.
80. Groebner J, Umatham R, Bock M, Krafft AJ, Semmler W, Rauschenberg J. MR safety: simultaneous B_0 , $d\Phi/dt$, and dB/dt measurements on MR-workers up to 7 T. *Magma N Y N.* déc 2011;24(6):315-22.

81. Hartwig V, Biagini C, De Marchi D, Flori A, Gabellieri C, Virgili G, et al. Analysis, comparison and representation of occupational exposure to a static magnetic field in a 3-T MRI site. *Int J Occup Saf Ergon JOSE*. 10 avr 2020;1-10.
82. Schaap K, Christopher-De Vries Y, Crozier S, De Vocht F, Kromhout H. Exposure to static and time-varying magnetic fields from working in the static magnetic stray fields of MRI scanners: a comprehensive survey in the Netherlands. *Ann Occup Hyg*. nov 2014;58(9):1094-110.
83. van Nierop LE, Christopher-de Vries Y, Slottje P, Kromhout H. Does assessment of personal exposure matter during experimental neurocognitive testing in MRI-related magnetic fields? *Magn Reson Med*. févr 2015;73(2):765-72.
84. Yamaguchi-Sekino S, Nakai T, Imai S, Izawa S, Okuno T. Occupational exposure levels of static magnetic field during routine MRI examination in 3T MR system. *Bioelectromagnetics*. janv 2014;35(1):70-5.
85. INRS. Services de santé au travail. Le médecin du travail - Démarches de prévention - [Internet]. [cité 10 avr 2022]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/demarche/services-sante-travail/medecin-travail.html>
86. ICNIRP. ON LIMITS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELDS. *Health Phys*. 1994;66(1):100-6.
87. Hartwig V, Ferrante Vero LF, Virgili G, Landini L, Giovannetti G. New device for the assessment of occupational exposure to time-varying magnetic field due to movement in Magnetic Resonance environments. *Electron Lett*. 28 mars 2019;55.
88. DELMAS A. Définition, validation et mise en place d'un suivi de l'exposition au champ magnétique statique des travailleurs en IRM [thèse de doctorat]. Nancy, France : Université de Lorraine; 2017.
89. Stralka JP, Bottomley PA. A Prototype RF Dosimeter for Independent Measurement of the Average Specific Absorption Rate (SAR) During MRI. *J Magn Reson Imaging JMRI*. nov 2007;26(5):1296-302.

90. Yamaguchi-Sekino S, Sekino M, Nakai T. Effectiveness of safe working procedure on SMF exposure levels and work performances in 3 T MRI system operations. In: 2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG). 2015. p. 1-1.
91. Hartwig V, Vanello N, Giovannetti G, Lombardi M, Landini L, Santarelli MF. A novel tool for estimation of magnetic resonance occupational exposure to spatially varying magnetic fields. *Magma N Y N*. déc 2011;24(6):323-30.
92. Galante A, Alecci M, Fantasia M, Rinaldiop C, Federici F, Franchi F. Real-time monitoring and training for professionals exposed to static magnetic fields. In: 2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). 2018. p. 1-5.
93. Gurrera D, Leardini A, Ortolani M, Durante S, Caputo V, Gallias KK, et al. Experimental and Modeling Analyses of Human Motion Across the Static Magnetic Field of an MRI Scanner. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:613616.
94. Belguerras L, Kadkhodamohammadi AR, Delmas A, Miralipoor M, Weber N, Gangi A, et al. Evaluation of occupational exposure to static magnetic field in MRI sites based on body pose estimation and SMF analytical computation. *Bioelectromagnetics*. oct 2018;39(7):503-15.

VU

NANCY, le 20 mai 2022

Le Président de Thèse

Professeur Damien MANDRY

NANCY, le 25 mai 2022

Le Doyen de la Faculté de Médecine

Professeur Marc BRAUN

AUTORISE À SOUTENIR ET À IMPRIMER LA THÈSE/ 12487C

NANCY, le 08 juin 2022

LA PRESIDENTE DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE,

Madame Hélène BOULANGER

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

Un appareil d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) émet de façon permanente un Champ Magnétique Statique (CMS), B_0 . La directive européenne 2013/35/UE restreint l'exposition des salariés au CMS à 2T. De plus, *l'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) recommande de ne pas atteindre un $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$ ou un $\Delta B/3sec > 2T$ afin d'éviter la survenue de symptômes transitoires tels que des vertiges. Entre 2016 et 2020, 5 manipulateurs en électroradiologie médicale (MERM) travaillant à proximité d'IRM 3T et 7T du département de neuro-imagerie au sein d'un centre de recherche ont porté un dispositif portable de mesure de l'exposition au CMS développé à Nancy. Le nombre d'« événements » où $B_0 > 2T$ ainsi que le nombre de $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$ et $\Delta B/3sec > 2T$ ont été quantifiés. Au total, 966 journées de port de l'exposimètre ont été analysés. 111 événements où l'exposition à B_0 était $> 2T$ ont été identifiés. Le B_0 le plus élevé était de 2,67T. Seul un événement était précédé d'un $dB/dt > 2,7T.s^{-1}$. 14 événements étaient suivis d'un $\Delta B/3sec > 2T$. Ce dispositif devrait aider les salariés qui travaillent à proximité d'IRM à contrôler leurs mouvements pour respecter la Directive Européenne et ne pas expérimenter de symptômes au cours de leur travail.

TITRE EN ANGLAIS: *Assessment of occupational exposure to static magnetic field of radiographers from a research facility working in the vicinity of 3T and 7T MRI with a portable magnetic monitoring device.*

THÈSE : MÉDECINE, MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL, ANNÉE 2022

MOTS CLES : Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), Exposition professionnelle, Champs Électromagnétiques, Évaluation des risques.

INTITULÉ ET ADRESSE

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Faculté de médecine de Nancy

9, avenue de la Forêt de Haye BP20199

54505 VANDOEUVRE-LES-NANCY
