

Tomodensitométrie et ses effets cancérogènes chez les enfants et les jeunes au Québec

Importance de la problématique et pistes de solution

Décembre 2011

Une production de l'Institut national d'excellence en santé et en services sociaux

Rapport rédigé par
Wilber Deck et Aimé-Robert LeBlanc

Le présent rapport a été adopté par le Comité scientifique transitoire de l'Institut national d'excellence en santé et en services sociaux (INESSS) lors de sa réunion du 17 juin 2011.

Le contenu de cette publication a été rédigé et édité par l'INESSS.

ÉQUIPE DE PROJET

Auteurs

D^r Wilber Deck, M. Sc.

Aimé-Robert LeBlanc, ing.

Direction scientifique

Alicia Framarin, M. Sc.

Directrice scientifique – Évaluation des technologies et des modes d'intervention en santé

D^r Jean-Marie Moutquin, M.D., M. Sc., FRCSC

Directeur scientifique – Soutien à la pratique clinique

Recherche documentaire

Robert Aubin

Soutien documentaire

Micheline Paquin

ÉDITION

Responsable

Diane Guilbault

Révision linguistique

Marie-Josée Pelletier

Traduction

Jocelyne Lauzière

Coordination

Véronique Baril et Olivia Jacques

Graphisme

Magali Bérubé

Vérification bibliographique

Denis Santerre

Publié par la Direction des communications et du transfert de connaissances

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2011

Bibliothèque et Archives Canada, 2011

ISSN 1915-3082 INESSS (imprimé)

ISBN 978-2-550-63721-9 (imprimé)

ISSN 1915-3104 INESSS (PDF)

ISBN 978-2-550-63720-2 (PDF)

© Gouvernement du Québec, 2011.

La reproduction totale ou partielle de ce document est autorisée à condition que la source soit mentionnée.

Pour citer ce document: Institut national d'excellence en santé et services sociaux (INESSS). Tomodensitométrie et ses effets cancérogènes chez les enfants et les jeunes au Québec. Importance de la problématique et pistes de solution.

ETMIS 2011 ; 7(8) : 1-64

L'Institut remercie les membres de son personnel qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport.

RENSEIGNEMENTS

Institut national d'excellence en santé et en services sociaux (INESSS)

1195, avenue Lavigerie, bureau 60
Québec (Québec) G1V 4N3

Téléphone : 418 643-1339

Télécopieur : 418 644-8120

Courriel : inesss@inesss.qc.ca

Site Web : inesss.qc.ca

2021, avenue Union, bureau 10.083
Montréal (Québec) H3A 2S9

Téléphone : 514 873-2563

Télécopieur : 514 873-1369



Le présent document a été imprimé sur du papier contenant 100 % de fibres postconsommation, certifié Choix environnemental, recyclé et fabriqué à partir d'énergie biogaz et par un procédé sans chlore.

COMITÉ SCIENTIFIQUE PERMANENT EN SANTÉ ET EN SERVICES SOCIAUX

Membres

M^{me} Isabelle Boutin-Ganache

- Éthicienne, Commissaire à la santé et au bien-être
- Présidente, comité d'éthique de la recherche de la Faculté de médecine de l'Université de Montréal

D^{re} Nathalie Champoux

- Médecin de famille à l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal
- Professeur agrégé de clinique et chercheur, Département de médecine familiale de l'Université de Montréal

M. Pierre Dostie

- Directeur des clientèles en Dépendances (CSSS et Centre de réadaptation en dépendances), Santé mentale, Enfance, jeunesse et famille, et Santé publique au CSSS de Jonquière
- Chargé de cours en travail social à l'Université du Québec à Chicoutimi

M. Hubert Doucet

- Consultant en bioéthique et président du comité de bioéthique du CHU Sainte-Justine
- Professeur associé à la Faculté de théologie et de sciences des religions de l'Université de Montréal

M. Serge Dumont

- Directeur scientifique du CSSS de la Vieille-Capitale et directeur du Réseau de collaboration sur les pratiques interprofessionnelles en santé
- Professeur titulaire à l'École de service social de l'Université Laval et chercheur au centre de recherche en cancérologie de l'Hôtel-Dieu de Québec

M. Jude Goulet

- Pharmacien, chef du Département de pharmacie de l'hôpital Maisonneuve-Rosemont

M. Roger Jacob

- Ingénieur et directeur de Grandir en santé au CHU Sainte-Justine

D^r Michel Labrecque

- Médecin et professeur titulaire, Département de médecine familiale et médecine d'urgence, Université Laval
- Chercheur clinicien, Unité de médecine familiale, Centre de recherche et Chaire de recherche du Canada sur l'implantation de la prise de décision partagée en soins primaires, Centre hospitalier universitaire de Québec (CHUQ)

M. Éric A. Latimer

- Économiste et professeur agrégé au Département de psychiatrie de la Faculté de médecine de l'Université McGill
- Chercheur à l'Institut universitaire en santé mentale Douglas et membre associé du Département d'épidémiologie et biostatistique de l'Université McGill

M^{me} Claudine Laurier

- Professeure titulaire, Faculté de pharmacie, Université de Montréal

M^{me} Louise Lavergne

- Directrice générale, Institut de réadaptation en déficience physique de Québec

M^{me} Esther Leclerc

- Directrice générale adjointe aux Affaires cliniques, Centre hospitalier de l'Université de Montréal

D^r Raghu Rajan

- Oncologue médical au Centre universitaire de santé McGill (CUSM) et professeur associé, Université McGill
- Membre du Comité de l'évolution des pratiques en oncologie (CEPO) et du programme de gestion thérapeutique des médicaments (PGTM)

D^r Daniel Reinharz

- Médecin et professeur titulaire, Département de médecine sociale et préventive, Faculté de médecine de l'Université Laval

Membres experts invités

M. Aimé Robert LeBlanc

- Ingénieur, professeur émérite, Institut de génie biomédical, département de physiologie, Faculté de médecine, Université de Montréal
- Directeur adjoint à la recherche et au développement, Centre de recherche de l'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal

D^r Réginald Nadeau

- Cardiologue et chercheur, Centre de recherche de l'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal
- Professeur émérite, Faculté de médecine, Université de Montréal

D^r Simon Racine

- Médecin spécialiste en santé communautaire
- Directeur général, Institut universitaire en santé mentale de Québec

D^r Maurice St-Laurent

- Gériatre et professeur agrégé de clinique, Faculté de médecine, Université Laval

M. Jean Toupin

- Professeur titulaire et directeur du Département de psychoéducation, Université de Sherbrooke

Membres citoyens

M. Marc Bélanger

- Psychoéducateur à la retraite

M^{me} Jeannine Tellier-Cormier

- Professeure en soins infirmiers à la retraite, Cégep de Trois-Rivières

Membre observateur MSSS

D^{re} Sylvie Bernier

- Directrice de la Direction de la qualité au Ministère de la Santé et des Services sociaux

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	i
L'AVIS EN BREF	ii
COLLABORATEURS	iii
RÉSUMÉ	iv
SUMMARY	vii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	ix
1 INTRODUCTION	1
1.1 Historique	1
1.2 Mandat	2
2 MÉTHODES DE RECHERCHE ET D'ANALYSE	3
3 LA RADIATION ET LE CANCER	4
3.1 La radiation	4
3.2 Mesurer la radiation	4
3.2.1 Unités de dose	4
3.2.2 Dosimétrie	7
3.3 Lien entre radiation ionisante et risque de cancer	8
3.3.1 Lien biologique entre radiation et cancer	9
3.3.2 Études épidémiologiques examinant ce lien	9
3.3.3 Forme du lien	10
3.3.4 Estimation des paramètres	11
3.3.5 Estimation d'effet	12
3.4 Dose limite et réglementation	12
4 EXPOSITION À LA RADIATION ET CONSÉQUENCES	14
4.1 Exposition à la radiation	14
4.1.1 Radiation ionisante de source naturelle	14
4.1.2 Radiation ionisante artificielle de source non-médicale	16
4.1.3 Radiation ionisante artificielle de source médicale	16
4.1.4 Ensemble des contributions à l'exposition québécoise à la radiation	19
4.1.5 Effet cancérigène potentiel : première approximation théorique	20
4.2 La TDM au Québec	20
4.2.1 Nombre d'examens	21
4.2.2 Doses efficaces	23
4.2.3 Doses efficaces pédiatriques	24
4.2.4 Estimation du nombre de cancers secondaires à la TDM au Québec	26
4.2.5 Décès par cancer dus à la TDM	27
5 STRATÉGIES D'ATTÉNUATION DU RISQUE	30
5.1 Appréciation de la dose	33
5.2 Appréciation du risque	35
5.3 Appréciation de l'équilibre entre risque et bénéfice	38
6 CONCLUSION	43
6.1 Limites de l'étude	44
6.2 Retour sur le mandat	44

ANNEXE A	Stratégies de recherche documentaire	47
ANNEXE B	Demande de données de la RAMQ sur les examens TDM.	49
ANNEXE C	Questionnaire sur les pratiques radiologiques visant à réduire les radiations ionisantes associées à la TDM au CHU Ste-Justine.	53
ANNEXE D	Précisions sur les unités de dose pour la TDM.	54
ANNEXE E	Calcul de l'incidence du cancer et de la mortalité due au cancer, en fonction du sexe, de l'âge et du type d'examen de TDM.	55
RÉFÉRENCES	60

Liste des tableaux

Tableau 1	Facteurs de pondération (w_R) en vue d'établir la dose équivalente.	5
Tableau 2	Facteurs de pondération en vue d'établir la dose efficace.	6
Tableau 3	Unités employées pour décrire les doses de radiation.	6
Tableau 4	Doses annuelles admissibles pour les travailleurs selon les organismes de protection contre la radiation.	13
Tableau 5	Doses efficaces de sources naturelles par personne dans le monde.	15
Tableau 6	Résumé des sources de radiation et des doses naturelles et artificielles* reçues au Québec.	19
Tableau 7	Nombre d'actes de TDM, au Québec, en 2009	21
Tableau 8	Nombre d'actes de TDM, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans, au Québec, en 2009	22
Tableau 9	Distribution des actes de TDM, chez les 0 à 19 ans par rapport aux adultes, au Québec, en 2009	22
Tableau 10	Recensement des doses efficaces (en mSv par personne) pour les TDM, moyenne par région anatomique, et doses retenues aux fins de la présente analyse	23
Tableau 11	Doses collectives efficaces par TDM, en personne-Sv, selon la région anatomique, par catégorie d'âge chez les 0 à 19 ans et pour tous les âges, au Québec, en 2009	25
Tableau 12	Distribution des doses collectives efficaces dues à la TDM, pour les jeunes de 0 à 19 ans par rapport aux adultes, au Québec, en 2009.	25
Tableau 13	Nouveaux cas de cancer par an dus à la TDM, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans, et pour tous les âges, au Québec, en 2009.	27
Tableau 14	Décès par cancer dus à la TDM, par an, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans et pour tous les âges, au Québec	28
Tableau 15	Facteurs ayant le potentiel de varier l'estimation centrale du nombre de décès par cancer par an dus à la TDM au Québec	29
Tableau 16	Table de concordance comparant les doses naturelles avec les doses efficaces typiques dues à des examens d'imagerie diagnostique (radiographie traditionnelle, radioscopies, examens communs en TDM et en médecine nucléaire) dans les années 2000	35
Tableau 17	Nombre de cas de cancer associés à différentes doses efficaces, par 100 000 personnes exposées, par sexe et par catégorie d'âge	36
Tableau 18	Nombre d'examens nécessaires pour causer un cas de cancer associé à la TDM, par sexe et par catégorie d'âge.	37
Tableau 19	Indications de TDM ou d'IRM pour maladies pulmonaires	40
Tableau E-1	Nombre d'examens de TDM par sexe et par groupe d'âge	56
Tableau E-2	Valeur de la dose population en personne-Sv	57
Tableau E-3	Nombre de cas de cancer (à vie) associés à l'exposition aux examens de TDM en 2009 au Québec	58
Tableau E-4	Décès dus aux cancers causés par les radiations associés aux examens de TDM passés au Québec en 2009.	59

PRÉFACE



Les progrès technologiques en imagerie ont transformé la pratique de la médecine dans les dernières années en rendant possibles des diagnostics de plus en plus précis. Ainsi, les techniques de tomodensitométrie, associant la numérisation des images à la puissance de l'informatique, ont permis d'obtenir une qualité d'image extraordinaire. Ces progrès ont été obtenus au prix de fortes doses de radiation, les doses absorbées étant de l'ordre de 100 fois plus élevées que les doses des radiographies traditionnelles. L'essor de cette nouvelle technologie a donc suscité des inquiétudes sur les effets cancérigènes de la radiation médicale, notamment auprès des enfants et des jeunes compte tenu de leur radiosensibilité accrue, de leur plus longue espérance de vie et de la possibilité que les doses de radiation reçues puissent être supérieures chez cette clientèle.

Le présent rapport a été préparé à la demande de la Direction de la lutte contre le cancer, devenue la Direction québécoise du cancer en 2011, qui s'interrogeait sur les risques cancérigènes et ses conséquences associées à la tomodensitométrie chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans. Il s'agit d'une revue de la littérature sur les preuves scientifiques actuellement disponibles concernant l'association entre la radiation et le cancer. Un portrait de l'exposition des jeunes québécois à la radiation due à la tomodensitométrie et une évaluation de ces conséquences cancérigènes y sont présentés. Finalement, on a identifié des stratégies permettant de profiter des avantages de cette technologie en produisant le moins de cancers secondaires possible.

Juan Roberto Iglesias, m.d., M. Sc.,
président-directeur général

L'AVIS EN BREF

Le développement de la radiologie diagnostique a permis de pratiquer des examens de plus en plus précis et, du même coup, de réduire les doses de radiation associées aux examens. Or, le recours accru à ces examens dans la pratique médicale et la venue de nouvelles technologies diagnostiques telle que la tomodensitométrie (TDM) exposent la population à une dose collective de plus en plus forte. Il a été estimé que la tomodensitométrie représente environ 50 % des radiations médicales diagnostiques dans la population générale.

Le présent rapport résume la littérature sur le lien entre les radiations ionisantes et le cancer. Il présente les concepts et les unités de mesure pertinentes ainsi que les preuves épidémiologiques concernant le lien de causalité entre les radiations et le cancer. Une attention particulière a été portée aux études ayant comme sujet les enfants et les jeunes de moins de 20 ans. À partir des données du registre de la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ) de 2009, et d'un modèle d'association publié, le nombre de nouveaux cas de cancer, et de décès dus à ces cancers qui se produiraient chez les personnes exposées pendant toute leur vie, a été estimé.

Au Québec, selon les données de la RAMQ pour l'année 2009, 888 000 examens de TDM ont été pratiqués, dont moins de 4 % (32 668) chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans. En utilisant le modèle du BEIR VII, nous pouvons estimer que ces tomodensitométries pratiquées en 2009 pourraient causer 184 décès chez les personnes examinées, dont 11 chez les personnes ayant entre 0 et 19 ans lors de leur examen.

Si on peut estimer très approximativement l'ampleur des risques associés à la TDM, il est beaucoup plus difficile d'évaluer l'étendue des bienfaits de cette technologie. En effet, il est possible que la justesse des diagnostics établis grâce à la TDM permette de sauver beaucoup de vies, quoique cela demeure impossible d'évaluer. En pratique, il incombe aux producteurs d'images de réduire le plus possible les doses associées aux examens (l'optimisation) et aux cliniciens de faire appel à la TDM seulement dans les cas où les bénéfices l'emportent sur les inconvénients (la justification). Ce principe est plus facile à énoncer qu'à mettre en application, ce que le rapport illustre par quatre situations cliniques où l'ampleur des avantages et des inconvénients est considérée.

L'INESSS conclut que des mesures doivent être entreprises afin de limiter les dangers liés à la radiation, tout en maintenant les nombreux avantages que ces technologies offrent aux patients. Ces mesures incluent :

- la formation et la sensibilisation des professionnels à ces enjeux,
- l'information aux médecins pour l'aide à la prise de décision concernant le recours à un examen de TDM,
- le développement des standards de dosimétrie,
- l'élaboration de lignes directrices sur les indications des différentes techniques d'imagerie, et
- la mise en place de mesures d'assurance de la qualité en milieu clinique et radiologique.

Dans ce contexte dynamique, ces mesures doivent être continuellement mises à jour pour permettre aux patients de profiter du maximum des avantages des nouvelles technologies d'imagerie, tout en réduisant le risque de provoquer des cancers qui sont inévitablement liés aux radiations ionisantes.

COLLABORATEURS

Lecture externe

La lecture externe est un des mécanismes importants utilisés par l'INESSS pour assurer la qualité de ses travaux. Les lecteurs externes valident les aspects méthodologiques de l'évaluation, de même que l'exactitude du contenu, en fonction de leur domaine d'expertise propre.

Pour ce rapport les lecteurs externes sont :

Hervé Brisse, radiologue, Groupe radioprotection de la société francophone d'imagerie; Service de radiodiagnostic, Institut Curie, Paris (France)

Sylvain Deschênes, physicien médical, Centre hospitalier universitaire mère-enfant, CHU Ste-Justine

Harley Eisman, pédiatre, Directeur médical du Service d'urgence, Hôpital de Montréal pour Enfants (CUSM)

Rénauld Lemieux, physicien médical, Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke (CHUS)

Sylvain Leduc, médecin spécialiste en santé publique, Agence de la santé et des services sociaux du Bas St-Laurent

Normand Nadon, physicien médical, Hôpital du Sacré-Coeur de Montréal

Yves Patenaude, radiologue pédiatrique, Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke (CHUS)

Divulgence de conflits d'intérêts

Aucun conflit à signaler.

Responsabilité

L'Institut assume l'entière responsabilité de la forme et du contenu définitifs du présent document. Les conclusions et recommandations ne reflètent pas forcément les opinions des lecteurs externes ou des autres personnes consultées dans le cadre de ce dossier.

RÉSUMÉ

Le développement de la radiologie diagnostique a permis de pratiquer des examens de plus en plus précis et, du même coup, de réduire les doses de radiation associées aux examens. Or, le recours accru à ces examens dans la pratique médicale et la venue de nouvelles technologies ont provoqué l'exposition de la population à une dose collective de plus en plus forte. Il a été estimé que la TDM représente environ 50 % des radiations médicales diagnostiques dans la population générale; 25 % seraient dus à la médecine nucléaire, tous les autres examens radiologiques (radiographies, scopies, TEP, etc.) étant responsables des 25 % restants [Fazel *et al.*, 2009; Mettler *et al.*, 2008a].

Le présent rapport a été préparé à la demande de la Direction québécoise du cancer (DQC), qui s'interrogeait, d'une part, des risques cancérogènes associés à la TDM diagnostique chez l'enfant et le jeune adulte et, d'autre part, des options d'imagerie disponibles et des moyens pris pour diminuer les risques associés à la TDM. La DQC demandait de cibler les enfants et les jeunes, compte tenu de leur radiosensibilité accrue, de leur plus longue espérance de vie et de la possibilité que les doses reçues puissent être supérieures chez cette clientèle.

Les dimensions étudiées concernent le lien entre les radiations associées à la pratique diagnostique médicale et le cancer. Après avoir passé en revue le lien entre des radiations et le développement du cancer, ainsi que la quantification des doses reçues (dosimétrie), les questions suivantes se posent :

- Quelle est la meilleure estimation de l'importance de l'utilisation de la TDM au Québec chez les enfants et les jeunes, avec de l'information sur : i) le nombre d'examens par groupe d'âge; ii) la dose efficace associée à ces examens; iii) les contributions des différents examens de TDM; et iv) la comparaison de ces doses aux autres sources de radiation;
- Quelle est l'estimation de la cancérogenèse, relativement aux nouveaux cas de cancer (incidence) et aux décès (mortalité), associée à la TDM chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans au Québec?

La présente revue résume la littérature sur le lien entre radiations ionisantes et cancer. Elle présente les concepts et les unités de mesures pertinentes, ainsi que les preuves épidémiologiques concernant le lien de causalité entre les radiations et le cancer. Pour bien faire ressortir les zones de consensus ou de débat, la recherche de la littérature a été faite dans les bases de données de publications scientifiques primaires ainsi que dans des revues systématiques, de 2000 à 2010, sans restriction linguistique. Une attention particulière a été portée aux études ayant comme sujet les enfants et les jeunes de moins de 20 ans et concernant la radiation associée à la TDM. Un bilan des différentes expositions à la radiation de source naturelle a été dressé, selon les informations disponibles à l'échelle mondiale, canadienne et québécoise. Une estimation similaire a été produite pour la radiation de source artificielle, principalement de source médicale.

À partir des données fournies par la RAMQ pour 2009, et en utilisant un modèle d'association publié dans la littérature scientifique, le nombre de nouveaux cas de cancer et de décès dus à ces cancers qui se produiraient pendant toute la vie des personnes exposées a été estimé. Ces estimations sont comparées à d'autres déjà produites pour le Québec, ailleurs au Canada et aux États-Unis.

On constate que moins de 4 % des examens de TDM réalisés au Québec, en 2009, sont faits auprès d'enfants et de jeunes de 0 à 19 ans sur un total d'environ 888 000 examens. Ce pourcentage varie selon la région anatomique examinée. Les données indiquent que chez l'adulte, c'est l'abdomen qui est responsable de 35 % des actes de TDM (26 % en abdomen et pelvis, 8 % en thorax et abdomen, 1 % en abdomen seul), alors que chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans, c'est plus souvent la tête qui est la région investiguée.

Aussi mineur soit-il, le risque associé à des milliers d'examens réalisés chaque année laisse présager un certain nombre de cancers. En appliquant un modèle d'estimation avec des ajustements en fonction de la

distribution des groupes d'âge et de l'état de santé des personnes recevant les examens de TDM, Berrington de González et ses collaborateurs [2009] arrivent à une estimation de 14 500 décès par an aux États-Unis (l'équivalent d'environ 360 décès au Québec). On applique un calcul analogue ici pour arriver à une estimation plus appropriée pour le Québec en 2009, en se servant de l'information sur le volume d'examens par site anatomique et leurs distributions selon l'âge et le sexe.

Afin d'estimer la carcinogenèse chez les enfants, le nombre d'examens et les doses efficaces associées aux différents examens TDM pédiatriques ont été utilisés avec l'hypothèse fondamentale que ces doses sont similaires aux doses adultes. Ainsi, 1,7 million d'enfants et de jeunes de moins de 20 ans représentaient 22 % de la population québécoise en 2009. Les 32 668 examens de TDM chez ces enfants et jeunes représentaient 3,7 % des examens de TDM faits à tout âge et 2,5 % des doses efficaces associées à ces examens.

Le lien entre radiations et cancer est bien établi, mais la quantification exacte des effets demeure un sujet de controverse, en particulier pour les doses de moins de 100 mSv qui sont typiques de la pratique médicale. Pour nos estimations, nous utilisons le modèle du BEIR [NRC, 2006] qui suppose qu'il y a un lien linéaire entre les doses reçues et la probabilité du cancer. L'application de ces doses à une population de patients peut surestimer l'effet cancérigène qui se produira chez des personnes ayant parfois une espérance de vie limitée. Berrington de González et ses collaborateurs [2009] a réduit de 11 % son estimation du risque de cancer, sur la base des personnes décédant du cancer dans les cinq ans suivant leur examen, et de 9 % en éliminant les examens faits chez des personnes ayant déjà un diagnostic de cancer. En appliquant la réduction de 20 % proposée par Berrington de González, on obtient une estimation de l'ordre de 300 nouveaux cas de cancer (nombre estimé par notre modèle : 286 nouveaux cas de cancer et 184 décès), dont une vingtaine chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans (nombre estimé par notre modèle : 24 cas de cancer et 11 décès chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans).

À titre de comparaison, on peut mentionner qu'en 2009, on estimait qu'il y aurait eu 44 200 nouveaux cas de cancer au Québec et 20 100 décès liés au cancer, ce qui représente une proportion de 35 % des 57 200 décès par toute cause au Québec. L'évolution démographique fera en sorte que ces chiffres augmenteront rapidement dans les 2 ou 3 décennies à venir. Le nombre de cancers qui pourraient éventuellement découler de la pratique de la TDM au Québec représente donc une faible proportion par rapport au nombre total de cancers.

Les estimations concernant le nombre de cas de cancer et le nombre de décès dus au cancer sont tributaires de plusieurs hypothèses, et des variations raisonnables de ces hypothèses peuvent facilement générer des estimations environ deux fois plus hautes ou plus basses. Cette analyse quantitative n'a considéré que les effets négatifs de l'imagerie par TDM, qui peuvent être quantifiés par estimation. Par contre, il est beaucoup plus difficile de chiffrer la morbidité et la mortalité que les 32 668 examens de TDM ont pu éviter, grâce à un diagnostic plus précoce ou plus précis de maladies graves.

Dans le cas des examens de TDM, l'attitude médicale traditionnelle veut que l'équilibre entre les effets positifs et négatifs penche nettement du côté des effets positifs. On devrait peut-être nuancer cette attitude en reconnaissant le risque cancérigène, tout en insistant sur l'importance de l'information diagnostique obtenue. Le défi de la bonne pratique tomographique est de s'assurer que cela soit le cas, dans chacune des indications cliniques où elle est employée. Deux grandes voies permettent d'obtenir cette prépondérance des effets positifs : **l'optimisation** de la performance de la TDM et **la justification** des examens.

Globalement, le risque associé aux radiations diagnostiques est reconnu depuis le début de la pratique de la radiologie et de la médecine nucléaire. Historiquement, le contrôle de ce risque, au moyen de la radioprotection et par l'usage judicieux de ces technologies, a régulièrement suivi l'évolution des techniques existantes. L'avènement de la TDM, comportant des doses beaucoup plus élevées que celles de la radiographie simple, a amené de nouvelles initiatives pour harmoniser les pratiques avec cette nouvelle réalité, notamment pour la clientèle pédiatrique. On peut prendre comme exemple le mouvement *Image Gently* de 2006, les initiatives de la FDA en collaboration avec les manufacturiers du début de 2010 et le code de sécurité 35 de Santé Canada de 2009. Dans la présente analyse, un survol a été fait des mesures retrouvées dans la littérature

médicale qui visent à limiter les dangers liés à la radiation, tout en maintenant les nombreux avantages que ces technologies offrent aux patients. Ces mesures incluent :

- la formation et la sensibilisation des professionnels à ces enjeux,
- l'information aux médecins pour l'aide à la prise de décision concernant le recours à un examen de TDM,
- le développement des standards de dosimétrie,
- l'élaboration de lignes directrices sur les indications des différentes techniques d'imagerie, et
- la mise en place de mesures d'assurance de la qualité en milieu clinique et radiologique.

Dans ce contexte dynamique, ces mesures doivent être développées et soutenues pour permettre aux patients de profiter du maximum des avantages que ces technologies promettent, et pour réduire le risque de provoquer des cancers qui sont inévitablement liés aux radiations ionisantes.

SUMMARY

COMPUTED TOMOGRAPHY AND ITS CARCINOGENIC EFFECTS IN CHILDREN AND YOUTH IN QUÉBEC: SCOPE OF THE ISSUE AND PROPOSED STRATEGIES

Developments in diagnostic radiology have made it possible not only to perform increasingly precise scans and but also to reduce their associated radiation doses. Yet the growing use of these scans in medical practice and the advent of new technologies expose the population to an increasingly high collective dose. Computed tomography (CT) has been estimated to account for roughly 50% of diagnostic medical radiation in the general public, with another 25% due to nuclear medicine, and the remaining 25% due to all the other radiological tests (conventional radiography, fluoroscopy, PET, etc.) [Fazel et al., 2009; Mettler et al., 2008a].

This report was prepared at the request of the Direction québécoise du cancer (DQC), which was especially interested in several issues: the cancer-related risks of diagnostic CT in children and young adults; available imaging options; and the means taken to reduce CT-related risks. The DQC asked us to focus on children and youth, given their increased sensitivity to radiation, their longer life expectancy, and the possibility that absorbed doses may be higher in these patients.

The aspects studied concerned the link between cancer and radiation from diagnostic medical procedures. Our examination of the link between radiation and cancer development, and of the quantification of absorbed doses (dosimetry), raised the following questions:

- What is the best estimate of the extent of CT use in children and youth in Québec? What information is there on (i) the number of scans per age group; (ii) the effective dose associated with these scans; (iii) the contributions of the different CT scans; and (iv) radiation doses delivered in CT compared with those from other radiation sources?
- What is the estimated carcinogenesis, specifically, the number of new cancer cases (incidence) and deaths (mortality) associated with CT in children and youth below the age of 20 years in Québec?

This review summarizes the literature on the link between ionizing radiation and cancer. It presents relevant concepts and measurement units, along with epidemiological evidence on the causal link between radiation and cancer. To clearly highlight the areas of consensus or debate, we performed a literature search

in the databases containing primary scientific articles and systematic reviews published from 2000 to 2010, with no restriction as to language of publication. Special attention was paid to studies addressing CT-related radiation in children and youth below the age of 20 years. An estimate of different exposures to natural radiation sources is provided based on information available worldwide, in Canada and in Québec. A similar estimate was produced for artificial radiation sources, primarily from medical procedures.

We used data supplied by the RAMQ for 2009 and a dose-effect relationship model published in the literature to estimate the number of new cancer cases and cancer-related deaths potentially occurring during the lifetime of those exposed to CT radiation. These estimates were compared with others previously produced for Québec, the rest of Canada and the United States.

It was found that less than 4% of the CT scans done in Québec in 2009 were performed in children and youth aged 0 to 19 years, from a total of approximately 888,000 scans. This percentage varied with the anatomical site examined. Data indicate that 35% of CT procedures in adults were abdominal (26% for abdomen and pelvis, 8% for chest and abdomen, 1% for abdomen alone), whereas the head was the most common area of investigation in children and youth below the age of 20 years.

No matter how small, the risk associated with the thousands of scans performed each year suggests that a certain number of cancers are likely to occur. By applying a risk model adjusted for age distribution and for the health status of people undergoing CT scans, Berrington de González et al. [2009] derived an estimate of 14,500 deaths per year in the U.S. (equal to approximately 360 deaths in Québec). An analogous calculation was applied here to derive a more appropriate estimate for Québec in 2009, based on information on CT scan volume per anatomical site and per age-sex distribution.

For estimating carcinogenesis in children, the number of scans and the effective doses associated with different pediatric CT scans were used under the basic assumption that pediatric doses are similar to adult doses. In 2009, 1.7 million children and youth below the age of 20 years

accounted for 22% of the Québec population. The 32,668 CT scans in these children and youth accounted for 3.7% of those performed for all ages, and for 2.5% of the effective doses associated with these scans.

The link between radiation and cancer is well established, but the exact quantification of its effects remains a topic of controversy, especially for doses less than 100 mSv, which are typical in medical practice. For our estimates, we used the BEIR model [NRC, 2006], which assumes a linear relationship between the doses received and the probability of developing cancer. The application of these doses to a patient population may overestimate the carcinogenic effect produced in people who may sometimes have limited life expectancies. Berrington de González et al. [2009] reduced their cancer risk estimate by 11%, accounting for people who die from cancer within five years of their scans, and by 9% by eliminating the scans performed in people who had already been diagnosed with cancer. By applying the 20% reduction proposed by Berrington de González, we obtained an estimate on the order of 300 new cancer cases (estimate produced with our model: 286 new cancer cases and 184 deaths), including twenty or so in children and youth below the age of 20 years (estimate produced with our model: 24 cancer cases and 11 deaths in children and youth below the age of 20 years).

By comparison, we estimated that in 2009 there would have been 44,200 new cancer cases in Québec and 20,100 cancer deaths, accounting for 35% of the 57,200 deaths from all causes in Québec. Changing demographics will cause these figures to rise rapidly over the next two or three decades. The number of potential CT-induced cancers in Québec therefore accounts for only a small proportion of the total number of cancers.

Estimates of the number of cancer cases and the number of cancer-related deaths are dependent upon various assumptions, and reasonable variations in these assumptions may easily generate estimates roughly twice as high or twice as low. This quantitative analysis considered only the negative effects of CT imaging, which may be quantified by estimation. However, it is much more difficult to measure the morbidity and mortality that these 32,668 CT scans may have prevented, owing to earlier or more accurate diagnoses of serious diseases.

In the case of CT scans, the conventional medical attitude is to expect positive effects to significantly outweigh negative effects. This attitude should perhaps be tempered by recognizing the cancer risk associated

with these scans, while emphasizing the importance of the diagnostic information they yield. The challenge of implementing best practices in CT is to make sure that this is the case for each clinical indication for which it is used. Two major strategies may help ensure the preponderance of positive effects: **optimization** of CT performance and **justification** of the use of CT scans.

Internationally, the risk associated with diagnostic radiation has been recognized since the advent of radiology and nuclear medicine. Historically, risk control, through radiation protection and the judicious use of these technologies, has kept pace with developments in the available techniques. The advent of CT, which delivers much higher radiation doses than conventional radiography, has led to new initiatives for aligning practices with this new reality, especially for pediatric patients. Examples include the Image Gently movement launched in 2006, the FDA's collaborative initiatives with manufacturers early in 2010, and Health Canada's Security Code 35 introduced in 2009. The present analysis provides an overview of the measures found in the medical literature that are designed to limit radiation-related dangers, while preserving the many benefits that these technologies offer to patients. These measures include:

- providing professional training and awareness about the issues;
- producing information to help physicians make decisions about the use of CT scans;
- developing dose-rate standards;
- developing guidelines on the indications for the different imaging techniques; and
- implementing quality-assurance measures in clinical and radiology facilities.

In this dynamic environment, these measures must be developed and supported to allow patients to take full advantage of the promising benefits of these technologies and to reduce the risk of inducing cancers that is inevitably linked to ionizing radiation.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AAPM	American Association of Physicists in Medicine
ACR	American College of Radiology
ACTP	Angioplastie coronarienne transluminaire percutanée
AEC	Automatic exposure control (réglage automatique de l'exposition)
ALARA	As Low As Reasonably Achievable (au niveau le plus bas pouvant raisonnablement être atteint)
APIBQ	Association des physiciens et ingénieurs biomédicaux du Québec
ATCM	Automatic tube current modulation (modulation automatique du courant)
BEIR	Biological Effects of Ionizing Radiation
Bq	Becquerel, unité SI de désintégration nucléaire
C	Coulomb
CAR	Canadian Association of Radiologists / Association canadienne des radiologistes
CATCH	Canadian Assessment of Tomography for Childhood Head injury
CCS	Conseil canadien de la santé
CE	Communauté européenne
CHU	Centre hospitalier universitaire
Ci	Curie, unité de désintégration nucléaire
CT	Computed Tomography (TDM : tomodensitométrie)
CTDI	CT dose index (indice de dose TDM)
D	Dose absorbée
DDREF	Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor
DLP	Dose Length Product (produit dose longueur)
DRL	Diagnostic reference level (NRD : niveau de référence diagnostique)
E	Dose efficace
EAR	Excess Absolute Risk
EPA	Environmental Protection Agency (États-Unis)
ERR	Excess Relative Risk
eV	Électron-volt
FDA	Food and Drug Administration (États-Unis)
Gy	Gray, unité SI de dose absorbée
H	Dose équivalente
HPS	Health Physics Society
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICIS	Institut canadien d'information sur la santé

ICRP	International Commission on Radiological Protection
IRM	Imagerie par résonance magnétique
J	Joule
keV	Kiloélectron-volt, unité d'énergie
kV, kVp	Kilovolt, kilovolt maximal; mesures du voltage
LDRL	Local Diagnostic Reference Level
LET	Linear Energy Transfer (transfert linéaire d'énergie)
LNT	Linear Non-Threshold (modèle linéaire sans seuil)
LSPQ	Laboratoire de santé publique du Québec
LSS	Life Span Study (Japon)
mA	Milliampère; mesure de courant
mAs	Milliampère-seconde; mesure de charge
MeV	Mégaélectronvolt, unité d'énergie
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux (Québec)
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements (États-Unis)
NRC	National Research Council
NRD	Niveau de référence diagnostique (DRL : diagnostic reference level)
OPL	Occupational permissible limit
PECARN	Pediatric Emergency Care Applied Research Network
PERC	Pediatric Emergency Research Canada
Personne-Sv	Unité de dose collective, la somme des doses reçues par les individus d'une population
PQDCS	Programme québécois de dépistage du cancer du sein
Q	Quality factor
R	Roentgen
RAMQ	Régie de l'assurance maladie du Québec
RBE	Relative Biological Effectiveness
RC	Rapport de cotes
RSNA	Radiological Society of North America
SI	Système international d'unités
SCC	Société canadienne du cancer
Sv (mSv, nSv)	Sievert, unité SI de dose équivalente ou de dose efficace (millisievert, nanosievert)
TDM	Tomodensitomètre (appareil) ou tomodensitométrie (examen), selon le contexte
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UV	Rayonnement ultraviolet, radiation partiellement ionisante appartenant au spectre électromagnétique entre $\sim 10^{15}$ et 10^{16} Hz
w_R	Facteur de pondération, lié à la radiosensibilité des organes
w_T	Facteur de pondération, lié à la qualité des radiations

1.1 Historique

Quelques années après la découverte des rayons-X par Roentgen, en 1895, et de la radioactivité par Becquerel, en 1896, les effets cancérigènes de ces radiations ionisantes ont été reconnus, par le rapport Frieben [1902], grâce à un cas de carcinome de la peau chez un travailleur dans une usine produisant des tubes à rayon X. Avec la multiplication des usages diagnostiques et thérapeutiques des rayons X et les nouvelles professions associées à la production de ces images, on a rapidement observé des cancers chez les technologues en radiologie, les radiologistes et les patients ayant absorbé de fortes doses de radiation. Vers 1910, la cancérogenèse associée à la radiation a été reconnue et les premiers organismes d'autorégulation en radiologie ont été mis sur pied, avec la production de lignes directrices cherchant à protéger les travailleurs et le public des effets négatifs de la radiation [Serwer, 1976; Hesse, 1911].

Le développement de la radiologie diagnostique a permis d'obtenir des examens de plus en plus précis, et du même coup, on a pu réduire les doses de radiation associées aux examens. Or, le recours accru à ces examens dans la pratique médicale a provoqué l'exposition de la population à une dose collective de plus en plus forte [Mettler *et al.*, 2008c; Brenner et Hall, 2007; Brenner *et al.*, 2003; UNSCEAR, 2000].

Débutant dans les années 70, les techniques de tomodensitométrie (TDM) associant la numérisation des images à la puissance de calcul des nouveaux ordinateurs a rendu possible des progrès spectaculaires de la qualité des images. Le premier tomodensitomètre au Canada était installé à l'Institut neurologique de Montréal, en 1973. Ensuite, le parc technologique de tomodensitomètres au Canada a pris de l'expansion grâce à l'acquisition de dix nouveaux appareils par année, pour un total de 465 en 2009, dont 123 au Québec [CCS, 2010, p. 27-28]. En 2009, plus de 4 millions d'examen de TDM ont été effectués au Canada, soit une augmentation de 58 % en comparaison à 2003. Il en résulte donc un taux de 121 examens de TDM par 1000 habitants au Canada en 2009 avec un taux variant entre les provinces (Québec : 128,2), ce qui est de l'ordre de 53 % du taux aux États-Unis. Encore une fois, ces augmentations ont été obtenues au prix de plus fortes doses de radiation, les doses absorbées étant de l'ordre de 100 fois plus élevées que les doses des radiographies traditionnelles, et l'essor de cette nouvelle technologie a ravivé des inquiétudes sur les effets cancérigènes de la radiation médicale (par exemple, Brenner et Hall [2007], Brenner et ses collaborateurs [2001]).

L'enfant est plus vulnérable aux radiations à plusieurs égards. D'abord, les données épidémiologiques indiquent que, pour une même dose de radiation, l'enfant a deux à quatre fois plus de risque de développer un cancer [UNSCEAR, 2000]. Sa plus longue espérance de vie lui donne aussi une plus grande probabilité d'en vivre les séquelles, et ainsi de perdre des années de vie. Enfin, si la dose de radiations n'est pas adaptée au poids et à la taille de l'enfant, un même examen peut comporter plus d'irradiation chez lui. Ainsi, Brenner et ses collaborateurs [2001] estimaient qu'aux États-Unis, les examens de TDM chez les jeunes de 0 à 15 ans constituaient 4 % de la dose totale provenant de la radiologie diagnostique, mais produiraient 20 % des décès par cancer associés à la radiation.

1.2 Mandat

En janvier 2009, la Direction de la lutte contre le cancer (maintenant devenue la Direction québécoise du cancer), de la Direction des affaires médicales et universitaires du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, a demandé à l'AETMIS (maintenant devenue l'INESSS) de produire un avis sur les preuves scientifiques liées aux effets des radiations sur le risque de développer un cancer. Les sujets mentionnés incluaient les risques associés à la TDM et aux autres moyens diagnostiques, la progression de l'utilisation de ces technologies, les technologies à privilégier afin de réduire les radiations inutiles, les radiations attribuables aux autres sources (par ex. fluoroscopie), ainsi qu'une table de concordance avec les doses de radiations des différents examens.

Le 23 juin 2009, ainsi que lors d'une rencontre le 11 février 2010, ce mandat a été précisé; il a été demandé de cibler davantage la TDM. En effet, on estime [Mettler *et al.*, 2008a] que la TDM représente environ 50 % des radiations médicales diagnostiques dans la population générale; 25 % seraient dus à la médecine nucléaire, tous les autres examens radiologiques (scopies, graphies, etc.) étant responsables du dernier 25 %. De plus, il a été demandé de cibler la jeune clientèle (de 0 à 19 ans), compte tenu de leur radiosensibilité accrue, de leur plus longue espérance de vie et de la possibilité que les doses reçues soient supérieures chez les jeunes.

Les questions précises sont les suivantes :

- Quels sont les risques cancérogènes associés à la TDM diagnostique chez l'enfant et le jeune adulte?
- Si ces examens diagnostiques sont justifiés, y a-t-il une autre option d'imagerie et sinon, est-ce que tous les moyens sont pris pour diminuer les risques?

Les dimensions étudiées concernent le lien entre les radiations associées à la pratique diagnostique médicale et le cancer. Après avoir passé en revue notre compréhension du lien entre des radiations et le développement du cancer, ainsi que la quantification des doses reçues (dosimétrie), on voudra savoir :

- Quelle est notre meilleure estimation de l'importance du recours à la TDM au Québec chez les enfants et chez les jeunes, sur le plan :
 - du nombre d'examens par groupe d'âge;
 - de la dose efficace associée à ces examens;
 - des contributions des différents examens de TDM;
 - de la comparaison de ces doses aux autres sources de radiation.
- Quelle est l'estimation de la cancérogenèse, en termes de nouveaux cas de cancer (incidence) et de décès (mortalité), associée à la TDM chez les enfants et les jeunes au Québec?
- Quelles sont les façons d'atténuer le nombre de cancers causés par les radiations diagnostiques?
 - Exemples de démarches cliniques, dans des contextes cliniques spécifiques, pour réduire cette exposition.

À noter que l'optimisation technologique des appareils de TDM et le contrôle de la qualité seront évalués séparément par le Centre d'expertise clinique en radioprotection (CECR) du Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke (CHUS), et ne seront pas approfondis dans la présente analyse.

MÉTHODES DE RECHERCHE ET D'ANALYSE

Revue de la littérature

Cette revue vise d'abord à résumer la littérature sur le lien entre radiations ionisantes et cancer. Elle commence par une revue des concepts et des unités de mesures pertinentes, ainsi que des preuves épidémiologiques concernant le lien de causalité entre les radiations et le cancer. La littérature étant très abondante sur ces questions plutôt générales, nous avons identifié les zones de consensus ou de débat, afin de cibler la recherche de la littérature. Différentes bases de données documentaires ont été consultées dans le but de repérer les études originales et les revues systématiques publiées entre 2000 et 2010. Les mots clés utilisés dans cette recherche se retrouvent dans l'annexe A. Nous avons porté une attention particulière aux études sur la radiation associée à la tomodensitométrie réalisées sur les enfants et les jeunes de moins de 20 ans.

Estimation des doses reçues au Québec

Nous avons dressé un bilan des différentes expositions à la radiation de source naturelle, selon les différentes informations disponibles à l'échelle mondiale, canadienne et québécoise. Nous avons produit une estimation similaire pour la radiation de source artificielle, principalement de source médicale.

Pour évaluer de façon plus précise l'exposition aux radiations associées à la TDM, nous avons obtenu des données de la banque de la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ), organisme responsable du paiement de la vaste majorité des examens faits au Québec. Nous avons préparé un plan d'analyse qui visait à établir le volume d'actes de TDM entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 2009. Les codes d'actes retenus, extraits du Manuel de facturation de la RAMQ, section V, Radiologie diagnostique, sont les suivants : 8255 et 8256, 8258 à 8269, 8274 à 8277, 8290 à 8294, 8434 à 8441. La RAMQ nous a transmis les données sous forme de tableaux représentant les volumes de ces actes, présentés selon l'âge (groupes d'âge de cinq ans) et le sexe. Le plan d'analyse complet se retrouve dans l'annexe B.

Estimation d'effet chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans au Québec

À partir des données fournies par la RAMQ, et en utilisant un modèle d'association disponible dans la littérature [NRC, 2006], nous avons estimé le nombre de nouveaux cas de cancer et de décès dus à ces cancers qui se produiraient pendant la vie des personnes exposées aux radiations lors d'examens de tomodensitométrie. Ces estimations ont été comparées à d'autres estimations déjà produites pour le Québec, ailleurs au Canada et aux États-Unis.

Recensement des stratégies de réduction

Nous avons recensé des responsabilités en matière de réglementation, d'analyse, de production de lignes directrices en vigueur au Québec. À titre d'illustration, nous avons résumé quatre exemples de démarches cliniques tirés de la littérature.

Questionnaire pour un établissement

Pour vérifier jusqu'à quel point les établissements se préoccupent de l'enjeu de la radiation, mettent en place des mesures pour limiter l'exposition des enfants et des jeunes de moins de 20 ans, et respectent les lignes directrices existantes sur la pratique de la TDM, nous avons consulté le CHU Sainte-Justine pour obtenir un exemple de pratique en TDM pédiatrique. Le questionnaire préparé à cette fin se retrouve à l'annexe C.

3.1 La radiation

La radiation est définie comme étant le processus par lequel l'énergie provenant d'une source traverse la matière ou l'espace. Selon un fondement de la mécanique quantique, cette énergie présente simultanément des propriétés d'ondes et de particules; cette dualité onde-particule représentant des façons de voir une même réalité.

Au point de vue biologique, l'aspect important de cette radiation est son potentiel ionisant, c'est-à-dire, le degré dans lequel elle transfère assez d'énergie à un atome pour arracher un électron de son orbite autour du noyau¹. C'est le propre des radiations électromagnétiques qui ont des photons avec plus de 30 eV d'énergie ou, ce qui est équivalent, qui ont des ondes mesurant moins de 30 nanomètres, ou une fréquence de plus de 10 petahertz². Les radiations ionisantes incluent donc le rayonnement ultraviolet (UV-B et UV-C, avec fréquence de $\sim 10^{15}$ à 10^{16} hertz), les rayons X (fréquence de $\sim 10^{16}$ à 10^{21} hertz) et les rayons gamma ($> \sim 10^{19}$ hertz). La distinction entre rayons-X et rayons gamma est historique et correspond à leur production, les rayons X étant produits par des machines, les rayons gamma par des processus de désintégration nucléaire, c'est-à-dire la désintégration d'un noyau radioactif³.

Les unités de mesure utilisées pour quantifier les doses de radiation font l'objet de la section suivante.

3.2 Mesurer la radiation

3.2.1 Unités de dose

La radiation ionisante exerce son effet nocif en déplaçant un électron, créant un atome chargé (un ion). L'exposition à la radiation en radiographie était donc mesurée initialement par le roentgen (R), défini comme étant la quantité de radiation nécessaire pour créer une charge de 1 Coulomb par kilogramme de masse d'air traversée par la radiation gamma. C'est une mesure d'exposition utile surtout dans l'étalonnage des équipements qui génèrent des rayons X. Il s'agit donc d'une mesure d'exposition, et non pas d'absorption, et ne sera pas utilisée plus loin dans cette analyse.

Il est devenu plus clair, avec le temps, que les dommages causés aux organismes vivants étaient plus étroitement liés à la quantité d'énergie absorbée qu'à la charge créée par la radiation. On a donc commencé à rapporter le nombre de joules (J) par unité de masse de tissu exposé, d'abord avec le rad, et maintenant avec le gray (Gy). Un (1) gray laisse un joule d'énergie par kilogramme de tissu exposé (1 rad, l'unité abandonnée, est égal à 0,01 Gy). Cette propriété est appelée **dose absorbée (D)**.

La radiation provenant de la désintégration nucléaire peut être mesurée en becquerels par mètre cube (Bq/m^3), ce qui est une façon pratique de quantifier des sources de radiation naturelle ou des expositions en médecine nucléaire. Lors de chaque désintégration, il y a émission d'une particule énergétique. Des radiations à grosses particules, c'est-à-

1 Les atomes ayant une importance clinique sont ceux qui se trouvent dans une molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN).

2 Petahertz : le préfixe peta multiplie l'unité devant laquelle il est placé par 10 à la puissance quinze ou un quadrillion (1 000 000 000 000 000). (Termium Plus).

3 Depuis l'avènement des technologies de production de rayons-X à plus haute fréquence, et aussi la découverte de rayons gamma à plus basse fréquence, il y a chevauchement entre leurs plages de fréquence.

dire à particules alpha (noyaux d'hélium), à particules beta (des électrons) ou à protons (noyaux d'hydrogène), causent plus d'ionisation dans les tissus qu'elles traversent que les radiations gamma (des photons). Pour une même dose absorbée (mesurée en gray), on observe que les rayonnements à grosses particules, qu'on appelle aussi des rayonnements *high-LET* (*Linear Energy Transfer*; transfert linéaire d'énergie), ont plus de potentiel cancérigène que les rayonnements *low-LET*, comme la TDM par exemple. Ce rapport entre énergie transférée et dommages tissulaires est connu par des expériences sur des tissus. Il est exprimé par plusieurs noms et acronymes, comme la RBE (*relative biological effectiveness*), le facteur de qualité (*quality factor*, Q), ou le facteur de pondération selon la radiation (*radiation weighting factor*, w_R)⁴. Les facteurs de pondération w_R sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Facteurs de pondération (w_R) en vue d'établir la dose équivalente

Particule	Niveau d'énergie	w_R
Photon	Rayon X	1
	Rayon gamma	1
Électron	Tous	1
Neutron	<10 keV	5
	10 keV-20 MeV	10
	>20 MeV	5
Proton	Tous	2
Alpha	Tous	20

keV : kiloélectron-volt ; MeV : mégaélectron-volt

Ainsi, des particules alpha (par exemple, lors de la désintégration du radon) causent environ 20 fois plus de tort aux tissus humains que les radiations de type gamma (par exemple, les rayons X comme la TDM). En multipliant la dose absorbée (en gray, donc en J/kg) par ce facteur de pondération (sans unité), on obtient la « **dose équivalente (H)** » (ou « équivalent de dose »), avec son unité spéciale, le sievert (Sv). Il est à noter que, pour les rayons X, ce facteur $w_R = 1$, donc une dose absorbée exprimée en gray (1 J/kg) donnera la même quantité de dose équivalente, exprimée en sievert (aussi 1 J/kg).

Enfin, toutes les parties du corps n'ont pas la même sensibilité aux rayonnements ionisants. Les études épidémiologiques, faites auprès de personnes ayant subi une exposition partielle du corps, ont permis d'établir des coefficients de pondération w_T , ce qui permet d'estimer le nombre de cancers qu'un examen radiologique pourrait induire. Puisque ces coefficients n'ont pas de dimension, le produit de cette opération retient les mêmes dimensions que la dose équivalente, c'est-à-dire le sievert. Cette propriété est appelée **dose efficace (E)** (*effective dose*). Les facteurs de pondération w_T nécessaires pour ce calcul sont résumés dans le tableau 2.

⁴ Historiquement, le facteur w_R a été distingué de Q parce que w_R était $Q \times N$, le facteur N permettant de pondérer pour différents types de tissu, chez l'humain et chez d'autres espèces. Ce facteur N est maintenant abandonné, et la vulnérabilité de différents tissus est considérée lors de la pondération utilisée dans le calcul de la dose efficace.

Tableau 2 : Facteurs de pondération en vue d'établir la dose efficace

Parties du corps	w_T	Σw_T
Moelle osseuse (rouge), côlon, poumons, estomac, sein, autres organes*	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Vessie, œsophage, foie, thyroïde	0,04	0,16
Surface osseuse, cerveau, glandes salivaires, peau	0,01	0,04
Total		1,00

Abréviations : w_T : facteur de pondération; Σw_T : somme des facteurs de pondération de chaque organe

* Autres organes : surrénales, région extra thoracique, vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscles, muqueuse buccale, pancréas, prostate (♂), intestin grêle, rate, thymus, utérus/col de l'utérus(♀); le facteur de pondération est 0,12 pour l'ensemble de ces autres organes.

Source : ICRP, 2007, p. 68.

Par exemple, pour une femme subissant une mammographie à deux incidences, on pourrait mesurer une dose absorbée de 5 mGy. La mammographie étant produite avec des rayons X, le facteur $w_R = 1$, et la dose équivalente serait de 5 mSv ($5 \text{ mGy} \cdot 1 \text{ mSv/mGy}$). Enfin, si la mammographie exposait uniquement les seins, avec leur w_T à 0,12, il y aurait une dose efficace de $5 \text{ mSv} \cdot 0,12 = 0,6 \text{ mSv}$. Si les seins et la thyroïde étaient exposés, on multiplierait la dose équivalente par la somme des $5 \cdot \Sigma w_T$, on aurait donc une dose efficace de $5 \cdot (0,12+0,04) = 0,8 \text{ mSv}$. C'est la façon d'obtenir la dose efficace en tenant compte de la radiosensibilité de chaque organe lorsque plusieurs parties du corps sont exposées à la radiation. Le tableau 3 présente les unités associées à la radiation et leurs équivalences.

Tableau 3 : Unités employées pour décrire les doses de radiation

Propriété	Unité (symbole)	Équivalence en unités SI	Ancienne unité (symbole)	Équivalence en unités SI
Ionisation de matière	coulomb par kilogramme (C/kg)	s.o.	roentgen (R)	$2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$
Désintégration nucléaire	becquerel (Bq)	seconde ⁻¹	curie (Ci)	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Dose absorbée (D)	gray (Gy)*	1 J/kg	rad	0,01 Gy
Dose équivalente (H)	sievert (Sv) *	$w_R \cdot D$	rem	0,01 Sv
Dose efficace (E)	sievert (Sv)*	$\Sigma w_T \cdot H$	rem	0,01 Sv

Abréviations : D : dose absorbée; s.o. : sans objet; SI : système international; w : facteur de pondération

* Le gray et le sievert étant des doses élevées, on emploie régulièrement les multiples qui sont mGy et mSv (10⁻³) ou même µGy et µSv (10⁻⁶).

L'usage de la dose efficace offre l'avantage de permettre la comparaison d'examen touchant à des degrés variables les différentes parties du corps. Ce concept de dose efficace est critiqué [Brenner, 2008], du fait que le choix des coefficients w_T dépend d'une appréciation subjective de la littérature scientifique sur les conséquences de la radiation⁵. Également, la dose efficace n'est pas ajustée pour l'âge ni le sexe, et prête à confusion, du fait qu'on utilise la même unité (le sievert) que pour la dose équivalente. Néanmoins, en l'absence d'une option qui obtient un consensus, cette unité représente une façon de comparer des examens de nature différente et de les placer dans le contexte

5 Deux versions de ces coefficients sont en usage; une version produite en 1990 (ICRP-60) et une mise à jour publiée en 2007 (ICRP-103).

des autres sources de radiation, d'où son usage dans tous les ouvrages qui cherchent à comparer et à analyser l'effet de la radiation médicale, comme le rapport du Comité UNSCEAR publié en 2000. Comme nous le verrons plus loin, il est possible d'utiliser cette unité, conjointement avec des coefficients de cancérogenèse, pour produire une estimation du risque d'un examen radiologique donné.

Au-delà de ces unités d'usage général, il y a aussi des unités qu'on utilise en TDM. Le document de l'APIBQ [2009, p. 31-38] et d'autres sources [Siemens Healthcare, 2010; McCollough *et al.*, 2009; Smith-Bindman *et al.*, 2009; AAPM, 2008] ont fortement inspiré le résumé de dosimétrie présenté à l'Annexe D. Deux indices de référence sont importants pour l'estimation des doses efficaces : le CTDI (*CT Dose Index* ou indice de dose TDM) et le DLP (*Dose Length Product* ou produit dose longueur).

Si on ramène les calculs de dose efficace au niveau de la population, on introduit la notion de dose collective, qui est la somme des doses efficaces reçues par les individus d'une population, souvent exprimée en personne-sievert. Elle permet d'estimer la dose reçue à l'échelle d'une population en tenant compte du nombre annuel d'examens et de la dose efficace moyenne. En divisant par le nombre d'individus de la population, on obtient la dose individuelle moyenne.

En dosimétrie, on retrouve aussi la notion de NRD (niveau de référence diagnostique ou DRL, *Diagnostic Reference Level*). Ce sont des niveaux de référence établis statistiquement en faisant des relevés de doses dans une pratique (NRD locaux ou *local DRL*), dans une région, dans un pays ou même au niveau international. Ces relevés sont à faire pour chaque type d'examen et pour chaque type d'appareil, pour les examens les plus courants. Ces NRD servent uniquement de guide pour réduire les doses administrées aux patients et tenter d'optimiser les pratiques. Elles ne sont toutefois pas des doses réglementaires, encore moins des normes ou des seuils établissant une distinction entre bonne et mauvaise pratique. Elles servent à établir une valeur seuil au-delà de laquelle les doses sont trop fortes. Le 75^e percentile est utilisé par plusieurs pays et est la valeur en dessous de laquelle on retrouve 75 % des mesures. Il faut noter qu'avec l'évolution de la technologie, ces NRD doivent être mis à jour périodiquement et établis pour tout nouvel équipement.

Cette diversité d'unités est peut-être partiellement responsable de la confusion qui règne chez le public et même chez les professionnels de la santé sur l'ampleur des doses de radiation associées aux expositions naturelles et médicales. La situation est bien résumée par une physicienne de la clinique Mayo : « we have too many concepts, terms and trade names. In particular, we need to agree on how to define or describe CT dose and agree on the terms used for such units. » [Bertell *et al.*, 2007]. Dans l'analyse qui suit, nous privilégierons l'usage du mSv pour décrire les doses efficaces et pour estimer leur effet sur la santé.

3.2.2 Dosimétrie

La dosimétrie est la science de l'estimation des quantités de doses de radiation reçues par un humain [Amis *et al.*, 2007]. Dans la pratique de la dosimétrie, on peut estimer la dose en se basant sur des calculs, ou en se basant sur l'irradiation d'un fantôme (un objet de composition standard, le plus souvent fait en polystyrène), ou encore, on peut parfois la mesurer directement sur un fantôme anthropomorphique équipé de détecteurs de radiation. Une dosimétrie faite en temps réel pour chaque examen comporte certaines difficultés techniques, mais constitue la pratique idéale. Cependant, les estimations trouvées dans la littérature se basent principalement sur des calculs résultant de tests

périodiques sur des fantômes ou d'approximations basées sur des calculs qui utilisent des paramètres d'exposition, tels le voltage (en kV) et la charge (en mAs) [Huda et Vance, 2007].

Par exemple, le PQDCS (Programme québécois de dépistage du cancer du sein) publie la dose moyenne des différents centres de dépistage désignés par le programme [LSPQ, 2008]. En 2008, la dose moyenne par mammographie était de 1,9 mGy; cela veut dire que, lorsque le physicien procède à l'évaluation annuelle des équipements, il produit une estimation de la dose que le fantôme recevrait, estimation qui est basée sur les paramètres techniques (kVp, mAs) utilisés pour exposer le fantôme. Cette dose rencontre les normes du programme (moins de 3 mGy par mammographie par projection), mais on ne sait pas quel est la quantité de radiation absorbée ou reçue par une femme donnée, ou même la moyenne pour l'ensemble des femmes. Une comparaison faite au Royaume-Uni a démontré que la dose auprès des patientes était environ 42 % plus élevée que la dose au fantôme [Young *et al.*, 2002], illustrant l'importance de mesurer la radiation auprès des patients et non uniquement auprès d'un fantôme.

En TDM, de façon semblable, on utilise un fantôme et on mesure des facteurs techniques comme le kV et le mAs lors de l'exposition d'un fantôme ou d'un patient pour produire une estimation de la dose, de la DLP ou de la CTDI par exemple. L'étude de l'APIBQ [2009] se démarque en recensant les paramètres techniques en vigueur lors de vrais examens chez 100 patients consécutifs. Les équipements de TDM récents facilitent cette pratique en enregistrant les paramètres techniques utilisés lors de chaque examen.

3.3 Lien entre radiation ionisante et risque de cancer

Il ne fait pas de doute que les techniques modernes d'imagerie médicale fournissent des informations cliniques de première importance pour détecter la maladie, poser un diagnostic sans ambiguïté sur sa nature et son extension, choisir le meilleur traitement et suivre l'évolution de la maladie et l'efficacité de la thérapie. Pour plusieurs maladies, la détection précoce, un diagnostic plus exact et un meilleur suivi de la thérapie à l'aide des techniques d'imagerie peuvent avoir un effet considérable sur la morbidité, sur les possibilités de traitements alternatifs et sur l'amélioration de la longévité tout en évitant des traitements inutiles basés sur un diagnostic inexact.

Toutefois, il y a aussi un large consensus scientifique voulant que le rayonnement ionisant est un cancérigène. L'instance qui fait figure d'autorité internationale sur les cancérigènes, la International Agency for Research on Cancer (IARC) classe les rayons X et les rayons-gamma parmi les 28 cancérigènes certains [Siemiatycki *et al.*, 2004], signifiant qu'il existe des preuves suffisantes de leur cancérigénicité pour l'homme [IARC, 2000].

Les conséquences délétères des radiations ionisantes dépendent de la dose de radiation reçue. À des doses élevées (au-delà d'environ 1 000 mSv), il y a suffisamment de dommages pour que des cellules meurent, ce qui résulte en un syndrome appelé syndrome d'irradiation aiguë. À la phase aiguë, on peut observer différents symptômes, tels que diarrhées, nausées, vomissements, anorexie et érythème, suivis quelques semaines plus tard par des problèmes hématologiques, gastro-intestinaux, respiratoires et cutanés. Puisque ces effets se produisent chez la plupart des personnes exposées, on les appelle effets obligatoires ou *déterministes*.

À des doses moindres, en deçà des doses nécessaires pour tuer des cellules, les radiations peuvent quand même résulter en modifications cellulaires, notamment au niveau de l'ADN au noyau cellulaire. Les cellules ainsi modifiées peuvent devenir cancéreuses

après plusieurs années, des études de suivi démontrant une augmentation statistique du risque de cancer, la probabilité de ces effets croissant avec l'intensité de la dose. Ces effets sont donc appelés des effets aléatoires ou *stochastiques*.

3.3.1 Lien biologique entre radiation et cancer

Les mécanismes exacts de l'action délétère des radiations sur les cellules humaines sont complexes et, en partie, inconnus. En général, on croit que les rayons X produisent des électrons libres lorsqu'ils interagissent avec des atomes dans les tissus humains⁶. Ces électrons peuvent briser d'autres molécules, et parfois la molécule brisée est une molécule d'ADN. Dans ces cas, malgré la présence de processus cellulaires de réparation d'ADN, un certain pourcentage des bris des deux brins de la molécule d'ADN va résulter en une mutation génétique. Certaines de ces mutations peuvent amorcer le processus de développement du cancer, en particulier lorsque le gène en question résulte en un gain de fonction (conversion de proto-oncogènes en oncogènes) ou lorsqu'il est responsable de mécanismes de contrôle de la division (désactivation d'un gène de suppression de tumeur). In vitro, on a observé une relation linéaire dose-effet sur le nombre de mutations génétiques, dans les doses absorbées typiques d'une exposition médicale (<100 mGy), et cet effet ne serait pas influencé par d'éventuels effets « bystander » ou adaptatifs⁷.

Tel que le résume Brenner et ses collègues [2003], dans les quantités de radiation typique des rayons X diagnostiques (doses efficaces de moins de 100 mSv), la plupart des noyaux cellulaires ne seront pas traversés par plus d'un électron, leurs effets seront donc indépendants des effets produits par d'autres électrons. On ne s'attend pas à des effets qualitativement différents en réduisant la dose, un argument qui suggère que le risque des effets de la radiation devrait varier de façon linéaire, sans seuil, jusqu'à des doses arbitrairement basses.

3.3.2 Études épidémiologiques examinant ce lien

L'expérimentation sur des êtres humains étant bien sûr impossible, une partie de notre connaissance du lien entre radiation et cancer provient principalement des études d'observation où l'on compare des personnes qui ont été exposées à de fortes doses de radiation à des personnes ayant subi moins d'exposition. Il n'est pas notre intention, dans cette revue, de recenser et d'examiner la volumineuse littérature scientifique sur le lien général entre la radiation et le cancer. De telles revues sont régulièrement effectuées par des groupes de chercheurs spécialisés, dont les plus connus sont ceux du groupe de travail des Nations Unies [UNSCEAR, 2000], de l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis [EPA, 2011] et de la National Academy of Sciences des États-Unis [NRC, 2006]. Nous résumons ici les connaissances actuelles provenant de ces groupes d'experts.

La plus importante de ces études est la *Life Span Study (LSS)*, une étude observationnelle ayant suivi une cohorte de 120 000 personnes qui se trouvaient à proximité des explosions des deux bombes nucléaires à Hiroshima et à Nagasaki en 1945. Cette étude a permis de suivre un grand nombre de personnes des deux sexes et de tout âge, sans sélection préalable sur la base d'une maladie ou d'une occupation. La *Life Span Study* a fait l'objet de plusieurs rapports, le plus récent étant le treizième, portant sur la mortalité

6 Cette affirmation et les explications suivantes sont principalement tirées de *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation : BEIR VII Phase 2* [NRC, 2006].

7 L'effet « bystander » est celui où une cellule endommagée a un effet sur une autre cellule non-irradiée [NRC, 2006, p. 45]; l'effet adaptatif est celui par lequel la radiation provoque une augmentation des défenses réparatrices d'une cellule (p. 50).

due au cancer jusqu'à la fin de 1997 (Preston 2003). Puisqu'on connaît exactement l'endroit où les bombes sont tombées, et puisque tous les résidents se rappellent très bien exactement où ils se trouvaient à ce moment fatidique, il a été possible d'établir avec beaucoup de précision les doses reçues, la dose moyenne étant à peu près réduite de deux fois pour chaque 200 mètres de l'hypocentre. Dans cette étude, il a été possible d'examiner l'effet de doses de radiation qui sont comparables aux doses reçues lors d'exams médicaux, 40 % des sujets ayant reçu moins de 5 mSv de radiation, ce qui se compare à la dose reçue lors d'une TDM abdominale (environ 8 mSv). Cette étude est particulièrement utile pour estimer l'effet à long terme d'une dose de radiation reçue en bas âge [Preston *et al.*, 2003], du fait que 41 % de la cohorte avait moins de 20 ans lors des explosions.

Si la LSS constitue l'étude la plus importante pour estimer le lien entre radiation et cancer, il y a aussi des études examinant l'effet de la radiation dans des contextes médical, occupationnel et environnemental. En particulier, les études sur les expositions médicales et occupationnelles permettent souvent d'obtenir des résultats spécifiques à un site anatomique qui a reçu une prépondérance de la radiation. En général, ces études donnent des résultats qui sont cohérents avec ceux obtenus par la LSS [NRC, 2006; Preston *et al.*, 2003].

3.3.3 Forme du lien

Le modèle d'association entre radiation et cancer le plus souvent cité est celui du comité américain BEIR, dont le plus récent rapport (BEIR VII, phase II) a été publié en 2006 par le National Research Council (NRC). Un large consensus existe sur le risque de cancer et les faibles doses de radiation ionisante avec l'approche linéaire sans seuil (LNT, en anglais, pour *linear, no threshold*). Ce modèle stipule que l'on demeure à risque quel que soit la dose, si petite soit elle, et que le risque est le produit de la dose multipliée par une constante [EPA 2011; NRC, 2006; UNSCEAR, 2000; NCRP, 1993; ICRP, 1991]. Cette voie sera retenue pour le présent rapport; on note toutefois la présence d'une certaine controverse en raison d'une épidémiologie complexe relative aux faibles doses de radiation ionisante [Semelka *et al.*, 2007].

Dans le modèle linéaire sans seuil, on postule qu'il y a un rapport direct entre la dose équivalente (en sievert) et le risque de cancer ou de mortalité due au cancer pendant la vie. Ce risque est généralement exprimé en risque relatif excédentaire (ERR) ou en risque absolu excédentaire (EAR). Comme nous l'avons déjà mentionné, les données utilisées pour choisir un modèle et pour estimer les paramètres proviennent principalement de l'étude LSS.

Pour les cancers solides, le comité BEIR a choisi un modèle linéaire entre radiation et risque, c'est-à-dire que le risque (exprimé par exemple en ERR) est une fonction linéaire croissante avec la dose D exprimée en sieverts : $ERR = D \cdot \beta \cdot \exp(\gamma e^*) \cdot (a/60)^\eta$, les β , γ , e^* , a et η étant toutes des constantes. Avec ce modèle, chaque unité supplémentaire de radiation D ajoute le même risque; par exemple, si une dose de 100 mSv de radiation augmente le risque de 1 %, alors une dose de 200 mSv augmentera le risque de 2 % [NRC, 2006].

Une autre référence dans le domaine est le comité UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), qui a publié des rapports depuis 1958. Leur plus récent rapport, produit en 2000, réaffirme le consensus voulant qu'il n'y ait pas d'indication d'abandonner le modèle linéaire, ni en vertu des preuves épidémiologiques, ni en raison des mécanismes biologiques (aberrations chromosomiques, mutations

génétiques ou transformation cellulaire in vitro). Le comité conclut qu'il est peu probable que les défenses anti-cancérogènes soient dépendantes de la dose et que, par conséquent, la représentation simple par un modèle linéaire, sans seuil, soit cohérente avec les données mécanistiques et quantitatives.

Certains chercheurs croient que le modèle linéaire sans seuil (LNT) surestime le problème du cancer dû aux radiations. Les uns suggèrent que la preuve sur le lien entre radiation et cancer n'est pas bien établie pour des doses plus faibles qu'un seuil d'environ 100 mSv [Allison, 2006; HPS, 2001]. D'autres avancent le principe d'hormèse, voulant non seulement que les petites doses soient sans effet délétère, mais même que ces petites doses aient un effet favorable [Aurengo *et al.*, 2005; Cameron, 2005; Calabrese et Baldwin, 2003; Sagan, 1987]. Selon cette hypothèse, les petites doses de radiation auraient comme effet de stimuler les défenses de l'organisme, par exemple la réparation de l'ADN brisé, protégeant ainsi contre les mutations cancérogènes liées à la radiation et à d'autres mutagènes.

D'autres chercheurs croient, au contraire, que le modèle BEIR sous-estime les effets des radiations ionisantes. Une analyse récente [Shuryak *et al.*, 2010] des données de l'étude LSS prétend que les risques de cancer induit par les radiations ionisantes ne diminuent pas de façon monotone avec l'augmentation de l'âge, comme il est souvent rapporté. Même s'ils sont faibles, les risques de cancer pour une exposition à l'âge moyen (30-40 ans) pourraient être le double de ce qui a été estimé antérieurement.

On ne sait pas s'il existe une dose en dessous de laquelle la radiation n'a pas d'effet nocif, mais le consensus exprimé dans les rapports UNSCEAR et BEIR veut qu'un tel seuil n'a pas été démontré. On croit donc que la radiation a un effet « stochastique », ce qui veut dire qu'une petite dose, sans avoir un effet prévisible chez une personne donnée, augmente son risque de développer un cancer, ce risque étant une fonction de la dose. Même une petite dose aura l'effet de produire une petite augmentation du risque. Il est important de noter, dans cette analyse qui porte principalement sur la TDM, qu'aucune étude publiée n'a attribué directement le cancer à la TDM. On reconnaît la difficulté de réaliser une telle étude [Brody *et al.*, 2007]. Nous suivons ici le consensus qui veut que la radiation associée à la TDM constitue, sievert pour sievert, une cause du cancer ayant le même lien de causalité que les autres sources de rayonnement ionisant, plus spécifiquement la radiation par rayon X.

3.3.4 Estimation des paramètres

Il est reconnu que la radiosensibilité des organes des enfants est plus élevée que celle de l'adulte. C'est pourquoi on recommande d'éviter d'utiliser chez les enfants les paramètres estimés chez les adultes [Linet *et al.*, 2009]. Chez l'enfant, le risque lié à l'exposition aux rayons X est plus élevé en raison de l'espérance de vie accrue qui laisse au cancer le temps de se manifester. Les filles ont un risque plus élevé que les garçons [NRC, 2006].

Il est aussi possible que les expositions chroniques, comme les expositions chroniques naturelles, soient associées à environ deux fois moins de cancers, si on appliquait un facteur de réduction de l'effet appelé DDREF (*dose and dose-rate effectiveness factor*). Certains auteurs ne considèrent pas qu'une exposition chronique devrait être traitée différemment d'une exposition aiguë, mettant implicitement ce facteur DDREF à un. D'autres réduisent l'effet d'un facteur de 2 ou, comme le BEIR le fait, d'un facteur de 1,5. Par contre, il est difficile de dire si une exposition à la TDM devrait être traitée comme une exposition aiguë ou chronique, ce qui peut aussi dépendre de la façon de

recevoir cet examen; par exemple, un examen annuel comparativement à une seule dose aiguë. Pour une dose aiguë, il est peut-être utile de souligner que l'usage des coefficients du BEIR, autant dans le calcul du risque que dans notre analyse, peut avoir tendance à sous-estimer l'effet, puisque ces coefficients sont calculés avec l'inclusion d'un facteur de réduction des effets de 50 % qui ne devrait peut-être pas s'appliquer à des expositions aiguës.

3.3.5 Estimation d'effet

L'effet d'une dose de radiation dépend de plusieurs facteurs; notamment l'âge, le sexe, le site anatomique et l'espérance de vie de la personne qui reçoit une dose donnée de radiation. Avant de considérer plus finement l'effet selon ces facteurs, on peut mentionner la règle approximative citée dans le plus récent rapport UNSCEAR [2000] qui permet d'estimer le risque pour les personnes exposées à une dose de radiation de développer un cancer mortel au cours de leur vie en raison de cette exposition. Ainsi, une dose de 1 Sv de radiation produit, chez une personne, un risque de décès par cancer de 9 % pour un homme et de 13 % pour une femme, avec un facteur d'incertitude de l'ordre de deux; cela signifie, par exemple, que le risque pour un homme se situerait entre 4,5 % et 18 %, et pour une femme, entre 6,5 % et 26 %. Le risque d'avoir un diagnostic de cancer est d'environ deux fois plus élevé que le risque de décéder d'un cancer. Enfin, le risque, pour un enfant exposé, est d'environ deux fois le risque d'une population composée de personnes de tous âges.

Ces risques sont estimés principalement avec des données provenant d'une population japonaise résidant à Hiroshima et Nagasaki, de tous âges, et qui, contrairement à une population clinique recevant des TDM, n'avait généralement pas de maladies importantes limitant leur espérance de vie. L'usage des examens radiologiques comme la TDM se fait dans un contexte très différent, les patients examinés étant souvent atteints de maladies graves qui limitent l'espérance de vie, comme par exemple le suivi des patients avec cancer métastatique. La gravité de certains de ces cas limite la portée de l'effet cancérogène potentiel d'une exposition à la radiation chez des patients qui ne survivront pas assez longtemps pour développer un cancer secondaire à la radiation.

3.4 Dose limite et réglementation

Des organismes dédiés à la protection contre la radiation ont publié des normes sur les doses admissibles. L'organisme reconnu dans ce domaine, la International Commission on Radiological Protection (ICRP) a défini la dose admissible pour un travailleur comme étant « la dose de radiation ionisante qui, à la lumière de nos connaissances actuelles, ne devrait pas causer un tort appréciable chez une personne durant toute sa vie. » (trad. libre)⁸ [Schubert et Lapp, 1958]. Le niveau de radiation correspondant à cette définition a donc été constamment réduit au fur et à mesure de l'accumulation de connaissances sur les effets à long terme des radiations. Ainsi, la dose admise (OPL, ou *Occupational Permissible Limit*), c'est-à-dire la dose considérée comme étant sans danger, était établie en 1902 à 25 000 mSv par an (2500 rem). Elle a été réduite à 1 000 mSv en 1925 et à 50 mSv en 1956, à la suite de nouvelles connaissances découlant de l'incidence de cancer chez les personnes exposées à de faibles doses de radiation à Hiroshima et à Nagasaki. En 2010, la dose admissible était de 20 mSv pour les travailleurs, et de 1 mSv pour le public en général. Aux États-Unis, le National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) recommande des doses similaires, comme l'indique le tableau 4.

⁸ Traduction libre de la phrase : « a dose of ionizing radiation that, in the light of present knowledge, is not expected to cause appreciable bodily injury to a person at any time during his lifetime ».

Tableau 4 : Doses annuelles admissibles pour les travailleurs selon les organismes de protection contre la radiation

Doses annuelles admissibles	NCRP (États-Unis)	ICRP (international)
Public général	1 mSv	1 mSv
Travailleurs	50 mSv	20 mSv*
Travailleuses enceintes	5 mSv	2 mSv

Abréviations : ICRP : International Commission on Radiological Protection ; mSv : millisievert; NCRP : National Council on Radiation Protection and Measurements

*50 mSv dans un an, moyenne de 20 mSv par an sur 5 ans

Sources : ICRP, 2007; NCRP, 1993.

On remarque que la dose annuelle admissible est différente et plus élevée pour le travailleur, la logique étant que le travailleur, bien informé du risque associé à la radiation, accepte ce risque en contrepartie d'une rémunération associée à son emploi. La limite plus basse pour le public général est donc proposée dans l'esprit que le public général n'a pas consenti à une exposition mettant en danger sa santé et ne tire pas nécessairement de cette exposition un bénéfice qui compenserait les risques.

Ces limites s'appliquent à des sources de radiation non médicales, par exemple, dans l'opération d'une mine ou d'une centrale nucléaire. Elles ne visent pas le public qui reçoit des examens médicaux associés à la radiation, les instances émettant ces normes ayant toujours présumé que le pour et le contre de ces examens doivent être considérés par le patient et son médecin, et qu'une limite fixe irait à l'encontre des intérêts du patient pour qui un examen peut être indiqué.

EXPOSITION À LA RADIATION ET CONSÉQUENCES

4.1 Exposition à la radiation

Dans la nature, la radiation provient de source cosmique ou terrestre. La radiation cosmique provient essentiellement des processus de fusion nucléaire qui ont cours sur les grandes étoiles, dont la nôtre, le soleil. La radiation terrestre provient des éléments radioactifs qui se trouvent dans la croûte terrestre, surtout l'uranium et ses produits de désintégration (notamment le radon). À ces sources naturelles, s'ajoutent la radiation artificielle. Dans les sections qui suivent, la radiation de source naturelle, la radiation artificielle non médicale, et la radiation médicale seront présentées séparément, pour mieux situer la contribution médicale et en particulier celle de la TDM, devenue l'exposition la plus importante.

4.1.1 Radiation ionisante de source naturelle

Alors qu'il y a différentes façons de catégoriser les sources naturelles de rayonnements ionisants, nous suivrons l'analyse du comité UNSCEAR des Nations Unies. Ce comité divise celles-ci en radiation cosmique, provenant de l'espace et arrivant dans notre atmosphère [NCRP, 1987], ainsi qu'en radiation terrestre, cette dernière étant absorbée par l'exposition externe, par ingestion, et par inhalation [UNSCEAR, 2000]. On peut aussi considérer séparément l'exposition par ces mêmes voies, lorsqu'elle est associée spécifiquement à certaines activités industrielles ou commerciales.

Ainsi, on considère que la population mondiale est exposée chaque année à environ 380 μSv provenant des rayons cosmiques, à 10 μSv par des radionucléides cosmogéniques, à 480 μSv par rayonnement terrestre externe, à 310 μSv par ingestion (excluant le radon), et à 1250 μSv par inhalation du radon (incluant le thoron), pour un total arrondi par le UNSCEAR à 2400 μSv par an.

Pour le Canada et le Québec, ces estimations nous paraissent applicables, avec quelques précisions. La moyenne mondiale pour la radiation cosmique constitue une moyenne pondérée entre la radiation reçue au niveau de la mer (environ 270 μSv) et à des altitudes plus élevées. Puisque la quasi-totalité de la population québécoise vit à moins de 100 mètres du niveau de la mer, le niveau québécois est probablement environ 100 μSv plus bas. Une modélisation récente [Chen *et al.*, 2009] indique que le niveau canadien se rapproche étroitement du niveau mondial, avec une moyenne annuelle de 310 μSv ; les provinces atlantiques et le Québec ayant toutes des niveaux de 290 μSv par an.

La moyenne d'exposition à la radiation terrestre est de 480 μSv , mais la moyenne canadienne est beaucoup plus basse, soit 219 μSv par an selon Grasty et LaMarre [2004]; le niveau pour Montréal, la seule ville québécoise mentionnée dans cette étude, était intermédiaire, soit de 278 μSv . Il est donc possible que le niveau québécois soit un peu plus bas que la moyenne mondiale.

En ce qui concerne l'ingestion, presque toute l'exposition est associée à l'ingestion de potassium 40 et des radionucléides des séries uranium et thorium, qu'on retrouve surtout dans le sol associés aux aliments et à l'eau potable [Grasty et LaMarre, 2004]. Or, en absence de données canadiennes sur l'exposition à ces produits ou sur leur ingestion et absorption, nous ne savons pas si cette source d'exposition diffère de la moyenne mondiale.

Enfin, la source principale de radiation naturelle est l'inhalation du radon, principalement le radon 222 mais aussi le radon 220 (thoron). On estime que la moyenne mondiale d'exposition à cette source est de 1250 μSv par an, mais c'est aussi la source qui varie le plus d'un endroit à l'autre. Ainsi, la concentration moyenne du radon à l'intérieur des bâtiments est de 39 Bq/m^3 , avec une moyenne géométrique de 30 Bq/m^3 et un écart-type géométrique de 2,3, signifiant qu'environ 95 % des valeurs se trouvent entre 6 et 159 Bq/m^3 , illustrant la grande variabilité de sa contribution à l'exposition des personnes d'un endroit à l'autre [UNSCEAR, 2000, Annexe B]. Au Canada, on estime que la moyenne arithmétique est de 34 Bq/m^3 , légèrement en dessous de la moyenne mondiale. Par contre, au Québec, une étude provinciale [Lévesque *et al.*, 2005] mesurant le radon dans les maisons rapportait une moyenne (arithmétique) de 64 Bq/m^3 au sous-sol, et de 34 Bq/m^3 au rez-de-chaussée, dans 474 logements situés dans des régions évaluées préalablement comme ne présentant pas de risque de présence de radon à niveau élevé. Sur la base de ces résultats préliminaires, nous estimons que la dose moyenne associée au radon au Québec pourrait être de 10 à 20 % plus élevée que la moyenne mondiale, soit d'environ 1400 μSv par an.⁹

Enfin, un certain nombre de personnes sont exposées à de plus forts niveaux de radiation de source naturelle, à cause de leur occupation ou leur comportement. Les principales expositions occupationnelles ou industrielles identifiées par le UNSCEAR sont le transport aérien (augmentant l'exposition aux radiations cosmiques), ainsi que des activités industrielles touchant des matériaux naturels contenant des isotopes radioactifs, tels le charbon, le méthane (gaz naturel), l'acide phosphorique (les fertilisants) et les sables minéraux (dans la production du ciment). Alors que quelques résidents à proximité de telles activités industrielles peuvent recevoir une exposition de l'ordre de 100 μSv par an, des niveaux de 1 à 10 μSv seraient plus typiques, et ne constituent qu'une contribution négligeable aux doses provenant de toutes sources naturelles.

Le tableau 5, tiré du rapport UNSCEAR [2000], résume ces doses reçues de source naturelle.

Tableau 5 : Doses efficaces de sources naturelles par personne dans le monde

Exposition	Source	Dose efficace moyenne (μSv par an)	Variation typique (μSv par an)
Externe	Cosmique	400	300-1 000
	Terrestre	500	300-600
Interne	Inhalation (surtout radon)	1 200	200-10 000
	Ingestion	300	200-800
Total		2 400	1 000-10 000

Au total, les Québécois sont exposés à des niveaux de radiation provenant de sources naturelles similaires aux niveaux moyens mondiaux. Une exposition légèrement inférieure par radiation cosmique et terrestre externe est peut-être contrebalancée par une exposition légèrement supérieure associée à l'inhalation de produits de dégradation du radon. L'estimation de 2400 μSv semble donc raisonnable, jusqu'à ce que des informations plus précises sur le radon au Québec soient disponibles. Pour permettre de faire une comparaison avec les sources médicales abordées dans les sections suivantes, mentionnons, qu'en 2008, cette radiation naturelle (2,4 mSv par personne) produisait, auprès des 7,8 millions de québécois, une dose collective de 18 603 personne-Sv.

⁹ Pour faire ce calcul, nous utilisons le facteur de conversion recommandé par UNSCEAR, 9nSv par Bq/m^3 par heure, facteur d'équilibre de 0,4, avec 7000 heures d'exposition à l'air intérieur par année.

4.1.2 Radiation ionisante artificielle de source non-médicale

De nombreuses activités humaines libèrent des matériaux radioactifs dans l'environnement, mais ces expositions atteignent généralement un niveau nettement plus bas que les sources naturelles auxquelles toute la population est exposée. Le comité UNSCEAR considère que la source principale provient des essais nucléaires atmosphériques qui ont eu lieu entre 1945 et 1980. Les quelques essais réalisés depuis 1980 ne libèrent que très peu d'isotopes radioactifs, et le niveau de la radiation présente dans l'atmosphère diminue donc, passant de 150 μSv par an à son maximum en 1963, à environ 5 μSv par an en 2000.

Les expositions occupationnelles concernent environ 6,5 millions de travailleurs dans le monde qui sont exposés à une moyenne de 1,8 mSv par an, ce qui est nettement en dessous de la norme occupationnelle américaine de 20 mSv par an. Les principales expositions occupationnelles sont celles qui impliquent une exposition au radon (1 200 000 travailleurs; 4,8 mSv par personne), le transport aérien (250 000 travailleurs; 3,0 mSv par personne), les mines de charbon (3 900 000 travailleurs; 0,7 mSv par personne), les mines autres que celles de charbon (760 000 travailleurs; 2,7 mSv par personne) et la production de l'uranium (800 000 travailleurs; 1,8 mSv par personne) [UNSCEAR, 2000].

La plus importante exposition due à la production d'énergie nucléaire est celle qui a suivi la catastrophe à la centrale nucléaire à Tchernobyl en Ukraine, en 1986. Cet accident a exposé les travailleurs de l'usine à des doses massives de radiations, souvent mortelles, et les habitants de la région à des doses importantes. Même les citoyens des pays européens à l'extérieur de l'Ukraine, le Belarus et la Russie ont reçu des doses allant jusqu'à 1 mSv dans la première année suivant l'accident, mais cette exposition ne serait plus détectable aujourd'hui [UNSCEAR, 2000]. L'accident nucléaire de Fukushima, au Japon, suivant le séisme du 11 mars 2011, a causé d'importants rejets radioactifs, mais nous ne connaissons pas encore l'ampleur des doses absorbées.

Nous n'avons pas de données sur l'exposition des travailleurs québécois, mais si nous postulons qu'ils sont exposés au même niveau que ce qui a cours à l'échelle mondiale, il y aurait une dose collective qu'on estime à seulement 16 personne-Sv, une quantité très faible en comparaison avec les 18 603 personne-Sv d'exposition par source naturelle.

4.1.3 Radiation ionisante artificielle de source médicale

Afin de connaître le niveau de radiations de source médicale reçues par les Québécois, il faudrait connaître les doses reçues par examen et les multiplier par le nombre d'examens pratiqués. Nous pouvons estimer le nombre d'examens en radiologie, mais en l'absence de mesures systématiques des doses reçues par examen, nous ne pouvons qu'estimer la dose totale reçue, en ayant recours à des estimations des doses typiques associées aux mêmes examens produits dans des pays où la médecine se pratique de façon similaire. Les examens diagnostiques associés à des radiations sont la TDM, les autres radiographies (incluant les scopies et les radiographies classiques), ainsi que la médecine nucléaire diagnostique (avec injection d'isotopes). On mentionnera brièvement, à titre de comparaison, les usages thérapeutiques de la médecine nucléaire et de la radiothérapie.

Tomodensitométrie

Nous aborderons de façon brève l'exposition des Québécois à la TDM, en utilisant des données globales sur le volume de TDM, comme nous le ferons pour les autres sources de radiation médicale. Dans une section suivante, nous analyserons plus en détail

la distribution de la TDM au Québec en 2009, selon l'âge et le sexe, avec un regard particulier sur son utilisation chez les enfants et les jeunes.

Selon les données de la RAMQ, il y a eu, au Québec, 888 239 examens de TDM en 2009 et 811 842 l'année précédente (RAMQ, tableau SM.20, 2008). Une étude auprès des 91 établissements québécois ayant un tomodensitomètre en service, réalisée en 2008 par l'Association des physiciens et ingénieurs biomédicaux du Québec (APIBQ), a permis d'estimer la dose efficace associée à ces TDM. Si l'on multiplie le nombre d'examens par cette dose moyenne, nous obtenons une dose collective de 6 698 personne-Sv. En divisant cette dose collective par le nombre d'examens (811 842), on obtient la dose moyenne par examen, soit 7,5 mSv, et en divisant par la population totale du Québec (7 751 000), on obtient **0,9 mSv** par personne en 2009. Cette estimation de la dose serait comparable au 0,79 mSv par personne estimée pour le Canada deux ans avant, en 2007 [Chen et Moir, 2010]. Ces estimations semblent indiquer une exposition environ 40 % plus basse que celle calculée par Mettler et ses collègues [2008c] pour la population des États-Unis (1,5 mSv par personne).

Notons que la pratique de la TDM évolue rapidement, et il est hasardeux de faire des estimations basées sur des données qui ne sont pas très récentes. Ainsi, partout dans le monde, on rapporte une croissance significative du nombre d'examens de TDM au cours des dernières années [UNSCEAR, 2000]. On observe aussi une grande variation (entre 3 et 16 %) de l'usage de la TDM chez les enfants de 0 à 15 ans selon les pays [UNSCEAR, 2000]. Une autre étude rapporte que les examens de TDM chez les enfants constituent un faible pourcentage de tous les examens de TDM réalisés en 1998, moins de 1 % en Suisse et en Allemagne, 2,7 % au Japon et 6,5 % aux États-Unis [Verdun *et al.*, 2008].

En ce qui concerne la dose, certains facteurs ont tendance à augmenter la dose, d'autres, au contraire, ont tendance à la diminuer. L'augmentation du recours à la TDM est une tendance mondiale. Le volume d'examens semble augmenter d'année en année, le nombre d'examens de TDM ayant augmenté de 32 % au Canada entre 2003-2004 et 2006-2007 [ICIS, 2008], et de 28 % au Québec entre 2005 et 2009¹⁰. La croissance rapide du nombre d'appareils de TDM multi-barrettes est généralement associée à une augmentation de la dose [APIBQ, 2009; ICIS, 2008]. Par contre, l'optimisation des paramètres techniques a permis une baisse de dose [Arch et Frush, 2008]. De nouveaux appareils, ayant comme but commun la réduction de la dose, ont démontré le potentiel de réduire les doses entre 44 % et 72 %, tout en améliorant la résolution temporelle et spatiale [Lo *et al.*, 2010]. L'exposition aux rayons X due aux examens de TDM doit donc être considérée comme une cible en évolution.

Autres radiographies

Le comité UNSCEAR [2000] a produit des estimations du volume d'examens radiologiques dans différents pays, incluant les radiographies classiques (rayons X des poumons, des membres, de la colonne vertébrale, du pelvis, de la tête, de l'abdomen, du tractus gastro-intestinal, des voies biliaires), les examens spéciaux (fluoroscopie, urographie, mammographie, angiographie coronarienne transluminale percutanée - ACTP) ainsi que la TDM. Au Canada, on estimait que 4,6 % de tous les examens radiologiques étaient des examens TDM [UNSCEAR, 2000, Annexe D, tableau D-14]. Quoique nous n'ayons pas de données plus récentes au Canada, plus de 10 ans plus tard, il est plus probable que, compte tenu de l'évolution rapide de la TDM, la distribution des examens soit semblable à celle des États-Unis en 2006, où la TDM représentait 17 %

10 Tableaux SM.20, publiés par la RAMQ; examens de TDM : 2005 : 691 962; 2006 : 736 478; 2008 : 785 036; 2009 : 811 842; 2009 : 886 587. Disponibles à : https://www.prod.ramq.gouv.qc.ca/IST/CD/CDF_DifsnInfoStats/CDF1_CnsulInfoStatsCNC_iut/DifsnInfoStats.aspx?ETAPE_COUR=2&LANGUE=fr-CA

des examens et la radiographie traditionnelle représentait 76 % des examens. Si c'était le cas, nous aurions environ 3,8 millions d'examens au Québec (une par année pour deux personnes); la dose moyenne des radiographies classiques étant de 0,3 mSv et pour les radiographies interventionnelles de 7,6 mSv. Nous obtenons une dose collective de 2 880 personne-Sv, ou de 0,4 mSv par personne.

Médecine nucléaire diagnostique

En 2008, selon les données de la RAMQ, il y a eu 744 126 examens de médecine nucléaire au Québec (tableau SM.20). Nous ne disposons pas de données sur la nature de ces examens, mais selon le rapport du groupe d'experts canadien sur la production d'isotopes médicaux¹¹, présenté au ministre des Ressources naturelles du Canada, le 30 novembre 2009, la majorité (60 %) des examens nucléaires au Tc-99m au Canada sont des examens cardiaques (perfusion et fonction), 17 % sont des examens osseux et 23 % sont des examens hépatobiliaires, pulmonaires, des reins, de la thyroïde, et autres. Selon le UNSCEAR [2000], les doses efficaces sont de 5 à 12 mSv pour les scintigraphies du myocarde, et 4mSv pour les scintigraphies osseuses [UNSCEAR, 2000, Annexe D, tableau 42]. Selon les résultats d'une enquête américaine, la dose moyenne par examen est de 11,2 mSv [Mettler *et al.*, 2008b], alors que l'estimation du UNSCEAR [2000] de la dose moyenne par examen est de 4,6 mSv [UNSCEAR 2000, Annexe D, p. 318]. Par ailleurs, Mettler et ses collaborateurs [2008a] rapportent une dose moyenne de 12,8 mSv pour les États-Unis entre 2005 et 2007. Par exemple, si nous prenons la dose moyenne de 11,2 mSv proposée par Mettler et ses collaborateurs [2008b], on obtient une estimation d'une dose collective de 8 334 personne-Sv au Québec. En divisant cette dose collective par le nombre d'examens (744 126), on obtient la dose moyenne par examen, soit 11,2 mSv, et en divisant par la population totale du Québec (7 751 000), on obtient l'exposition moyenne, soit **1,1 mSv** par personne.

Radiothérapie et médecine nucléaire thérapeutique

Dans la plupart des analyses consultées, on se limite à examiner l'exposition à la radiation à usage diagnostique. On justifie une telle restriction par le contexte clinique typique des radiothérapies, souvent utilisées quand le pronostic d'un patient est assez sombre et où l'effet cancérogène éventuel d'une irradiation est minime, l'espérance de vie limitée laissant peu de risques au patient exposé de développer un cancer. Cette catégorie de radiations est brièvement abordée pour deux raisons. D'abord, parce qu'il y a des contextes radiothérapeutiques où l'espérance de vie est assez longue, comme dans le cas d'une radiothérapie associée à des maladies bénignes, et aussi pour des cancers à pronostic favorable; par exemple, après une mastectomie partielle pour cancer du sein ou pour des lymphomes hodgkiniens. Ensuite, parce que cette même réserve s'applique également à plusieurs patients recevant des examens radiologiques diagnostiques; par exemple, les patients chez qui une TDM est indiquée pour connaître l'évolution d'un cancer métastatique. Pour ces raisons, nous incluons ici une estimation brève de la radiation à la fois de sources diagnostiques et thérapeutiques, pour ensuite approfondir la contribution particulière de la TDM.

La médecine thérapeutique emploie la radiation dans deux contextes principaux. Le premier est la radiothérapie, qu'elle soit conventionnelle (utilisant principalement des rayons gamma et des électrons) ou qu'elle soit par particules (par exemple, la protonthérapie, utilisant des protons, ou, plus rarement, la thérapie par faisceau de neutrons). Le deuxième est la médecine nucléaire thérapeutique (principalement

11 *Report of the expert review panel on medical isotope production* (2009). Le rapport complet est disponible à : <http://nrcan.gc.ca/eneene/sources/uranuc/pdf/panrep-rapexp-eng.pdf> (consulté le 24 mars 2011).

l'ablation thyroïdienne par isotope d'iode). La radiothérapie est associée à des doses plus grandes que les applications diagnostiques. Ainsi, des doses typiques pour des traitements de radiothérapie sont de l'ordre de 40 à 60 Gray (Gy) [UNSCEAR, 2000, Annexe D, p. 323], alors que la dose associée à une TDM abdominale est de l'ordre de 10 mGy [Brenner et Hall, 2007], ce qui est environ 5 000 fois moins de radiation.

En médecine thérapeutique, on ne peut pas appliquer le même modèle d'association entre radiation et cancer, à la fois parce qu'il y a des effets qualitativement différents lors de très fortes doses (*cell killing effect*), et parce que l'espérance de vie limite souvent l'effet cancérigène potentiel des traitements de radiothérapie auprès des patients atteints de cancer.

4.1.4 Ensemble des contributions à l'exposition québécoise à la radiation

Les sources naturelles et artificielles de radiation sont résumées dans le tableau 6, afin de permettre une appréciation de leurs contributions respectives, sans considération des sources thérapeutiques.

Tableau 6 : Résumé des sources de radiation et des doses naturelles et artificielles* reçues au Québec

Source	Dose efficace moyenne (mSv/an)	Nombre de personnes exposées (000)	Dose populationnelle		% du total
			totale (personne-Sv/an)	moyenne (mSv/an)	
Naturelle (sauf radon)	1,2	7 751†	9 302	1,2	25 %
Radon	1,2	7 751	9 302	1,2	25 %
Occupationnelle	1,1	13	14	0,002	0 %
	Dose efficace moyenne (mSv/examen)				
TDM (par examen)	7,5	888	6 698	0,9	19 %
Autres examens radiologiques	0,8	3 814	2 880	0,4	8 %
Médecine nucléaire	11,2	744	8 334	1,1	23 %
Total			36 530	4,8	100 %

*n'inclut pas les actes thérapeutiques

† Source : Institut de la statistique du Québec. Population par année d'âge et par sexe, Québec, 1er juillet 2008. Disponible à : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/struc_poplt/201_2008.htm.

Comme le tableau 6 l'indique, les expositions de sources naturelles sont responsables d'environ la moitié de toute la radiation absorbée par la population, avec 2,4 mSv. Les sources médicales font maintenant une contribution aussi importante que la nature, avec 2,4 mSv. La TDM en fait une grande contribution (0,9 mSv), que nous estimons sur la base des données de facturation québécoises. Mais la médecine nucléaire est elle aussi responsable d'une quantité aussi importante (1,1 mSv), en vertu du grand nombre d'examen pratiqués, même si cette estimation doit être qualifiée de préliminaire en l'absence de données sur les doses reçues au Québec. Les autres examens radiologiques contribuent pour environ 0,4 mSv.

4.1.5 Effet cancérigène potentiel : première approximation théorique

Avec ces données sur l'exposition des Québécois à la radiation, il est déjà possible de produire une première estimation du nombre de cancers qui seraient dus à la radiation, de toute source. Suivant la logique résumée dans la section 3.3.4 (estimation d'effet), on peut estimer très approximativement l'effet de la dose collective de 36 530 personne-Sv pour la population québécoise, dont 6 698 personne-Sv associés à la TDM (18,3 %). Selon la règle approximative mentionnée dans le rapport UNSCEAR [2000], une dose aigüe de 1 Sv de radiation sera associée à un risque de mortalité de 9 % à vie pour un homme et de 13 % pour une femme, ce qui voudrait dire que la radiation annuelle au Québec pourrait être responsable d'environ 4 020 décès, si la relation linéaire entre dose et effet tient pour les doses de moins de 100 mGy (ce qui constitue l'hypothèse du modèle LNT). Le même calcul indiquerait que 18,3 % de ces décès (740 décès) seraient directement liés à la TDM, mais cela serait le cas uniquement si les examens de TDM étaient distribués également dans la population, comme la radiation de source naturelle, sans égard à l'âge et l'état de santé. Comme nous verrons plus loin, cette hypothèse de distribution égale des examens de TDM n'est pas valide, et il est préférable de pondérer l'estimation de l'effet cancérigène de la TDM en fonction des facteurs de risque connus. En effet, les patients exposés à la TDM sont en moyenne beaucoup plus vieux et ont une espérance de vie beaucoup plus limitée que la moyenne. Dans l'analyse plus approfondie des effets liés à la TDM, nous essayerons d'apprécier ces facteurs et d'arriver à une estimation plus nuancée.

4.2 La TDM au Québec

L'exposition des québécois à la TDM sera présentée à partir de données globales sur le volume d'examens de TDM. Selon les données de la RAMQ, en 2009, 888 239 TDM ont été pratiqués au Québec¹². Nous analyserons avec plus de détails la distribution des examens de TDM au Québec en 2009, selon l'âge et le sexe, en portant un regard particulier sur la TDM chez les enfants.

Une étude auprès des 91 établissements québécois ayant un appareil de TDM en service, réalisée en 2008 par l'Association des physiciens et ingénieurs biomédicaux du Québec (APIBQ), a permis d'estimer la dose efficace associée à ces appareils. En se basant sur un questionnaire rempli par ces établissements sur 100 examens de TDM consécutifs, on a pu estimer la répartition selon les principales régions anatomiques (tête et cou, thorax, abdomen et pelvis), ainsi que la durée de l'examen, le nombre de séquences par examen, et les paramètres techniques (le courant [mAs], le voltage maximal [kVp], le pas, et la couverture anatomique). Ces informations ont permis aux auteurs d'estimer la DLP. L'indice DLP est ensuite multiplié par des facteurs de conversion (mSv/mGy par cm) selon les régions anatomiques exposées, et selon des calculs par simulation Monte Carlo du groupe ImPACT¹³ [APIBQ, 2009, p. 37].

Soixante-quinze des 91 centres invités à participer ont fourni des données sur 87 appareils de TDM et portant sur 7 617 examens concernant 7 204 patients, dont 248 avaient moins de 16 ans. Les doses efficaces moyennes par examen variaient entre 2,6 mSv pour l'examen de la tête et du cou, et 20,3 mSv pour un examen du thorax, de l'abdomen et du pelvis. Ces doses sont similaires aux doses rapportées en Colombie-Britannique et aux États-Unis [APIBQ, 2009, tableau 21, p. 72].

¹² Ces données n'incluent pas les actes payés directement par le patient; nous n'avons pas de données sur l'ampleur de ce phénomène au Québec. Toutefois, un rapport de l'ICIS [2006] indique que 96 % des examens de TDM non urgents réalisés au Canada en 2005 étaient effectués dans un hôpital ou dans une clinique publique, donc il est probable que les données de la RAMQ représentent la vaste majorité des examens de TDM au Québec.

¹³ Groupe ImPACT : Imaging Performance Assessment of CT Scanners (<http://www.impactscan.org/>).

4.2.1 Nombre d'examens

Afin de préciser les estimations, une demande a été faite à la RAMQ afin d'obtenir les informations sur les volumes d'actes en TDM, facturés par les radiologistes québécois en 2009. Ainsi, les données ont été obtenues pour les 30 codes d'actes de la section TDM du Manuel de facturation de la RAMQ. Ces codes d'actes n'incluent pas la coloscopie virtuelle, ni la TEP-TDM. Le nombre d'actes par région anatomique est présenté au tableau 7.

Tableau 7 : Nombre d'actes de TDM, au Québec, en 2009

Région anatomique	Codes d'actes	Nombre d'actes	%
Tête	8258-9	256 576	28,9
Abdomen et pelvis	8268-9	223 716	25,2
Thorax	8262-3	104 136	11,7
Rachis	8274-5	71 234	8,0
Thorax et abdomen	8255-6	65 889	7,4
Pelvis	8266-7	49 882	5,6
Angiographie TDM	8434-41	38 712	4,4
Cou	8260-1	28 045	3,2
Massif facial	8290	22 653	2,6
Extrémités	8276-7	18 917	2,1
Abdomen	8264-5	7 815	0,9
Cœur	8291-3	665	< 0,1
Total		888 239	100

Source : Données de la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ), 2009.

Cette présentation des données illustre que les examens de TDM sont concentrés sur quatre régions anatomiques : la tête, le thorax, l'abdomen et le pelvis. En redistribuant les examens de régions combinées (thorax et abdomen, abdomen et pelvis), ce sont l'abdomen et le pelvis qui sont le plus souvent examinés, suivis de la tête et du thorax. On remarque aussi une augmentation du total d'examens d'environ 9 % en 2009, si l'on compare avec les 811 842 examens de TDM en 2008.

Ces examens sont distribués très inégalement selon l'âge. Le tableau 8 résume cette distribution par grandes catégories d'âge; des résultats plus détaillés selon l'âge et le sexe se trouvent aussi à l'annexe E.

Tableau 8 : Nombre d'actes de TDM, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans, au Québec, en 2009

Région anatomique	Catégories d'âge				Total	Total	% du total
	0-4	5-9	10-14	15-19	0-19	Tous âges	0-19
Tête	3 022	2 286	3 509	7 428	16 246	256 576	6%
Abdomen et pelvis	290	301	706	3 231	4 529	223 716	2%
Thorax	533	248	378	953	2 112	104 136	2%
Rachis	95	131	480	1 752	2 458	71 234	3%
Thorax et abdomen	106	56	148	517	827	65 889	1%
Pelvis	101	68	190	593	952	49 882	2%
Angiographie TDM	39	5	24	430	498	38 712	1%
Cou	338	204	315	719	1 576	28 045	6%
Massif facial	203	242	316	880	1 641	22 653	7%
Extrémités	57	131	557	974	1 719	18 917	9%
Abdomen	0	5	20	84	109	7 815	1%
Cœur	0	0	0	0	0	665	0%
Total	4 785	3 677	6 644	17 562	32 668	888 239	3,7%

Source : Données de la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ), 2009.

Les enfants et les jeunes de moins de 20 ans représentaient, en 2009, 22,2 % de la population¹⁴. On constate que moins de 4 % des examens de TDM au Québec sont faits auprès de ces enfants et jeunes. Ce pourcentage varie selon la région anatomique, les examens des extrémités, du pelvis, du massif facial, de la tête et du cou étant plus fréquents chez les jeunes que chez les adultes, et les examens de l'abdomen, du thorax, du rachis et du cœur étant moins fréquents. Enfin, la distribution des examens parmi les enfants et les jeunes est un peu différente de la distribution chez les adultes, comme on peut le voir dans le tableau 9.

Tableau 9 : Distribution des actes de TDM, chez les 0 à 19 ans par rapport aux adultes, au Québec, en 2009

Région anatomique	Total 0-19 ans	% du total	Total 20 ans et plus	% du total	Tous âges	% du total
Tête	16 246	50 %	240 330	28 %	256 576	29 %
Abdomen et pelvis	4 529	14 %	219 188	26 %	223 716	25 %
Thorax	2 112	6 %	102 024	12 %	104 136	12 %
Rachis	2 458	8 %	68 775	8 %	71 234	8 %
Thorax et abdomen	827	3 %	65 062	8 %	65 889	7 %
Pelvis	952	3 %	48 930	6 %	49 882	6 %
Angiographie TDM	498	2 %	38 214	4 %	38 712	4 %
Cou	1 576	5 %	26 469	3 %	28 045	3 %
Massif facial	1 641	5 %	21 012	2 %	22 653	3 %
Extrémités	1 719	5 %	17 197	2 %	18 917	2 %
Abdomen	109	0 %	7 706	1 %	7 815	1 %
Cœur	0	0 %	665	0 %	665	0 %
Total	32 668	100 %	855 571	100 %	888 239	100 %

Source : Données de la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ), 2009.

14 Institut de la statistique du Québec. Population par année d'âge et par sexe, Québec, 1er juillet 2009. Disponible à : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/struc_popl/201_2009.htm (consulté le 2 mars 2011).

Ces données indiquent que chez l'adulte, l'abdomen est responsable de 35 % des actes de TDM (26 % en abdomen et pelvis, 8 % en thorax et abdomen, 1 % en abdomen seul), alors que chez les enfants et les jeunes, c'est plus souvent la tête qui est la région examinée.

4.2.2 Doses efficaces

Plusieurs facteurs influencent les doses associées à un examen donné, les plus importants étant liés aux équipements, aux protocoles employés et aux caractéristiques spécifiques des patients ou des groupes de patients examinés. Ainsi, il n'est pas surprenant qu'on recense des doses assez différentes selon les études, les doses publiées variant souvent par un facteur de deux environ. À des fins d'illustration, au Royaume-Uni [Wall et Hart, 1997], un recensement national des doses pour la TDM de la tête donne une moyenne de 2 mSv, la moyenne pour le thorax étant de 8 mSv. Mais on a recensé de grandes variations autour de ces moyennes : les 5^e et 95^e percentiles pour la TDM de la tête étant de 0,9 mSv et de 3,0 mSv, respectivement. Pour le thorax, les 5^e et 95^e percentiles étaient de 2,4 mSv et de 16 mSv, respectivement.

Le tableau 10 résume les sources principales de données sur les doses efficaces associées aux examens de TDM dans différentes études, ainsi que celles que nous avons retenues dans la présente analyse.

Tableau 10 : Recensement des doses efficaces (en mSv par personne) pour les TDM, moyenne par région anatomique, et doses retenues aux fins de la présente analyse

Région anatomique	APIBQ (2009)	Mettler et al. (2008b)	AAPM (2008)	Leswick et al. (2009)	Dose retenue pour cette analyse
Tête	2,6	2	1,5	2,7	2,6
Abdomen et pelvis	12,7	n.d.	11	15,5	12,7
Thorax	7,6	7	n.d.	11,3	7,6
Rachis	n.d.	6	n.d.	n.d.	6
Thorax et abdomen	14	n.d.	n.d.	n.d.	14
Pelvis	7,8	6	n.d.	8,6	7,8
Angiographie TDM	n.d.	16	10	n.d.	10
Cou	2,6	3	n.d.	n.d.	2,6
Massif facial	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,6
Extrémités	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2
Abdomen	12,3	8	6	11,7	12,3
Cœur	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10

Abréviations : AAPM : American Association of Physicists in Medicine; APIBQ : Association des physiciens et ingénieurs biomédicaux du Québec; n.d.: non disponible.

Les doses associées aux examens de TDM inclus dans l'étude de l'APIBQ [2009], estimées au Québec, ont été retenues. Pour les autres examens de TDM, nous avons généralement utilisé les estimations de Mettler et ses collaborateurs [2008b] et de l'AAPM [2008], lorsque disponibles. Alors que la plupart des rapports publiés indiquent les doses associées aux examens les plus communs (tête, thorax, abdomen, pelvis, ainsi que des combinaisons de ces sites anatomiques), les données sont plus rares pour les sites associés aux codes de facturation pour les TDM angiographiques et du cœur, ainsi que pour les TDM du rachis, du cou, du massif facial et des extrémités. Nous avons retenu l'estimation de l'AAPM (2008) pour l'angiographie TDM et pour le cœur. Puisque

la TDM du massif facial est surtout employée pour observer les sinus, et que cette technique implique les mêmes sites que pour la TDM de la tête, nous avons retenu les mêmes données pour le massif facial que pour la TDM de la tête. La TDM des extrémités implique des zones aussi différentes qu'un doigt ou une jambe, avec des doses très variables; nous avons donc retenu une dose moyenne associée à un examen aorto-iliaque (1,6-3,9 mSv) [Willmann *et al.*, 2005], mais les données disponibles ne nous permettent pas d'estimer la fréquence des différents examens des extrémités. Donc, l'estimation de cet examen, représentant environ 2 % des examens de TDM au Québec, est sujette à erreur.

4.2.3 Doses efficaces pédiatriques

Dans le but de préciser les doses de radiation de TDM reçues par les enfants et les jeunes et, par la suite, estimer le nombre de cancers qui peuvent en découler, il est nécessaire d'estimer la dose associée à un examen de TDM pédiatrique. Cette dose peut être plus élevée, mais elle est généralement plus petite que celle qui s'applique à un adulte. Ainsi, lors de l'examen, si l'on utilise les paramètres recommandés pour les adultes, on obtient des doses qui peuvent être de 1,3 à 2,5 fois supérieures aux doses adultes [Huda et Vance, 2007; Khursheed *et al.*, 2002]. Par contre, en ajustant les protocoles et les paramètres (kVp, mAs), il est possible de réduire les doses, parfois par un facteur de deux ou même plus [Fujii *et al.*, 2007; Boone *et al.*, 2003]. Les appareils de TDM multibarrettes que l'on trouve sur le marché aujourd'hui sont généralement équipés de dispositifs d'exposition automatique (AEC : automatic exposure control) ou de modulation automatique du courant (ATCM : automatic tube current modulation) qui s'adaptent à la géométrie corporelle, mais des adaptations spécifiquement pédiatriques ne sont pas universellement disponibles, et les ajustements automatiques sur certains appareils d'imagerie médicale peuvent donner des doses pédiatriques plus élevées [Nivelstein *et al.*, 2010]. Dans l'étude de l'APIBQ, 248 des 7617 examens étaient faits chez les moins de 16 ans, mais les doses efficaces chez cette population n'ont pas été publiées.

Dans cette analyse, et devant l'absence de données sur la dosimétrie de la TDM spécifiquement pédiatrique au Québec, nous ne modifierons pas l'estimation des doses efficaces selon l'âge et le sexe. Étant donné que les doses peuvent être plus fortes lorsqu'elles ne sont pas adaptées aux enfants, ou plus faibles lorsqu'elles le sont, il est possible que la variation des doses d'une clinique à l'autre soit encore plus forte pour les examens pédiatriques que pour les examens adultes, selon la mise en place ou non des protocoles pédiatriques. Il faudra donc prendre en considération, lors de la discussion subséquente, qu'il est possible que nous sous-estimions ou surestimions les doses réelles chez les enfants québécois, ainsi que l'effet cancérigène de ces radiations.

Le tableau 11 précise l'importance relative des examens des différentes régions anatomiques, chez les enfants et les jeunes de 0 à 19 ans et chez l'ensemble de la population du Québec.

Tableau 11 : Doses collectives efficaces par TDM, en personne-Sv, selon la région anatomique, par catégorie d'âge chez les 0 à 19 ans et pour tous les âges, au Québec, en 2009

Région anatomique	Catégories d'âge				Total	Total	% du total
	0-4	5-9	10-14	15-19	0-19	Tous âges	0-19
Tête	7,9	5,9	9,1	19,3	42,2	667,1	6,3 %
Abdomen et pelvis	3,7	3,8	9,0	41,0	57,5	2 841,2	2,0 %
Thorax	4,1	1,9	2,9	7,2	16,1	791,4	2,0 %
Rachis	0,6	0,8	2,9	10,5	14,7	427,4	3,4 %
Thorax et abdomen	1,5	0,8	2,1	7,2	11,6	922,4	1,3 %
Bassin	0,8	0,5	1,5	4,6	7,4	389,1	1,9 %
Angiographie TDM	0,4	0,1	0,2	4,3	5,0	387,1	1,3 %
Cou	0,9	0,5	0,8	1,9	4,1	72,9	5,6 %
Massif facial	0,5	0,6	0,8	2,3	4,3	58,9	7,3 %
Extrémités	0,1	0,3	1,1	1,9	3,4	37,8	9,0 %
Abdomen	0,0	0,1	0,2	1,0	1,3	96,1	1,4 %
Cœur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0 %
Total	20,3	15,3	30,6	101,4	167,7	6 698,2	2,5 %

Ainsi, même si 3,7 % de tous les examens sont faits chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans (tableau 8), ces examens représentent un pourcentage un peu moindre de la dose totale, soit 2,5 %. Ceci s'explique par la distribution différente des examens faits auprès des jeunes et des adultes. Lorsqu'on examine quelles régions contribuent le plus à la dose efficace reçue par les enfants, on observe quelques différences comparativement aux doses reçues par les adultes. Le tableau 12 montre ces différences.

Tableau 12 : Distribution des doses collectives efficaces dues à la TDM, pour les jeunes de 0 à 19 ans par rapport aux adultes, au Québec, en 2009

Région anatomique	Total 0-19 ans		Total 20 ans et plus	
	Personne-Sv	%	Personne-Sv	%
Tête	42	25 %	625	10 %
Abdomen et pelvis	58	34 %	2 784	43 %
Thorax	16	10 %	775	12 %
Rachis	15	9 %	413	6 %
Thorax et abdomen	12	7 %	911	14 %
Pelvis	7	4 %	382	6 %
Angiographie TDM	5	3 %	382	6 %
Cou	4	2 %	69	1 %
Massif facial	4	3 %	55	1 %
Extrémités	3	2 %	34	1 %
Abdomen	1	1 %	95	1 %
Cœur	0	0 %	7	0 %
Total	168	100 %	6 531	100 %

Ainsi, les examens de la tête sont de loin les plus fréquents chez les enfants et les jeunes, mais la TDM de la tête est associée à beaucoup moins de radiations; la TDM de l'abdomen, comportant plus de radiations, est moins fréquente chez les plus jeunes. C'est pourquoi, lorsqu'on considère les doses efficaces, l'abdomen et le pelvis font toujours des contributions importantes, mais chez les plus jeunes, la tête contribue aussi à 25 % de la dose totale, alors qu'elle ne représente que 10 % de la dose chez les adultes.

4.2.4 Estimation du nombre de cancers secondaires à la TDM au Québec

Un petit risque associé à des milliers d'examens réalisés chaque année laisse présager un certain nombre de cancers, que nous avons estimé de façon préliminaire à 740 pour le Québec, sans égard à la distribution d'âge ou à l'espérance de vie. Ces calculs ressemblent à l'estimation brute citée par Berrington de González [2009], voulant qu'il y ait environ 29 000 décès par an chez la population américaine, environ 40 fois plus nombreuse, ce qui serait l'équivalent d'environ 725 décès par an au Québec.

Avec des données sur la distribution des groupes d'âge, et avec certaines informations sur l'état de santé des personnes recevant les examens de TDM, Berrington de González et ses collaborateurs [2009] arrivent à une estimation réduite de moitié, avec 14 500 décès par an (l'équivalent d'environ 360 décès au Québec). Nous poursuivons une logique analogue pour arriver à une estimation plus appropriée pour le Québec, en nous servant des données sur le nombre d'examens et leur distribution selon l'âge au Québec en 2009.

Pour estimer les doses de TDM au Québec, notre estimation doit s'appuyer sur une hypothèse majeure voulant que les doses par examen soient similaires à celles mesurées ailleurs (États-Unis, Europe) (voir tableau 10). Alors que nous avons la dosimétrie de l'étude de l'APIBQ pour la dosimétrie adulte, aucune donnée n'a pu être identifiée pour connaître les doses auxquelles les enfants du Québec sont exposés.

Dans l'analyse suivante, nous avons retenu les doses rapportées par l'APIBQ au Québec, qui semblent conformes aux estimations faites ailleurs. Pour les examens dont la dose efficace n'est pas rapportée par l'APIBQ (rachis, extrémités, par exemple), nous avons surtout eu recours aux estimations produites récemment par Mettler et ses collaborateurs [2008c] aux États-Unis.

Cancers dus à la TDM chez les enfants et les jeunes au Québec

Afin d'estimer la cancérogenèse chez les enfants, nous avons déjà estimé le nombre d'examens et les doses efficaces associées aux différents examens TDM en pédiatrie, avec l'hypothèse que ces doses sont similaires aux doses appliquées aux adultes. Ainsi, les 32 668 examens de TDM réalisés chez les enfants et les jeunes de 0 à 19 ans représentent 3,7 % du total des examens de TDM (tableau 8), et 2,5 % des doses efficaces associées à ces examens (tableau 9).

En appliquant les coefficients de BEIR à ces doses, nous obtenons une estimation du nombre de nouveaux cas de cancer, par type de TDM, par sexe et par groupe d'âge (tableaux 13 et E-3).

Tableau 13 : Nouveaux cas de cancer par an dus à la TDM, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans, et pour tous les âges, au Québec, en 2009

Région anatomique	Catégories d'âge				Total	Total	% du total
	0-4	5-9	10-14	15-19	0-19	Tous âges	0-19
Thorax et abdomen	0,4	0,2	0,4	1,0	2,0	43,9	4,6 %
Tête	2,4	1,3	1,6	2,8	8,2	39,0	21,0 %
Cou	0,3	0,1	0,1	0,3	0,8	4,5	17,7 %
Thorax	1,2	0,4	0,5	1,0	3,2	39,1	8,2 %
Abdomen	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	5,1	3,9 %
Pelvis	0,2	0,1	0,3	0,7	1,3	19,4	6,7 %
Abdomen et pelvis	1,1	0,8	1,6	6,2	9,7	156,0	6,2 %
Rachis	0,2	0,2	0,5	1,5	2,4	25,5	9,4 %
Extrémités	0,0	0,1	0,2	0,3	0,6	2,5	24,0 %
Massif facial	0,2	0,1	0,1	0,3	0,8	4,2	19,0 %
Cœur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0 %
Angiographie TDM	0,1	0,0	0,0	0,6	0,8	19,4	4,1 %
Total	6,1	3,4	5,5	14,8	29,8	358,8	8,3 %

Cette analyse nous amène à estimer que, en 2009, le nombre d'examen de TDM au Québec avait le potentiel de produire 30 nouveaux cas de cancer chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans, au cours de leur vie. Ceci représente 8,3 % des 358 cas de cancer attendus pour l'ensemble de la population.

Notons que plusieurs facteurs peuvent avoir influencé ces estimations à la hausse. D'abord, la plupart des études sur les doses pédiatriques indiquent que les valeurs sont inférieures aux valeurs de doses chez l'adulte [Linet *et al.*, 2009]. Il y a peut-être un biais de sélection ici, les établissements ayant des protocoles exemplaires étant plus enclins à publier les doses obtenues, mais il est bien établi qu'il est possible de réduire les doses chez les enfants et les jeunes, et il est probable que plusieurs établissements arrivent à obtenir ces réductions. Ensuite, pour les mêmes raisons signalées par Berrington de González et ses collaborateurs [2009], l'application de ces doses à une population clinique surestime l'effet cancérigène chez des personnes ayant parfois une espérance de vie limitée. Cet auteur a réduit de 11 % son estimation du risque de cancer, sur la base du nombre de personnes qui sont décédées du cancer dans les cinq ans suivant leur examen de TDM, et de 9 % en éliminant du calcul les examens faits chez des personnes ayant déjà un diagnostic de cancer.

Ainsi, si on appliquait aux données québécoises la réduction de 20 %, telle que l'a estimé Berrington de González, on obtiendrait environ 24 cancers par an chez les jeunes et 286 chez les personnes de tout âge associées aux examens de TDM.

4.2.5 Décès par cancer dus à la TDM

Dans les sections précédentes, nous avons démontré que les 32 668 examens de TDM chez les québécois de 0 à 19 ans représentent 3,7 % des examens de TDM faits à tout âge, 2,5 % des doses efficaces associées à ces examens et 8,3 % des nouveaux cas de cancer. Une analyse similaire a été faite afin d'estimer le nombre de décès associés à ces cancers. Les résultats sont présentés dans les tableaux 14 et E-4.

Tableau 14 : Décès par cancer dus à la TDM, par an, par catégories d'âge entre 0 et 19 ans et pour tous les âges, au Québec

Région anatomique	Catégories d'âge				Total	Total	% du total
	0-4	5-9	10-14	15-19	0-19	Tous âges	0-19
Thorax et abdomen	0,2	0,1	0,2	0,5	0,9	29,4	3,1 %
Tête	1,0	0,6	0,8	1,3	3,7	23,8	15,5 %
Cou	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	2,7	14,8 %
Thorax	0,5	0,2	0,2	0,5	1,4	25,8	5,4 %
Abdomen	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	3,3	3,5 %
Pelvis	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	12,8	4,7 %
Abdomen et pelvis	0,5	0,4	0,7	2,9	4,5	99,1	4,5 %
Rachis	0,1	0,1	0,2	0,7	1,1	15,8	7,0 %
Extrémités	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	1,5	20,0 %
Massif facial	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	2,5	12,0 %
Cœur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0 %
Angiographie TDM	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	12,6	3,2 %
Total	2,5	1,5	2,5	7,1	13,6	229,4	5,9 %

Note : tous les chiffres sont arrondis au premier décimal.

Cela indique que la TDM aurait le potentiel de produire 14 décès dus au cancer chez les enfants et les jeunes, ce qui représente 5,9 % des 229 décès dus à la TDM produits chez les personnes de tout âge. En appliquant la réduction de 20 % proposée par Berrington de González et ses collaborateurs, on obtiendrait environ **11 décès par cancer attribuables à la TDM par an chez les jeunes et 184 chez les personnes de tout âge**, ce qui représente notre estimation de base.

Quelques autres considérations sont importantes pour apprécier les possibles erreurs d'estimation ici. D'abord, certains auteurs considèrent que, dose pour dose, les rayons X causent environ deux fois plus d'aberrations chromosomiques que les rayons- γ à plus haute énergie, qui étaient la source d'exposition des bombes atomiques [Hunter et Muirhead, 2009]. Si c'était le cas, l'exposition aux examens TDM, à base de rayons X, aurait deux fois plus d'effet cancérigène. Le BEIR applique à tous ses calculs un facteur DDREF de 1,5 considérant que la radiation chronique (comme par exemple l'exposition au radon résidentiel) entraîne moins d'effets qu'une dose aiguë. Or, il n'est pas du tout clair qu'il faudrait considérer une TDM comme étant une radiation chronique, surtout dans le cas d'un examen unique. Si on n'appliquait pas ce facteur aux calculs, on aurait un DDREF de 1,0 plutôt que de 1,5 et il faudrait ajuster les estimations à la hausse par 50 %. Enfin, si les examens de TDM ne sont pas faits avec un ajustement des doses pour la clientèle pédiatrique, les doses peuvent être supérieures aux doses adultes, augmentant de 5 % le nombre de cancers produits [Arch et Frush, 2008; Huda et Vance, 2007].

Par contre, d'autres facteurs qu'on aurait pu considérer auraient l'effet inverse. Berrington de González applique une réduction de 11 % parce que 11 % des examens de TDM dans sa base de données (comportant 57 millions d'examens de TDM) étaient effectués auprès de personnes qui sont décédées dans les cinq années suivantes. Cette exclusion est probablement insuffisante, puisqu'on croit généralement que les cancers secondaires à la radiation se produisent avec un délai allant de 10 à 30 ans (BEIR). Selon l'estimation de Berrington de González et ses collaborateurs [2009], un taux de mortalité 50 % plus élevé chez les personnes recevant des examens de TDM, par rapport à la

moyenne populationnelle, aurait comme effet de réduire de 20 % le nombre de cancers secondaires à la TDM. Le tableau 15 résume les différents facteurs qui pourraient augmenter ou réduire l'estimation du nombre de décès découlant de la TDM.

Tableau 15 : Facteurs ayant le potentiel de varier l'estimation centrale du nombre de décès par cancer par an dus à la TDM au Québec

Scénario	Augmentation ou diminution	Estimation du nombre de décès par cancer par an, 0-19 ans	Estimation du nombre de décès par cancer par an, tous âges
Estimation brute		14	230
Estimation de base*	- 20 %	11	184
Effet biologique des rayons X, par rapport aux rayons γ	+ 100 %	22	367
Aucun ajustement pour effet d'exposition chronique (DDREF=1)	+ 50 %	16	275
Aucun ajustement pédiatrique des paramètres de TDM	+ 5 %	11	193
Taux de mortalité 50 % plus élevé que dans la population générale	- 20 %	9	147

*en soustrayant l'effet chez des personnes ayant déjà le cancer ou décédant dans les 5 ans suivant l'examen.

Remarquons que l'estimation de **184** décès prévus à la suite d'un examen de TDM au Québec, dont 11 chez les enfants et les jeunes, diffère sensiblement des estimations brutes de 600 à 700 mentionnées dans les sections 4.1.5 et 4.2.4. Cela dénote l'importance de considérer la structure d'âge de la population exposée et, au moins partiellement, le fardeau de la maladie déjà présente chez une partie de la population qui reçoit des examens de TDM.

Comme nous l'avons déjà soulevé, cette analyse quantitative n'a considéré que les effets négatifs de l'imagerie par TDM, ce qui est relativement facile à chiffrer. Il est beaucoup plus difficile de chiffrer la morbidité et la mortalité que les 32 668 examens de TDM ont pu éviter, grâce à un diagnostic plus précoce ou plus précis de maladies graves. Dans la section suivante, nous regarderons les stratégies de réduction du risque qui ont le potentiel de réduire les effets délétères associés à la TDM tout en préservant autant que possible les nombreux avantages de cette technologie.

STRATÉGIES D'ATTÉNUATION DU RISQUE

Les nombreuses stratégies visant à réduire les effets délétères de la radiation peuvent être divisées en deux grands groupes. Le premier, qu'on appellera **l'optimisation**, consiste en la réduction des radiations qui sont associées à un examen donné, y compris l'utilisation des caches en bismuth, pour réduire localement les doses aux organes qui ne font pas partie de l'examen. Ces stratégies impliquent avant tout les professionnels de l'imagerie, qui s'assurent qu'on expose le patient au minimum de radiation nécessaire pour obtenir une image de qualité diagnostique. Ce volet sera peu discuté ici, car il est déjà pris en main par le Centre d'expertise clinique en radioprotection (CECR) du CHUS qui a reçu du MSSS le mandat d'examiner cette question en profondeur. Il touche, entre autres, l'entretien et la mise à jour de l'équipement et des logiciels, l'ajustement des appareils selon l'importance d'obtenir une image précise (p. ex. : bonne résolution, bon contraste, etc.) ou pour des clientèles particulières (surtout pour des jeunes), la réduction des reprises et les mesures de conscientisation : p.ex. le calcul automatique des doses reçues comprenant la comparaison automatique avec les NRD (niveaux de référence diagnostique).

Le deuxième groupe, qu'on appellera **la justification**, consiste en la prescription d'examens radiologiques seulement s'ils apportent un rapport avantages / inconvénients plus favorable que les autres options diagnostiques. C'est la responsabilité des prescripteurs des examens, généralement les médecins, qui ont à évaluer ce rapport dans chaque situation clinique où un examen radiologique peut être indiqué. Cela inclut la considération d'examens d'imagerie associés à moins de radiation (p. ex. : échographie et IRM) ou même la possibilité de se passer de l'information que l'examen radiologique peut apporter en se limitant à l'observation clinique.

Ensemble, ces deux stratégies constituent la base des principales recommandations en matière de protection contre les radiations. Selon le NCRP des États-Unis, « *Dans l'application des recommandations du Conseil par rapport aux sources d'irradiation de membres du public, les considérations prédominantes devraient être celles de JUSTIFICATION et du principe ALARA.* » [NCRP, 1993]¹⁵. Son vis-à-vis international, l'ICRP, dans sa publication 103 [2007], exprime des notions similaires :

« *Ces principes sont définis de la façon suivante :*

- *Le principe de justification : toute décision qui change l'exposition d'une personne à la radiation devrait lui faire plus de bien que de tort;*
- *Le principe de l'optimisation de la protection : la probabilité d'exposer des personnes, le nombre de personnes exposées et la valeur des doses individuelles devraient tous être maintenus au niveau le plus bas pouvant raisonnablement être atteint (ALARA), en tenant compte des facteurs économiques et sociétaux.*
- *Le principe de l'application des doses limites : la dose totale administrée à toute personne, à partir de sources réglementées et dans des situations planifiées, hors du contexte médical d'exposition de patients, ne devrait pas dépasser les limites spécifiées par la Commission »¹⁶ [ICRP, 2007].*

¹⁵ (traduction libre)

¹⁶ (traduction libre)

Le principe ALARA est aussi pertinent en TDM pédiatrique. Il s'agit de réduire au minimum la dose de radiation à laquelle les enfants sont exposés tout en conservant une image de qualité suffisante pour le diagnostic. L'initiative *Image Gently* [Goske *et al.*, 2008] contient un programme d'amélioration de la qualité accessible sur le Web, permettant l'analyse de la pratique des radiologistes en matière de TDM pédiatrique et la comparaison de cette pratique avec une pratique sécuritaire décrite dans la littérature médicale et avec les lignes directrices de l'ACR.

Au-delà des grands principes, il faut trouver des façons de mettre ces principes en pratique. Par exemple, et sans vouloir être exhaustifs, au CHU Sainte-Justine de Montréal, le protocole en usage veut que chaque requête de TDM soit révisée par un radiologiste avant d'être redirigée pour inscription à l'examen. La pertinence clinique de l'examen est évaluée, et en cas de question sur la pertinence, le radiologiste communique avec le médecin traitant pour discuter de l'indication et pour choisir un examen plus approprié¹⁷. Cette pratique permet une justification fine des examens, en collaboration étroite entre le médecin traitant qui connaît bien l'état clinique du patient et le radiologiste qui connaît bien les doses en question et les autres examens qui peuvent répondre au besoin clinique. C'est une pratique qui peut s'expliquer par le désir de ce CHU d'être un leader dans la réduction de dose en TDM. Il semble que la plupart, sinon tous les services de pédiatrie d'urgence utilisent le principe ALARA et sont très sélectifs dans les indications des examens de TDM chez les enfants¹⁸. Par contre, aucune donnée n'existe encore sur cette vigilance dans la pratique de la TDM pédiatrique au Québec.

On retrouve abondamment les mêmes informations et recommandations dans les sites Web et les publications des organismes officiels (Santé Canada, ministère de la Santé de l'Ontario, FDA, Australie, CE) en se basant sur la même littérature. Au Canada, la TDM est incluse dans le Code de sécurité [Santé Canada, 2008] et est couverte dans les règlements qui touchent les appareils émetteurs de radiations ionisantes quant à l'installation, l'entretien et la supervision par un officier local de radioprotection, mais pas en ce qui concerne la protection du patient. Aux États-Unis, la FDA a inclus les radiations issues des sources radiologiques parmi les agents cancérigènes connus. Mais aucun organisme officiel américain n'a pas encore présenté de lignes directrices pour les indications et les doses de radiation pour la TDM. Toutefois, la FDA a produit un livre blanc (février 2010) et a tenu une conférence (mars 2010) qui illustrent ses engagements et son désir de partenariat avec l'industrie et le milieu clinique. Quelques faits saillants de cette initiative sont présentés ici.

Le document de la FDA concerne les trois formes d'exposition aux radiations les plus intenses : la TDM, la médecine nucléaire et la fluoroscopie. La FDA, en collaboration avec d'autres partenaires et le milieu industriel, va promouvoir les actions nécessaires pour limiter les facteurs qui contribuent à des niveaux d'irradiation non nécessaires. L'objectif de cette initiative est de maintenir les bénéfices de l'imagerie médicale tout en réduisant les risques au minimum. La FDA vise trois actions spécifiques :

- *Processus de décision clinique.* Les médecins manquent d'information pour les aider dans la décision de recourir à un examen de TDM. Par exemple, ils ont peu accès à l'histoire d'imagerie d'un patient, et ils ont une connaissance limitée des critères recommandés pour guider leur décision, à savoir quelle modalité d'imagerie serait la plus appropriée et la plus efficace selon l'histoire clinique et les symptômes du patient. Des organisations professionnelles (p. ex., l'ACR) ont préparé des critères de référence

17 Communication écrite, 8 octobre 2010, à la suite de notre questionnaire (ce questionnaire se retrouve à l'annexe C).

18 Dr H. Eisman, Hôpital de Montréal pour enfants, communication personnelle, 18 avril 2011.

en imagerie appelés « critères de pertinence » (*appropriate use criteria*) associés à différentes conditions médicales. Ce processus serait facilité par l'établissement de spécifications pour les fabricants pour que les informations sur les doses de radiation pour chaque patient et pour chaque examen soient disponibles pour le transfert au dossier médical ou dans un éventuel registre national des doses de radiation. Ceci permettrait aux médecins de mieux connaître l'histoire dosimétrique de leurs patients pour appuyer leurs décisions quant à la prescription d'examen additionnels d'imagerie.

- *Poursuivre le développement et l'adoption de critères pour l'utilisation pertinente* des examens de TDM (*evidence based CT exam*). Des programmes informatiques d'aide à la décision pourraient être utilisés pour améliorer la qualité et l'uniformité des requêtes d'examen de TDM.

- *Sensibiliser les patients* : fournir aux patients des moyens pour suivre leur histoire personnelle de dosimétrie. La FDA, avec d'autres partenaires (ACR et RSNA), est promoteur du développement et de la diffusion d'une carte personnelle d'enregistrement des examens d'imagerie. Ce moyen est vu comme une façon de partager de l'information avec le médecin traitant et comme une aide à la décision concernant les meilleures options cliniques pour le patient. Il est à noter que l'Ontario (2007) a statué sur cette question et ne préconise pas l'implantation de cette carte en raison des différentes unités de mesures de doses pour différents appareils, de l'imposition d'un fardeau trop élevé aux services d'imagerie pour effectuer les calculs et de la difficulté de trouver un responsable du monitoring de l'information sur la dose cumulative. À ces raisons de ne pas implanter une telle carte, on pourrait ajouter qu'une des conséquences de la logique d'une relation linéaire entre radiation et risque est que chaque nouvelle dose de radiation a le même effet cancérogène, sans égard aux doses qu'un patient a pu recevoir précédemment. Donc, même si l'effet de la radiation est cumulatif, la décision clinique d'avoir recours ou non à un nouvel examen radiologique doit être prise à partir du même examen des avantages et des inconvénients, quel que soit le niveau d'exposition précédent.

La justification des examens revient donc aux cliniciens et à leurs patients, éclairés par des informations pertinentes, plutôt que d'être régie par des règlements uniformes. Pour qu'un examen radiologique soit justifié, il faut qu'on ait considéré à la fois l'utilité clinique de l'information diagnostique recherchée, ainsi que le préjudice qui peut être causé par la radiation associée à cet examen. Cette considération est principalement du ressort du clinicien (p. ex. : médecin de famille, urgentologue, cardiologue, oncologue), mais idéalement le patient devrait y participer. La notion de justification se rapproche de celle du consentement éclairé, exigeant que le patient puisse connaître les effets cancérogènes associés aux examens, de même que leurs avantages.

Cette justification idéale dépend *en principe* d'une analyse avantages/inconvénients. Or, *en réalité*, alors qu'il est possible d'estimer l'effet cancérogène de la radiation associée à un examen radiologique, il est généralement très difficile pour le clinicien (et encore plus pour son patient) d'apprécier l'ampleur des avantages associés aux examens. Par exemple, si on envisage demander une TDM crânienne chez un enfant de 10 ans qui a subi une commotion cérébrale, et si l'examen comporte 2 mSv de radiation, une consultation du tableau E.3 à l'annexe E (les coefficients BEIR) permet d'estimer qu'il y a un risque de 1 sur 1 910 de causer un cancer. Mais il est beaucoup plus difficile de quantifier l'avantage d'une TDM immédiate, en comparaison avec l'option de garder cet enfant sous observation clinique à la salle d'urgence pendant la nuit, sans faire de TDM.

En principe, il ne suffit pas de se limiter aux examens qui offrent plus d'avantages que d'inconvénients. Par exemple, on recommande que les patients exposés aux anthracyclines, dans le contexte d'une chimiothérapie contre le cancer, doivent être suivis pour détecter précocement une cardiotoxicité. Un suivi adéquat exige un monitoring de la fraction d'éjection du ventricule gauche, soit par scintigraphie cardiaque, soit par échocardiographie [Perik *et al.*, 2007]. Il est possible que les avantages d'un suivi par médecine nucléaire, malgré les 16 mSv de radiation associés à chaque examen, l'emportent sur les inconvénients, si on ne considère pas les autres options disponibles. Mais, lorsqu'il est possible d'avoir le même résultat par échocardiographie, sans aucune radiation, il est difficile de justifier le recours à la technique nucléaire. La vraie justification devrait donc aussi considérer les avantages et les inconvénients associés aux autres options diagnostiques. Or, dans les faits, plusieurs obstacles se dressent sur le chemin du clinicien qui veut prescrire l'examen approprié.

5.1 Appréciation de la dose

Plusieurs articles [McCollough *et al.*, 2009; Heyer *et al.*, 2007; Rice *et al.*, 2007a; Rice *et al.*, 2007b; Thomas *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2004] rapportent la méconnaissance des divers professionnels de la santé (urgentologues, pédiatres, omnipraticiens, etc.), y compris les radiologistes, des doses administrées aux patients lors des différents types d'examens de TDM. Cette situation est d'autant plus vraie lorsqu'il s'agit des doses administrées aux enfants, qui peuvent être plus élevées ou plus basses, selon les protocoles en vigueur. Le public peut être sensible à l'importance de considérer les effets de la radiation, mais il n'est pas réaliste de penser que les patients connaissent les doses des examens qui leur sont proposés, à moins que cette information leur soit fournie par le clinicien. Une appréciation des doses en question et de leurs effets est donc une responsabilité qui doit relever principalement des professionnels de la santé.

Pour aider dans cette voie, l'Association canadienne des radiologistes a publié, en 2005, les « Lignes directrices pour les examens d'imagerie diagnostique », qui incluent les indications cliniques, le type d'examen et la recommandation (indiqué, examen spécialisé, non indiqué au premier abord, indiqué seulement dans des cas précis, non indiqué) pour les examens de TDM. De plus, le niveau de preuve de chaque recommandation est ajouté (niveaux A, B ou C selon la force de la preuve à l'appui), ainsi que le niveau de dose avec l'ajout de commentaires. On y retrouve une importante section sur la pédiatrie. Pour chaque indication clinique qui pourrait nécessiter un examen de TDM, et selon la région anatomique, on donne uniquement, et comme indication générale, le niveau de dose, soit 0 dans le cas de l'échographie et l'IRM, I (moins de 1 mSv), II (1-5 mSv), III (5-10 mSv) ou IV (plus de 10 mSv).

Il existe des tables de doses plus détaillées, associées aux différents types d'examens, mais il faut se rappeler que les doses dépendent beaucoup de l'équipement, des protocoles, des pratiques radiologiques et même de la clientèle examinée. Il n'est donc pas surprenant que les doses publiées soient différentes d'une publication à une autre, comme on pouvait le voir dans le tableau 10. L'usage de ces tableaux présente d'autres difficultés pour les examens chez les enfants. Pour faciliter l'appréciation des doses par les requérants, il pourrait être utile que cette information de dose soit indiquée sur la feuille de requête, en mSv, idéalement avec des valeurs dosimétriques qui ont été mesurées dans l'établissement où l'examen est offert.

Des enquêtes en Europe et aux États-Unis ont permis de déterminer les doses auxquelles les enfants étaient exposés en fonction de l'âge et du poids pendant des examens typiques de TDM [Linnet *et al.*, 2009]. On appelle ces mesures des « mesures

provisoires » qui peuvent servir de balises pour réduire la dose jusqu'à ce que de nouvelles mesures soient rendues disponibles. Il a été suggéré d'obtenir les LDRL (*Local Diagnostic Reference Level*) pour les TDM en fonction du site exposé (surtout lorsqu'il s'agit du cerveau, du thorax ou de l'abdomen) et en fonction de l'âge et du poids du patient. Il est recommandé de réviser ces LDRL périodiquement lorsqu'il y a des changements locaux de technologies [Watson et Coakley, 2010]. On trouve souvent la recommandation selon laquelle les centres qui font de la TDM (adulte ou pédiatrique) obtiennent la mesure de CTDI et de DLP pour chaque examen. Tout examen dont la dose est hors norme devrait être enquêté pour une justification de la surdose. Il est suggéré d'utiliser ces mesures pour optimiser le processus afin de diminuer la surdose. Les lectures de CTDI et de DLP fournies par les fabricants sur les appareils à chaque examen ne peuvent être prises en compte directement comme dose réelle en raison de l'estimation faite à partir d'éléments théoriques pas toujours clairement identifiés (p. ex. : fantôme utilisé pour le calcul). Ces affichages sous-estiment de façon importante les doses de radiation chez les enfants [Nivelstein *et al.*, 2010]. Dans un avenir prévisible, il est possible que l'AAPM fournisse de nouvelles indications sur l'utilisation du CTDI et du DLP¹⁹.

Enfin, pour que le clinicien choisisse les examens radiologiques en connaissance de cause, il serait important de disposer de doses efficaces associées aux examens de TDM et d'imagerie nucléaire, pour lesquels les doses sont environ cent fois plus importantes que pour les radiographies traditionnelles. Idéalement, ces doses seraient celles qui sont calculées selon les équipements et protocoles en vigueur dans l'établissement où les examens sont effectués. Nous présentons au tableau 16 un exemple d'un tableau de concordance comparant doses naturelles, radiographie traditionnelle, radioscopies, examens communs en TDM et en médecine nucléaire.

19 S. Deschênes, CHU Ste-Justine, communication personnelle, 15 septembre 2010.

Tableau 16 : Table de concordance comparant les doses naturelles avec les doses efficaces typiques dues à des examens d'imagerie diagnostique (radiographie traditionnelle, radioscopies, examens communs en TDM et en médecine nucléaire) dans les années 2000

Examen diagnostique	Dose efficace typique (mSv)	Nombre de radiographies pulmonaires équivalentes	Période approx. de rayonnement équivalent ionisant naturel*
---------------------	-----------------------------	--	---

Examens radiographiques

Membres et articulations (excepté les hanches)	< 0,01	<0,5	< 1,5 jours
Thorax (un film PA)	0,02	1	3 jours
Crâne	0,06	3	9 jours
Colonne thoracique	0,7	35	4 mois
Colonne lombaire	1,0	50	5 mois
Hanche	0,4	20	2 mois
Pelvis	0,7	35	4 mois
Abdomen	0,7	35	4 mois
UIV/PIV	2,4	120	14 mois
Gorgée barytée	1,5	75	8 mois
Repas baryté	2,6	130	15 mois
Transit du grêle	3,0	150	16 mois
Lavement baryté	7,2	360	3,2 années
TDM de la tête	2,0	100	10 mois
TDM des poumons	8,0	400	3,6 années
TDM de l'abdomen ou du pelvis	10	500	4,5 années

Études isotopiques

Ventilation du poumon (Xe-133)	0,3	15	7 semaines
Perfusion du poumon (Tc-99m)	1	50	6 mois
Rein (Tc-99m)	1	50	6 mois
Thyroïde (Tc-99m)	1	50	6 mois
Os (Tc-99m)	4	200	1,8 année
Cardiaque dynamique (Tc-99m)	6	300	2,7 années
TEP de la tête (F-18 FDG)	5	250	2,3 années

Source : CAR, 2005.

Abréviations : FDG : fluoro-desoxyglucose; mSv : millisievert; PA : postéro-antérieure; PIV : pyélographie intraveineuse; Tc : technétium; TDM : tomodensitométrie; TEP : tomographie par émission des positrons; UIV : urographie intraveineuse.

* La radiation naturelle moyenne au Canada = 2,2 mSv par an; les moyennes régionales varient de 2,0 à 4,0 mSv par an.

5.2 Appréciation du risque

Alors que la dose associée à un examen constitue une information primordiale, d'autres facteurs déterminent le préjudice qui sera associé à une dose donnée. Les principaux facteurs sont l'âge du patient, son sexe, son poids et les maladies concomitantes limitant son espérance de vie. Ainsi, le tableau 17 indique le nombre de nouveaux cas de cancer additionnels qui seraient dus à l'exposition aux radiations ionisantes en identifiant les différents examens communs qui correspondent à différents niveaux de dose, et ce, par groupe d'âge. Le tableau 17 montre les doses de différents examens radiologiques, dont les trois examens de TDM les plus fréquemment prescrits au Québec, ainsi que le nombre de cas de cancer qu'on s'attend de produire pour chaque 100 000 examens à cette dose.

Tableau 17 : Nombre de cas de cancer associés à différentes doses efficaces, par 100 000 personnes exposées, par sexe et par catégorie d'âge

Incidence à vie par 100 000 personnes exposées à une dose de radiation aigüe																		
Dose* (mSv)	Âge																	
	0		10		20		30		40		50		60		70		80	
	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F
1	26	48	14	26	10	16	7	11	6	9	6	7	5	6	3	4	2	2
2	51	96	29	52	20	33	14	21	13	18	12	15	10	12	7	8	3	4
4	103	191	58	104	39	66	27	43	26	35	24	30	20	23	14	16	7	9
8	205	382	116	209	78	132	55	85	52	71	47	59	39	47	27	33	14	17
12	308	573	173	313	117	198	82	128	78	106	71	89	59	70	41	49	21	26
16	410	764	231	418	156	263	110	170	104	142	95	118	78	94	55	65	28	34
20	513	955	289	522	195	329	137	213	130	177	118	148	98	117	69	82	35	43
100	2563	4777	1445	2611	977	1646	686	1065	648	886	591	740	489	586	343	409	174	214

*Exemples d'examen radiologiques correspondant à ces doses :

1 mSv : rachis lombaire, mammographie

2 mSv : **TDM tête**; dose naturelle pendant un an

4 mSv : scintigraphie osseuse

8 mSv : **TDM thoracique**

12 mSv : **TDM abdomino-pelvienne**

16 mSv : perfusion du myocarde (par ex. Tc-99)

20 mSv : **TDM thorax-abdomen-pelvis**

100 mSv : dose de référence, BEIR

NOTES : doses basées sur une exposition à 100 mSv=0,1 Sv; moindres doses calculées par ajustement linéaire

Gy=Sv, puisqu'il s'agit d'exposition pancorporelle, avec rayons-X (QF=1)

Réf. : NRC, 2006, Annexe 12D, p. 311.

Il est possible qu'un calcul impliquant les effets attendus auprès de 100 000 personnes soit difficile à interpréter et à utiliser dans un contexte clinique. La même information peut aussi être présentée sous une forme qui peut aider l'appréciation des effets cliniques, soit en calculant le nombre d'examen nécessaires pour produire un cas de cancer. Ce calcul est l'analogie du ratio interventions/préjudice ou nombre nécessaire pour nuire (NNH ou *number needed to harm*), calculé pour les gestes cliniques ayant le potentiel de produire des effets indésirables. Encore une fois, on retrouve les doses pour trois examens de TDM courants et on peut ainsi associer pour chacun le nombre d'examen nécessaires pour produire un cas de cancer. Le tableau 18 illustre cette façon de présenter les données.

Tableau 18 : Nombre d'examen nécessaires pour causer un cas de cancer associé à la TDM, par sexe et par catégorie d'âge

Dose* (mSv)	Nombre d'examen nécessaires pour produire un cancer																	
	Âge																	
	0		10		20		30		40		50		60		70		80	
	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H	F
1	3 900	2 090	6 920	3 830	10 240	6 080	14 580	9 390	15 430	11 290	16 920	13 510	20 450	17 060	29 150	24 450	57 470	46 730
2	1 950	1 050	3 460	1 910	5 120	3 040	7 290	4 690	7 720	5 640	8 460	6 760	10 220	8 530	14 580	12 220	28 740	23 360
4	980	520	1 730	960	2 560	1 520	3 640	2 350	3 860	2 820	4 230	3 380	5 110	4 270	7 290	6 110	14 370	11 680
8	490	260	870	480	1 280	760	1 820	1 170	1 930	1 410	2 120	1 690	2 560	2 130	3 640	3 060	1 780	5 840
12	330	170	580	320	850	510	1 210	780	1 290	940	1 410	1 130	1 700	1 420	2 430	2 040	4 790	3 890
16	240	130	430	240	640	380	910	590	960	710	1 060	840	1 280	1 070	1 820	1 530	3 590	2 920
20	200	100	350	190	510	300	730	470	770	560	850	680	1 020	850	1 460	1 220	2 870	2 340
100	40	20	70	40	100	60	150	90	150	110	170	140	200	170	290	240	570	470

*Exemples d'examen radiologiques correspondant à ces doses :

1 mSv : rachis lombaire, mammographie

2 mSv : **TDM tête**; dose naturelle pendant un an

4 mSv : scintigraphie osseuse

8 mSv : **TDM thoracique**

12 mSv : **TDM abdomino-pelvienne**

16 mSv : perfusion du myocarde (par ex. Tc-99)

20 mSv : **TDM thorax-abdomen-pelvis**

100 mSv : dose de référence, BEIR

NOTES : doses basées sur une exposition à 100 mSv=0,1 Sv; moindres doses calculées par ajustement linéaire

Gy=Sv, puisqu'il s'agit d'exposition pancorporelle, avec rayons-X (QF=1)

Réf. : NRC, 2006, Annexe 12D, p. 311.

Il existe aussi des outils en ligne qui peuvent faciliter l'appréciation du risque, par exemple celui de Alessio et Phillips [2010] ou celui du *X-Ray Risk*²⁰.

5.3 Appréciation de l'équilibre entre risque et bénéfice

Trois niveaux de recommandations peuvent aider dans la justification des examens de TDM, c'est-à-dire pour garantir qu'il y a prédominance des effets bénéfiques. D'abord, on peut carrément déconseiller l'usage d'un examen donné. Par exemple, dans certains pays européens (Suisse et Allemagne), la plupart des tests de dépistage avec des moyens qui comportent une exposition à des radiations sont interdits par la loi [Johnson *et al.*, 2009]. Au même titre, en 2008, le U.S. Preventive Services Task Force ne recommande pas le test de dépistage du cancer colorectal par coloscopie virtuelle par TDM en raison de l'exposition aux radiations et la disponibilité d'une option, la coloscopie, qui obtient les mêmes avantages avec moins d'inconvénients [Whitlock *et al.*, 2008]. Ce sont des exemples de lignes directrices simples, où on a jugé que les avantages d'un examen de TDM ne l'emportent pas sur les inconvénients. Or, il est rare que l'équilibre entre avantages et inconvénients soit en défaveur de la TDM dans tous les contextes cliniques, et d'autres lignes directrices plus en faveur de la coloscopie virtuelle illustrent le fait que l'unanimité est rare aussi.

Une autre sorte de recommandation fréquemment rencontrée dans la littérature consiste en l'énoncé des grands principes, comme l'importance des risques associés à la TDM, ou l'importance de limiter la dose de radiation au niveau le plus bas qui rend une information diagnostique requise [Goske *et al.*, 2008; Cody *et al.*, 2004; Donnelly *et al.*, 2001].

Enfin, on retrouve des analyses plus détaillées des avantages et des inconvénients d'un examen de TDM dans des situations cliniques précises, incluant la considération d'options qui comportent moins de radiation. En guise d'illustration, quatre exemples cliniques plus détaillés sont illustrés ici, pour des indications d'imagerie dans les cas de traumatismes crâniens légers, de maladies pulmonaires chez l'enfant, de tumeurs abdominales, et d'appendicite.

Exemple 1 : Traumatismes crâniens légers

Le réseau étatsunien PECARN (*Pediatric Emergency Care Applied Research Network*) s'est penché sur la problématique de réduction de dose pour les examens de TDM en formulant un protocole qui évite les examens inutiles dans les cas de traumatisme crânien à faible risque d'être cliniquement significatif (score de 14-15 sur l'échelle de Glasgow) [Kuppermann *et al.*, 2009]. La TDM est le test de référence pour le traumatisme crânien en salle d'urgence même si certains traumatismes ne sont pas visibles par l'examen de TDM. Aux États-Unis, environ 50 % des enfants avec traumatisme crânien évalués en urgence subiront une TDM. Parmi eux, entre 40 % et 60 % ont un traumatisme crânien mineur. Moins de 10 % des examens de TDM chez les enfants avec traumatisme crânien mineur montrent des signes de dommages au cerveau. La neurochirurgie est très rare chez ces enfants. Des données claires pour la prescription de la TDM dans les cas de traumatisme crânien mineur ne sont pas disponibles et on observe une énorme variation dans cette pratique.

Cela a incité le PECARN à développer des algorithmes de prédiction bien établis et validés pour identifier les enfants à faible risque à la suite d'un trauma crânien. On a divisé les enfants en deux groupes : les moins de 2 ans (non verbal) et les 2 ans et plus. Les algorithmes établis permettent d'identifier les enfants qui n'ont pas besoin de TDM,

20 X-Ray Risk [site Web]. Disponible à : <http://www.xrayrisk.com/> (consulté le 17 mars 2011).

ce qui représente 25 % des cas de traumatismes crâniens mineurs pour les moins de 2 ans et 20 % des cas chez les 2 ans et plus. Ces algorithmes ont permis d'identifier un large groupe d'enfants chez qui l'examen de TDM pourrait être évité, même dans les hôpitaux où le taux d'utilisation de la TDM chez les enfants est plus bas que la moyenne nationale. Par ailleurs, les auteurs croient que ces algorithmes sont encore plus utiles pour réduire les examens de TDM dans un hôpital général où la majorité des traumatismes crâniens chez les enfants sont évalués en urgence par rapport aux hôpitaux pédiatriques.

En 2010, le groupe *PERC Head Injury Study group* (Pediatric Emergency Research Canada) a produit un algorithme de décision (*CATCH : Canadian Assessment of Tomography for Childhood Head Injury*) pour guider l'utilisation de la TDM pour les traumatismes crâniens mineurs chez les enfants [Osmond *et al.*, 2010]. Cet algorithme est semblable à celui de PECARN, mais il n'est pas encore validé et son utilité pourrait être limitée pour les enfants de moins de 2 ans. Il est à noter que le groupe PERC ne fait pas référence au travail de PECARN, diffusé en 2009 sur le même sujet.

On retrouve, sur le site du CHU Sainte-Justine, un diaporama préparé en juillet 2009 par le Dr A. D'Angelo, intitulé : « Le trauma crânien pédiatrique : *primum non nocere* ... mais pouvons-nous faire mieux ». Dans ce diaporama, on présente les protocoles et algorithmes décisionnels pour réduire le nombre d'examens de TDM. On fait mention de l'algorithme de CATCH qui serait en phase de validation et de ceux du groupe PECARN. Il est possible que les milieux pédiatriques du Québec soient sensibilisés à cette situation et que les actions prises pour les examens de TDM soient conformes à ces lignes directrices, mais nous n'avons pas fait cette vérification sur le terrain.

Exemple 2 : Maladies pulmonaires

Les techniques d'imagerie jouent un rôle crucial dans le diagnostic et le traitement des maladies pulmonaires en pédiatrie. Il y a quelques années, la TDM était l'examen de référence puisque l'on se concentrait surtout sur les aspects morphologiques des poumons. Maintenant, avec le développement de nouvelles technologies de TDM et d'IRM, on arrive à des examens fonctionnels des poumons [Puderbach et Kauczor, 2008]. Pour la TDM, on préfère nettement la TDM multibarrettes, surtout à cause de la vitesse d'acquisition supérieure. En raison de la résolution spatiale élevée, l'angiographie par TDM est la norme pour le diagnostic de l'embolie pulmonaire aiguë.

Pour l'IRM, la résolution est plus faible qu'en TDM. Malgré les difficultés inhérentes à l'IRM, des progrès récents ont permis à l'IRM de jouer un rôle significatif dans les maladies pulmonaires. L'IRM a l'avantage de permettre la caractérisation de plusieurs types de tissus, d'améliorer la caractérisation de la lésion et aussi de faire des examens fonctionnels. Pour les enfants et les patients qui collaborent plus ou moins bien, on est réduit à des examens de courte durée qui ont donc moins de résolution spatiale. Dans le cas de l'embolie pulmonaire aiguë, la TDM est toujours la préférence, mais pour le suivi, et en considérant l'irradiation, l'angiographie par IRM est privilégiée.

On peut maintenant faire des études de perfusion par IRM. En comparaison avec la scintigraphie, qui est le standard en perfusion, l'IRM montre une sensibilité élevée et une spécificité similaire pour la détection des défauts de perfusion. De plus, l'IRM a une résolution temporelle et spatiale plus élevée. Comme la scintigraphie, l'IRM peut être utilisée pour le suivi postopératoire de la fonction pulmonaire.

Toutefois, il faut reconnaître que l'utilisation de la TDM et de l'IRM pour l'imagerie fonctionnelle du poumon est encore peu établie en clinique. Elles sont utilisées en pré-clinique ou encore dans des essais cliniques. Il faut rappeler que toutes les études

fonctionnelles demandent une collaboration du patient et que cela n'est pas toujours évident dans un groupe pédiatrique très diversifié, c.-à-d. du nouveau-né à l'adolescent. Les indications cliniques actuelles de la TDM et de l'IRM pour les maladies pulmonaires pédiatriques sont présentées dans le tableau 19 [Puderbach et Kauczor, 2008].

Jusqu'à un certain point, la combinaison de l'IRM morphologique et fonctionnelle est en mesure de remplacer la TDM. La force de la TDM multibarrettes est la combinaison de sa rapidité et de sa haute résolution pour des images de qualité et la possibilité d'évaluer la fonction pulmonaire jusqu'à un certain niveau. Toutefois, tout en reconnaissant les bénéfices cliniques, il faut prendre en compte le risque de radiation avec cette nouvelle technologie.

Tableau 19 : Indications de TDM ou d'IRM pour maladies pulmonaires

Maladie	TDM		IRM			
	Morphologie	Angiographie	Morphologie	Angiographie	Perfusion	Ventilation
Asthme					X	X
Syndrome de Swyer-James/ bronchiolite oblitérante	X			X	X	X
Fibrose kystique	X		X		X	X
Dysplasie bronchopulmonaire	X		X		X	X
Histiocytose à cellules de Langherans	X					
Lymphangioléiomyomatose	X					
Malformations pulmonaires arterioveineuses	X	X	X	X	X	
Séquestration pulmonaire	X	X	X	X	X	
Anomalies du retour veineux		X		X		
Atrésie de l'artère pulmonaire	X	X	X	X	X	

Source : Puderbach 2008 (traduction libre).

Par ailleurs, même si l'IRM a une résolution spatiale inférieure à la TDM, l'IRM présente l'avantage d'évaluer divers aspects des tissus, d'améliorer la caractérisation des lésions et d'évaluer la fonction pulmonaire. L'IRM est particulièrement pertinente pour les examens de l'appareil vasculaire pulmonaire, la fibrose kystique et le suivi des maladies pulmonaires; la TDM serait excellente pour caractériser la maladie, mais n'est pas utilisée régulièrement dans le suivi de l'évolution de la maladie par crainte de doses d'irradiation cumulatives trop élevées. L'IRM trouve sa place dans ce contexte. En plus de l'absence de radiation, des informations cliniques additionnelles et valables concernant les maladies pulmonaires peuvent être obtenues. Des techniques éprouvées pour l'IRM applicables aux enfants sont disponibles.

Exemple 3 : Tumeurs abdominales

La réponse à la question « TDM ou IRM pour les tumeurs abdominales chez l'enfant ? » n'est pas facile à donner et résulte, après réflexion [Olsen, 2008], en un compromis pratique. On identifie les risques à évaluer : 1) le risque de cancer avec l'irradiation; 2) l'effet du dépôt d'énergie thermique avec l'IRM (cet effet est encore mal connu); 3) les risques associés à l'utilisation d'agent de contraste qui semble essentielle en TDM comme en IRM (p. ex., le gadolinium utilisé en IRM est contre-indiqué lorsque le taux de filtration glomérulaire est réduit); 4) les risques associés à la sédation ou l'anesthésie

générale presque nécessaire en IRM pédiatrique en raison de la durée de l'examen. Globalement, il est très rare de retrouver dans la littérature en imagerie oncologique pédiatrique, des données probantes sur les risques.

On doit s'en remettre à la réalité clinique de la TDM comparée à l'IRM pour éclairer la démarche. Le compromis pragmatique est teinté par la problématique du changement technologique rapide dans ce domaine. Il pourrait se traduire par une liste de facteurs de décision en ordre décroissant d'importance : 1) des preuves empiriques sur l'efficacité des examens issues d'évaluations structurées; 2) la sécurité (incluant le niveau de risque des doses de radiation); 3) la conformité avec les lignes directrices ou des preuves bien démontrées; 4) les infrastructures radiologiques locales, les expertises et les connaissances; 5) les infrastructures institutionnelles locales, l'expertise et le financement; 6) les préférences personnelles et les attentes du public.

On a besoin d'un ajustement attentif de l'IRM, mais on arrive à obtenir une image de résolution similaire à la TDM pour un examen de l'abdomen. En TDM, l'usage d'agent de contraste permet d'améliorer l'image par rapport au pauvre contraste inhérent à la TDM. Par contre, en raison du problème de l'irradiation, le nombre de passages est souvent limité à un seul. Par ailleurs, en IRM on peut utiliser différents niveaux de contraste et même enregistrer chacune des images obtenues. Il faut réduire les artefacts dans l'acquisition des images. En TDM, les dernières technologies ont pratiquement éliminé ou fortement réduit les artefacts de mouvements. La plupart des artefacts en IRM sont simples à éliminer sauf ceux de mouvement qui sont dus au long temps d'acquisition. Il faut un opérateur habile. La capacité à produire des données quantitatives utiles est plus grande en IRM. La capacité à couvrir une grande surface anatomique est semblable dans les deux modalités, mais la TDM porte le fardeau de l'irradiation. En ce qui concerne la faisabilité de l'imagerie répétée, la TDM a une grande reproductibilité qui n'est pas dépendante de l'opérateur. Toutefois, la dose de radiation pour le diagnostic, le suivi et le monitoring ne peut être ignorée. Pour l'IRM, on doit compter sur l'opérateur et des modes de sédation afin d'empêcher l'enfant de bouger.

Face à ces constats, on favorisera l'IRM dans l'imagerie abdominale en autant que certains pré-requis soient respectés : 1) un fonctionnement fiable de l'IRM, qui repose principalement sur le radiologiste et sur l'opérateur; 2) un service efficace de sédation et d'anesthésie; 3) une bonne gestion des cas pour éviter les risques liés à l'administration de gadolinium; 4) une présentation et une communication efficaces de l'interprétation des images aux cliniciens.

Exemple 4 : Appendicite : la TDM comparée à l'échographie

L'appendicite est une condition aigüe fréquente chez les enfants et elle peut être imagée par TDM ou par échographie. L'imagerie diagnostique a pour but d'éviter un mauvais diagnostic et de faciliter la chirurgie précoce. Elle est devenue de plus en plus importante pour diminuer la morbidité de cette maladie. L'utilisation de l'imagerie soulève des questions : est-ce que l'examen par imagerie doit être utilisé? Si l'imagerie est réalisée, est-ce la TDM, l'échographie ou une autre modalité qui doit être utilisée? Van Hoe et Miserez [2000] rapportent que la plupart des institutions ont établi par consensus que, pour un patient soupçonné d'appendicite aigüe, il est recommandé d'utiliser l'examen par imagerie sur une base sélective et non de routine. Une minorité juge cet examen comme ajoutant des délais inutiles à la chirurgie [Lee *et al.*, 2001].

La méta-analyse de Doria et ses collaborateurs [2006] rapporte des résultats sur la performance de l'échographie et de la TDM dans le diagnostic de l'appendicite chez l'enfant et l'adulte. En référence à l'examen par échographie et à l'examen par TDM

dans la population pédiatrique, on souligne les avantages de l'un et de l'autre. Les avantages de l'échographie sont : faible coût, absence de radiation ionisante, aucune préparation du patient et la capacité de procéder à un examen dynamique en exerçant une compression graduelle. Les avantages de la TDM sont : une dépendance moindre envers l'opérateur, une meilleure définition de l'étendue de la maladie dans le cas d'un appendice perforé, une meilleure visualisation d'un appendice retrocécum, une qualité uniforme de l'image (indépendante de la présence de gaz dans les intestins, de l'obésité ou de douleurs abdominales intenses) et la possibilité de reconstruction multi-planaire rétrospective. Une limite possible de la TDM chez les enfants est la diminution du contraste, car les structures internes sont très échogènes. Les résultats de cette étude de synthèse et d'autres études antérieures favorisent la TDM [Lowe *et al.*, 2001; Horton *et al.*, 2000; Karakas *et al.*, 2000; Balthazar *et al.*, 1994]. Si on fait l'hypothèse d'une prévalence d'appendicite de 0,15 (c.-à-d. la valeur minimum d'une étude dans cette méta-analyse), on obtient 10 cas d'appendicite par 1000 enfants examinés (18 chez l'adulte) qui ne seraient pas détectés en utilisant l'échographie au lieu de la TDM. Par ailleurs, si la prévalence est de 0,75 (c.-à-d. la valeur maximum dans une étude de cette méta-analyse) le nombre de cas non détectés serait de 48 par 1000 enfants examinés (83 adultes). La TDM a une sensibilité diagnostique autour de trois fois plus élevée que l'échographie pour exprimer la différence de sensibilité tant chez l'adulte (RC = 3,1), que chez l'enfant (RC = 2,47).

Cette étude montre que l'échographie est moins sensible que la TDM pour le diagnostic de l'appendicite chez les enfants, la spécificité étant similaire pour les deux techniques. Ainsi, on obtient moins de résultats faux négatifs avec la TDM (meilleure sensibilité), mais la fréquence de faux positifs est similaire avec les deux techniques.

La plus grande radiosensibilité des organes et des tissus chez l'enfant place le clinicien devant un dilemme : doit-il utiliser la TDM, même si cela augmente le risque d'un cancer futur, ou bien privilégier l'échographie, au risque de manquer un cas d'appendicite? Selon les estimations du risque de cancer à vie attribuable à la TDM avec une prévalence d'appendicite de 0,31 chez l'enfant, pour chaque groupe de 10 000 enfants de 11 ans soumis à un examen d'échographie au lieu d'une TDM, on ne détecterait pas 280 cas d'appendicite et on préviendrait le développement futur de 13 cas de cancer. Chez l'adulte de 35 ans, avec une prévalence de l'appendicite de 0,40, on ne détecterait pas 480 cas d'appendicite et seulement 2 patients éviteraient le développement futur d'un cancer.

En raison des préoccupations d'irradiation, une façon de restreindre l'utilisation de la TDM dans la population est de cibler son utilisation dans les régions où la prévalence est la plus faible. En effet, plus faible est la prévalence d'appendicite dans la population, plus petite est la différence des taux de faux négatifs entre l'échographie et la TDM et moindre est le nombre de cas qui ont besoin d'être examinés par TDM pour détecter un cas additionnel manqué par échographie.

La différence de sensibilité entre l'échographie et la TDM est significative autant chez l'enfant que chez l'adulte. On doit noter que l'échographie a quand même une sensibilité assez élevée et raisonnable chez l'enfant et que la problématique de dose de radiation est surtout présente chez les enfants. On laisse au clinicien le choix à faire entre le risque de cancer futur avec l'examen de TDM, qui est particulièrement préoccupant chez l'enfant, et le risque de manquer des cas positifs en utilisant l'échographie.

L'analyse qui précède a permis de résumer le lien entre les rayonnements ionisants et le cancer et, en particulier, la contribution des activités médicales à la cancérogenèse. La TDM constituant vraisemblablement la principale contribution de radiation artificielle, nous avons décrit plus en profondeur l'ampleur de la TDM au Québec et son effet cancérogène. Plus spécifiquement, l'analyse a permis d'estimer l'exposition des enfants par la TDM au Québec et, sur la base d'un modèle théorique, d'estimer le risque cancérogénique théorique associé. Selon notre analyse des données québécoises et en appliquant des estimations tirées de la littérature scientifique, on pratique au Québec environ 888 000 examens de TDM par an (32 664, ou 3,7 %, chez les 0-19 ans, qui représentent 22,2 % de la population.) Ces examens génèrent une dose efficace totale de 6 700 personnes-Sv (170 personnes-Sv chez les 0-19 ans, ou 2,5 %). En utilisant le modèle LNT préconisé par la plupart des organismes scientifiques reconnus dans ce domaine, nous estimons que cette radiation associée à la TDM causerait 286 cas de cancer par année, dont environ une vingtaine (estimation du modèle = 24 cas ou 8,3 %) chez les 0-19 ans. Ces cancers étant souvent mortels, le même exercice nous amène à estimer que la TDM causerait 184 décès au Québec, dont une dizaine (estimation du modèle = 11 cas, ou 5,9 %) chez les 0-19 ans. Les estimations concernant le nombre de cas de cancer et le nombre de décès dus au cancer sont sujettes à plusieurs hypothèses, et des variations raisonnables de ces hypothèses peuvent facilement amener des estimations environ deux fois plus hautes ou plus basses. Il est beaucoup plus difficile, voire impossible, de chiffrer le nombre de vies sauvées par les quelque 888 000 examens de TDM qui peuvent amener un diagnostic plus précoce ou plus exact.

À titre de comparaison, on peut mentionner qu'en 2009, on estime qu'il aurait eu 44 200 nouveaux cas de cancer au Québec et 20 100 décès liés au cancer [SCC, 2009], ce qui représente une proportion de 35 % des 57 200 décès par toute cause au Québec²¹. L'évolution démographique fera en sorte que ces chiffres augmenteront rapidement dans les deux ou trois décennies à venir [Statistique Canada, 2010]. Le nombre de cancers qui pourraient éventuellement découler de la pratique de la TDM au Québec est faible, mais n'est pas négligeable.

L'analyse précédente considère les effets délétères des TDM, mais il est important de prendre en compte aussi leurs avantages, cet examen permettant souvent un diagnostic plus précis et des traitements plus appropriés pour diverses pathologies. L'estimation de ces avantages est beaucoup plus ardue, puisque l'utilité d'un examen variera selon l'indication. Même pour un contexte clinique donné, par exemple pour le cas des traumatismes crâniens, l'ampleur des avantages variera selon la gravité du traumatisme, la présence ou l'absence de symptômes, l'urgence clinique, etc. Devant l'impossibilité d'estimer l'ampleur des avantages, nous ne pouvons que constater que la TDM, comme c'est le cas pour d'autres techniques diagnostiques impliquant des radiations, permet souvent de contribuer à la détection et au diagnostic plus exact de plusieurs maladies, mais que ces effets positifs sont obtenus au prix du risque de développer un cancer plusieurs années plus tard.

21 Institut de la statistique du Québec. Décès et taux de mortalité, Québec, 1900-2010. Disponible à : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/naisn_decès/301.htm (consulté le 31 août 2010).

L'attitude médicale traditionnelle veut que l'équilibre entre ces effets positifs et négatifs penche nettement du côté des effets positifs. Cette attitude doit peut-être céder le pas à une attitude plus nuancée, qui permet de reconnaître l'importance de l'effet cancérigène, ainsi que l'importance de l'information diagnostique obtenue. Le défi de la bonne pratique tomographique est de s'assurer que les avantages obtenus par l'information diagnostique l'emportent sur les inconvénients et effets indésirables graves liés à l'examen, dans chacune des indications cliniques où elle est employée. Deux grandes voies permettent d'obtenir cette prépondérance des effets positifs : l'**optimisation** de la performance de la TDM et la **justification** des examens.

Pour la TDM au Québec, l'optimisation implique la poursuite de la mise en place de programmes d'assurance qualité permettant aux dispensateurs de ces services de développer des protocoles pour réduire les doses là où c'est possible, de mesurer les doses utilisées lors des examens, de comparer ces niveaux entre eux et à des standards reconnus et d'apporter les correctifs jugés appropriés. D'importantes initiatives dans ce sens sont déjà entreprises par les professionnels concernés, et le ministère de la Santé et des Services sociaux examine les possibilités d'appuyer et d'intensifier ces activités comme le témoigne le mandat octroyé au Centre d'expertise clinique en radioprotection (CECR) du CHUS.

La **justification** implique l'usage de la TDM seulement dans les situations où les effets bénéfiques dépassent les effets délétères. Facile à exprimer, elle est plus compliquée à effectuer, touchant un plus grand nombre d'acteurs que les professionnels en imagerie.

6.1 Limites de l'étude

Ce rapport d'évaluation montre bien la difficulté de cerner spécifiquement et quantitativement le risque cancérigène de la TDM chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans. Également, les limites principales de cette revue sont : (i) le choix du modèle utilisé pour interpréter les effets délétères des radiations ionisantes, notamment l'hypothèse selon laquelle il n'y aurait pas de seuil en deçà duquel la radiation ne comporterait pas d'effets; (ii) la forte dépendance aux données issues des études de suivi des effets des bombes atomiques, comportant une radiation avec des différences qualitatives, quantitatives et temporelles en comparaison avec la situation en diagnostic médical; (iii) les limites dans l'estimation des paramètres utilisés pour calculer le risque de nouveaux cas de cancer ou de décès par cancer; (iv) l'absence de données sur les doses administrées dans les examens de TDM au Québec et (v) les enjeux particuliers concernant la mesure et le calcul de la dose efficace chez les enfants et les jeunes de moins de 20 ans.

6.2 Retour sur le mandat

En réponse au mandat qui a été donné à l'équipe de travail, les risques cancérigènes associés à la TDM chez l'enfant et les jeunes de moins de 20 ans ont été présentés en référence à la littérature (section 3). De cet examen des principaux enjeux et aspects quantitatifs concernant la radiation, on dégage l'importance centrale de la dosimétrie avec la dose efficace comme mesure de comparaison. La notion de NRD (niveau de référence diagnostique - *DRL*) a aussi été introduite pour que chaque milieu, même s'il n'y a pas de normes précises, puisse s'autoréguler et se comparer aux autres à l'échelle régionale ou nationale. Les tableaux présentant la dose efficace pour chaque type d'examen sert de base à tous les calculs de risque avec les données de base de BEIR VII. La comparaison de ces doses dues aux divers examens de TDM aux autres sources de radiation a aussi été documentée (section 4.1).

Au Québec, la radiation diagnostique actuelle constitue environ la moitié de l'exposition totale de la population à la radiation, et la TDM y fait une contribution significative, soit environ la moitié de la dose médicale.

Le lien entre radiations et risque de cancer a été établi, ce lien étant l'objet d'un large consensus dans le milieu scientifique. En particulier, la règle d'une relation linéaire sans seuil est largement acceptée, même si cette opinion n'est pas universelle et semble bien expliquer la plupart des observations épidémiologiques. Ainsi, nous pouvons estimer, de façon approximative, les préjudices associés aux radiations diagnostiques utilisées au Québec actuellement. Cet effet, tout en étant petit, n'est pas insignifiant, puisqu'il est probablement responsable d'environ 1 % à 2 % des futurs cancers. Bien sûr, il y a aussi un bénéfice associé à ces examens. Même dans une situation clinique précise, il est difficile de quantifier ce bénéfice, et de façon globale, c'est impossible. Il est vraisemblable que, somme toute, le bénéfice d'un diagnostic précis et rapide l'emporte largement sur les risques d'une cancérogenèse tardive, mais cela n'est peut-être pas le cas pour chaque indication clinique, particulièrement chez une clientèle plus jeune. Il est donc important de limiter toute expansion de la pratique de la TDM au-delà des indications où elle peut être justifiée.

Nous avons produit des estimations de l'effet cancérogène de la TDM en évaluant le risque de nouveaux cas de cancer (incidence) de même que le risque de décès par cancer (mortalité). **Il faut comprendre que ces estimations utilisent un grand nombre d'hypothèses et que l'interprétation et l'utilisation de celles-ci sont l'objet de discussions et de débats.** Également, un seul examen de TDM présente peu de risque pour un individu, et selon le modèle utilisé, ce risque est un risque stochastique, c'est-à-dire qu'il produit son effet sur un pourcentage des personnes exposées, sans que l'on puisse prédire qui sera parmi la minorité des personnes subissant l'effet délétère. Dans chaque cas, il y a à la fois une possibilité de bénéfice (optimisation d'une démarche clinique pour le traitement) et une possibilité de préjudices (risque de développement du cancer).

Ce document présente aussi des stratégies d'atténuation du risque de cancer causé par les examens de TDM en fournissant des lignes directrices de même que des exemples de démarches cliniques (ex. : CATCH, PECARN). De plus, une démarche auprès du CHU Sainte-Justine a permis de documenter le processus éclairé suivi dans un milieu pédiatrique. Selon toute vraisemblance, le milieu pédiatrique du Québec est sensible à la question de la réduction de la dose et du risque; le jugement clinique est utilisé pour prendre les meilleures décisions sur la pertinence de l'examen que l'enfant doit subir de même que sur l'utilisation de protocoles ajustés pour les enfants et la considération des options à la TDM au cas par cas. Une démarche semblable serait nécessaire pour confirmer ces affirmations auprès des autres milieux cliniques pédiatriques et généraux.

Les fabricants de TDM offrent un soutien pour former les intervenants aux protocoles spécifiques à utiliser dans les examens de TDM pédiatrique et rendent disponibles ces protocoles avec l'installation de nouveaux équipements. On retrouve aussi la capacité de rehaussement des équipements existants pour en arriver aux mêmes objectifs de réduction de l'irradiation dans tous les examens.

La démarche d'optimisation menée par le Centre d'expertise clinique en radioprotection (CECR) du CHUS devrait avoir un effet fort bénéfique sur plusieurs paramètres de la problématique qui va de la documentation de l'état actuel de la situation, de la formation, de la sensibilisation et de la mise en œuvre généralisées de pratiques conformes au

consensus du milieu radiologique. Il est fort possible que cette démarche identifie des besoins et obtienne des investissements propices à améliorer ces pratiques.

Globalement, le risque associé aux radiations diagnostiques est reconnu depuis le début de la pratique de la radiologie et de la médecine nucléaire. Historiquement, le contrôle de ce risque, par la radioprotection et par l'usage judicieux de ces technologies, a régulièrement suivi l'évolution des techniques disponibles. L'avènement de la TDM, avec des doses beaucoup plus élevées que celles de la radiographie simple, a amené récemment de nouvelles initiatives pour harmoniser les pratiques avec cette nouvelle réalité, notamment pour la clientèle pédiatrique. On peut prendre comme exemple le mouvement « Image Gently » qui date de 2006, les initiatives de la FDA en collaboration avec les manufacturiers qui datent du début de 2010 et le code de sécurité 35 de Santé Canada qui date de 2009.

Dans cette analyse, nous avons fait un survol de mesures retrouvées dans la littérature médicale qui visent à limiter les dangers liés à la radiation, tout en maintenant les nombreux avantages que ces technologies offrent aux patients. Ces mesures incluent :

- la formation et la sensibilisation des professionnels à ces enjeux,
- l'information aux médecins pour l'aide à la prise de décision concernant le recours à un examen de TDM,
- le développement des standards de dosimétrie,
- l'élaboration de lignes directrices sur les indications des différentes techniques d'imagerie, et
- la mise en place de mesures d'assurance de la qualité en milieux clinique et radiologique.

Dans ce contexte dynamique, ces mesures doivent être développées et soutenues pour permettre aux patients de profiter au maximum des avantages qu'offrent ces nouvelles technologies, et pour réduire le risque de provoquer des cancers qui sont inévitablement liés aux radiations ionisantes.

ANNEXE A

STRATÉGIES DE RECHERCHE DOCUMENTAIRE

PubMed

("Tomography, X-Ray Computed/adverse effects"[Majr]

OR

"Radiation, Ionizing/adverse effects"[Majr])

AND

"Neoplasms, Radiation-Induced"[Majr]

Limites:

1. 2000 à 2010 (début mars) («2000/01/01»[PDat] : «2010/03/08»[PDat])

2. "infant"[MeSH Terms] OR "child"[MeSH Terms] OR "adolescent"[MeSH Terms] OR "young adult"[MeSH Terms]

EMBASE

(exp *computer assisted tomography/

OR

exp *ionizing radiation/)

AND

exp *radiation carcinogenesis/

Web of Science

(TS=(COMPUTED-TOMOGRAPHY) OR TS=(IONIZING-RADIATION))

AND TS=(CHILDHOOD-CANCER)

2000 à 2010 (début mars)

Guides de pratique

National Guideline Clearinghouse

G-I-N

CMA infobanque

PubMed:

"Tomography, X-Ray Computed"[Majr]

AND Practice Guideline[ptyp]

Examens de médecine nucléaire (dose moyenne)

PubMed:

"Radionuclide Imaging/statistics and numerical data"[Majr]

Revues systématiques

Tomography, X-Ray Computed

Cochrane Database of Systematic Reviews (par The Cochrane Library)

Database of Abstracts of Reviews of Effects

Health Technology Assessment Database (par CRD)

PubMed:

"Tomography, X-Ray Computed"[Majr]

Limits : Systematic Reviews; All Child: 0-18 years, Young Adult: 19-24 years

Articles sur le point de vue éthique, Limite : 2000 à 2010 (début mars)

MEDLINE via PubMed

“Tomography, X-Ray Computed”[Majr]

3. Limits > Subsets > Bioethics

4. Subheading *Ethics*

ETHXWeb

(SCANNER OR SCANNING OR TOMOGRAPHY OR SCAN OR CT) NOT (SCREEN+ OR GENOM+)

European Database on Literature of Ethics in Medicine

(EUROETHICS)

http://eurethnet.kib.ki.se/Search/Bin/searchpage_en.exe

Current Contents

EMBASE

exp *computer assisted tomography/

AND

exp *ethics/

ANNEXE B

DEMANDE DE DONNÉES DE LA RAMQ SUR LES EXAMENS TDM

Devis de la demande 20100506A			
Statistiques sur les actes de « tomographie » au Québec en 2009			
Demandeur	Alicia Framarin	Devis	Version : 2
	AETMIS		
CAI	Non applicable		Date : 2010-08-19
Renseignements sur le devis			
<p>Le client est invité à prendre connaissance du présent devis et, lorsque requis, ajouter des commentaires et/ou répondre aux questions soulignées en jaune. Le but de l'exercice est d'arriver à un devis détaillé correspondant aux besoins du client.</p> <p>Les coûts de réalisation sont évalués en fonction de la dernière version approuvée par le client. Il est important de savoir, qu'advenant des ajouts et/ou modifications en cours de réalisation ou à la suite de la réalisation des coûts supplémentaires seront facturés.</p> <p>L'utilisation de ce devis s'inscrit dans l'actualisation des processus de traitement des demandes, en cours depuis quelques années à la Régie.</p> <p>De plus, une fois les travaux d'extraction des données complétés, la facture sera transmise par le service de la comptabilité de la Régie au nom et à l'adresse du demandeur.</p>			
Précisions			
<p>Protection des renseignements personnels (PRP) : Selon nos directives de protection des renseignements personnels, nous devons nous assurer que les données que nous fournissons soient <u>anonymes</u>. À cet effet, il est important de savoir que, lors de la production de tableaux statistiques, nous appliquons la règle de PRP suivante : <i>Afin de ne pouvoir relier les renseignements à une personne particulière, la valeur zéro est inscrite dans les tableaux statistiques si moins de 5 individus ou moins de 3 dispensateurs ou moins de 5 services médicaux sont retrouvés.</i></p> <p>Services médicaux rémunérés à l'acte La banque sur les services médicaux rémunérés à l'acte contient les données de la facturation à l'acte des professionnels, donc les demandes de paiement transmises par les professionnels de la santé. Les services médicaux sélectionnés sont rendus sur le territoire du Québec.</p>			
Sélection et traitement des données			
<p>Période de sélection Du 1^{er} janvier 2009 au 31 décembre 2009</p>			

Critères de sélection

1. Sélectionner les services médicaux répondant aux critères suivants :
 1. la date du service est comprise dans la période
 2. les codes d'acte suivants : 8258, 8259, 8290, 8260, 8261, 8262, 8263, 8291 à 8294, 8264, 8265, 8255, 8256, 8266, 8267, 8268, 8269, 8274, 8275, 8276, 8277, 8434 à 8441
 - ✓ services rendus sur le territoire du Québec (*cod_cla_disp = '1'*)
 - ✓ code de rôle = 1 ou null
2. Calculer le nombre de services médicaux par code d'acte et produire le tableau 1.
3. Calculer l'âge des individus au 1^{er} juillet 2009, créer des groupes d'âge de 5 ans (0-4 ans, 5-9, ... 85 ans ou plus) et produire le tableau 2.

Note : Il est important de savoir que la règle de PRP indiquée ci-dessus s'applique.
4. Calculer le nombre d'individus ayant reçu plus d'un service pour le même code d'acte et déterminer les fréquences suivantes : 2 services, 3 services, 4 services, 5 services ou plus et produire le tableau 3.

Note : Il est important de savoir que la règle de PRP indiquée ci-dessus s'applique.
5. Calculer le nombre d'individus ayant reçu plus d'un service pour des codes d'acte différents par sexe et groupes d'âge de 5 ans et déterminer les fréquences suivantes : 2 actes, 3 actes, 4 actes, 5 actes, ... et produire le tableau 4.

Note : Il est important de savoir que la règle de PRP indiquée ci-dessus s'applique.

Note au technicien RAMQ : À voir selon le résultat s'il est possible de présenter les données pour 6 actes ou plus.

Tableaux à produire par la RAMQ pour le client

Tableau 1 :

Nombre de services de tomographie¹ rendus à l'acte par code d'acte en 2009

Code d'acte	Nombre de services
8258	
...	

Note :

1 : pour les codes d'actes inscrits dans les services médicaux rémunérés à l'acte suivants : 8258, 8259, 8290, 8260, 8261, 8262, 8263, 8291 à 8294, 8264, 8265, 8255, 8256, 8266, 8267, 8268, 8269, 8274, 8275, 8276, 8277, 8434 à 8441

PRP : la valeur zéro est inscrite si moins de **5 services médicaux** sont retrouvés.

Tableau 2 :

Nombre de services de tomographie¹ par code d'acte, groupe d'âge² et sexe, 2009

Code d'acte	0-4		5-9		10-14		...
	F	H	F	H	F	H	
8258							
...							

Note

1 : pour les codes d'actes inscrits dans les services médicaux rémunérés à l'acte suivants : 8258, 8259, 8290, 8260, 8261, 8262, 8263, 8291 à 8294, 8264, 8265, 8255, 8256, 8266,

2 : Âge est calculé au 1^{er} juillet 2009

PRP : la valeur zéro est inscrite si moins de **5 services médicaux** sont retrouvés.

Tableau 3 :

Nombre d'individus ayant reçu plus d'un service de tomographie¹ pour le même code d'acte par code et selon la fréquence du nombre de services, 2009

Code d'acte	Fréquence	Nbr d'individus
	2	
	3	
	4	
	5	
	...	

Note :

1 : pour les codes d'actes inscrits dans les services médicaux rémunérés à l'acte suivants :

8258, 8259, 8290, 8260, 8261, 8262, 8263, 8291 à 8294, 8264, 8265, 8255, 8256, 8266, 8267, 8268, 8269, 8274, 8275, 8276, 8277, 8434 à 8441

PRP : la valeur zéro est inscrite si moins de **5 individus** sont retrouvés.

Tableau 4 :

Nombre d'individus ayant reçu plus d'un service de tomographie¹ pour différents codes d'acte, 2009

Nbr codes d'acte	0-4		5-9		10-14		...
	F	H	F	H	F	H	
2							
3							

Note

1 : pour les codes d'actes inscrits dans les services médicaux rémunérés à l'acte suivants :

8258, 8259, 8290, 8260, 8261, 8262, 8263, 8291 à

8294, 8264, 8265, 8255, 8256, 8266, 8267, 8268,

2 : Âge est calculé au 1er juillet 2009

PRP : la valeur zéro est inscrite si moins de **5 services médicaux** sont retrouvés.

Complément d'information

Disponibilité des données

Les données de la Régie sont entreposées dans un environnement informationnel et peuvent être exploitées depuis 1996. Le délai entre la date du service et la disponibilité des données sur les **services pharmaceutiques** est évalué à **1 mois** et à **4 mois** pour les données sur les **services médicaux** rémunérés à l'acte puisque le professionnel doit soumettre à la Régie *sa demande de paiement dûment remplie dans les 3 mois de la date à laquelle le service assuré est fourni* (manuel de facturation).

Protection des renseignements personnels (PRP)

Selon notre loi sur l'assurance maladie et nos directives de protection des renseignements personnels, nous devons nous assurer que les données que nous fournissons soient *anonymes* et qu'elles correspondent à un échantillon de la population d'un nombre maximal de 125 000 individus. À ce moment, certaines données sont regroupées si moins de **5 individus** ou moins de **3 dispensateurs** ou moins de **5 services médicaux** sont retrouvés afin de ne pouvoir les relier à une personne particulière.

Information technique pour le client

Les tableaux sont transmis en fichier *Excel* :

- ✓ Onglet « Nombre services - acte » : Tableau 1
- ✓ Onglet « Nombre services - groupe d'âge et sexe » : Tableau 2
- ✓ Onglet « Nombre individus – fréquence » : Tableau 3
- ✓ Onglet « Nombre services – fréquence – sexe » : Tableau 4

Information technique pour la RAMQ

Sélection des services médicaux :

- ✓ Sélectionner les services de statut 'PAY' et mnt_paimt < 0
- ✓ Sélectionner les services de statut 'PPY' et mnt_dem < 0
- ✓ Sélectionner que les rôles 1 ou à NULL

PRP – Appliquer la règle suivante :

- ✓ Pour les colonnes « nombre d'individus » et « nombre de services », si le résultat est < 5, inscrire '0'.

Production des tableaux :

Consulter l'exemple de tableaux accessible dans le répertoire commun pour les résultats.

Préparé par Brigitte Morin

Mise à jour le 2010-08-19

ANNEXE C

QUESTIONNAIRE SUR LES PRATIQUES RADIOLOGIQUES VISANT À RÉDUIRE LES RADIATIONS IONISANTES ASSOCIÉES À LA TDM AU CHU STE-JUSTINE

Dans le cadre d'une évaluation à fournir à la Direction de la lutte contre le cancer du MSSS, l'AETMIS prépare un dossier sur la TDM chez les enfants et jeunes adultes. Dans la revue de la littérature, on relève plusieurs lignes directrices (« guidelines »), des instructions diverses sur ce qu'il faut faire chez les enfants subissant un examen de TDM (réduction de dose par rapport au protocole chez l'adulte, réduire la répétition des examens TDM, etc.) et des énoncés de diverses institutions pédiatriques. Toutefois, il n'y a pas beaucoup d'information sur ce qui se fait dans le quotidien des établissements. Dans la préparation de ce dossier, l'AETMIS veut de l'aide de certains établissements pédiatriques du Québec pour documenter la pratique actuelle en TDM pédiatrique.

On aimerait rencontrer un ou des représentants de l'établissement pour cette aide et pour répondre à certaines questions :

1. Y a-t-il un mécanisme formel de jugement de la pertinence de l'examen de TDM lors d'une requête d'examen de TDM par le médecin traitant ? *Document disponible ?*
2. Y a-t-il une pratique de réduction de dose (c.-à-d. protocoles) selon le site ciblé et l'âge/ poids de l'enfant? *Document disponible?*
3. Y a-t-il une mesure quelconque de la dose à chaque examen de TDM? Si oui, est-elle enregistrée au dossier médical, quelle est cette mesure (unités) et comment est-elle obtenue?
4. Est-ce que l'établissement s'est doté de technologies ou de méthodologies spécifiques pour faire de la dosimétrie pédiatrique? Quelles sont ces technologies ou méthodologies?
5. Quelle est la pratique dans le département d'imagerie médicale concernant les requêtes de répétition d'examens de TDM chez un même enfant? *Document disponible?*
6. Lors de la requête d'un examen de TDM ou la répétition d'un examen de TDM chez un même enfant, y a-t-il un mécanisme formel pour examiner la possibilité de choisir un examen d'imagerie alternatif qui diminuerait l'exposition aux radiations ionisantes (p. ex. : IRM, échographie, radiographie conventionnelle)? *Document disponible?*
7. Quelle est la pratique concernant l'examen TDM à séquences multiples, c.-à-d. passage répété sur un même site lors du même examen? *Document disponible?*
8. Qu'elle est la pratique du CHUSJ concernant l'utilisation de pièces de blindage (« shielding ») lors des examens de TDM? *Document disponible?*
9. Peut-on lister des lignes directrices (« guidelines » ou « standard ») adoptées en TDM chez l'enfant ou desquelles s'inspire le CHUSJ?

ANNEXE D

PRÉCISIONS SUR LES UNITÉS DE DOSE POUR LA TDM

Pour saisir la signification du CTDI (*CT Dose Index* ou indice de dose TDM) et le DLP (*Dose Length Product*, le produit dose longueur), il faut définir le CTDI, le $CTDI_w$ ou pondéré et le $CTDI_{vol}$ ou volumique :

CTDI (mGy) : l'intégrale du profil de dose produit par un balayage axial unique normalisée à la largeur nominale du faisceau, le long d'une ligne perpendiculaire au plan tomographique divisée par la distance (en pratique : 10 cm uniquement) sur laquelle l'intégrale est calculée. Le CTDI peut être mesuré dans l'air ou sur des fantômes cylindriques (16 cm de diamètre = fantôme tête; 32 cm de diamètre = fantôme corps; simule un adulte de 70 kg) à différents endroits dans le plan de coupe (au centre ou à 1 cm de la périphérie). Il en résulte une nomenclature qui identifie le fantôme et l'endroit de la mesure; par exemple $CTDI_{Head,p}$ pour une mesure en périphérie sur le fantôme tête.

$CTDI_w$ (CTDI pondéré ou *weighted CT Dose Index*): permet de représenter la dose moyenne dans l'ensemble du fantôme. Il est calculé par une pondération de la mesure au centre ($CTDI_c$) et de la mesure en périphérie ($CTDI_p$): $CTDI_w = 1/3 CTDI_c + 2/3 CTDI_p$

$CTDI_{vol}$ (CTDI volumique ou *volume CT Dose Index*) : pour tenir compte des acquisitions en mode hélicoïdal, on introduit le pas d'acquisition (*pitch*) pour faire le calcul de la dose. Le pas d'acquisition est défini comme la distance parcourue par la table pendant une révolution du tube divisée par la largeur nominale irradiée du détecteur projetée à l'isocentre du TDM le long de l'axe longitudinal (axe Z) (réf. Figure D.1). Le $CTDI_{vol}$ est obtenu par : $CTDI_{vol} = CTDI_w / pitch$

DLP (mGy*cm) (produit dose longueur ou *dose length product*) : indicateur de la dose totale que reçoit le patient lors d'un examen. C'est le produit de la distance balayée par le faisceau par la valeur moyenne de $CTDI_{vol}$ sur cette distance.

Rappelons que l'objectif est d'évaluer la dose efficace, car elle permet d'évaluer le risque associé à l'irradiation. Pour évaluer la dose efficace en TDM, on utilise le produit DLP x facteur de conversion (k). On a des facteurs de conversion pour chaque région du corps pour des sujets adultes dont le poids varie entre 60 et 80 kg, obtenus par simulation Monte Carlo [APIBQ, 2009]. Ces facteurs sont établis en tenant compte de l'appareil, des paramètres de courant et de voltage utilisés (mAs et kVp) et du sexe du sujet. Il est donc possible d'estimer la dose efficace par examen pour chaque région anatomique en utilisant la moyenne des valeurs de DLP établies pour chaque examen.

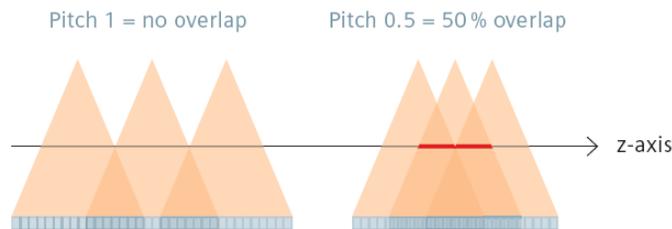


Figure D.1 :

Si la table se déplace rapidement (pitch =1), le profil du faisceau de rayon X ne se superpose pas. Si la table se déplace lentement (pitch = 0,5), on constate une superposition du profil du faisceau de rayon X. À noter que la superposition est mesurée à l'isocentre du TDM le long de l'axe Z. Il est donc important que les mesures se fassent à l'isocentre, car il est évident que des mesures sous l'isocentre, ou au dessus de ce dernier, donneront des profils de superposition du faisceau de rayon X différents (Source : Siemens Healthcare, 2010).

ANNEXE E

CALCUL DE L'INCIDENCE DU CANCER ET DE LA MORTALITÉ DUE AU CANCER, EN FONCTION DU SEXE, DE L'ÂGE ET DU TYPE D'EXAMEN DE TDM

Cette annexe est fournie pour expliciter les calculs faits dans les tableaux d'incidence de cancer à la section 3.5. On a comme valeur de départ les données de 2009 fournies par la RAMQ sur le nombre d'examens par code de facturation. Ces codes sont regroupés par région anatomique (chaque examen a généralement un code avec et sans agent de contraste, par exemple). Nous avons le nombre d'examens par sexe et par groupe de cinq ans. Nous regroupons les groupes d'âge de 0 à 4 ans, de 5 à 9 ans, de 10 à 14 ans et de 15 à 19 ans dans une catégorie que nous appelons les enfants et les jeunes. Ces données sont présentées de façon sommaire dans les tableaux de la section 3, et de façon complète dans le tableau E-1.

Tableau E-1 : Nombre d'examen de TDM par sexe et par groupe d'âge

région anatomique	0-4		5-9		10-14		15-19		20-24		25-29		30-34		35-39		40-44		45-49		50-54		55-59		60-64		65-69		70-74		75-79		80-84		85 et +		Total			
	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M				
Tête	1334	1688	1012	1274	1660	1849	3748	3680	3718	3650	4307	3768	4945	3937	5201	4187	6714	5302	8988	7251	10410	8579	10046	9068	11038	10065	11219	10432	11471	10637	14076	11003	14479	9866	17367	8135	14142	115154	259576	
Abdomen et pelvis	142	148	126	175	326	380	1761	1480	2589	2143	3459	2865	4180	3849	5020	4744	6892	6391	9820	8845	10867	10824	11387	11549	11951	12688	11363	12253	10084	10548	9946	9817	8082	6447	6801	3764	114607	109110	223716	
Thorax	222	311	120	128	200	178	395	558	413	626	603	783	840	903	1060	1068	1805	1658	3271	3000	4169	4410	5700	5711	6742	7104	6684	7637	5860	6881	5497	6176	3758	3938	2586	2090	50325	53811	104136	
Rachis	35	60	58	73	201	279	813	939	863	1181	1036	1262	1522	1701	1762	2054	2640	2776	3681	3481	3989	3724	3618	3688	3650	3307	3275	2835	2957	2333	2848	1971	2391	1405	2081	929	37231	34102	71234	
Thorax et abdomen	33	73	27	29	59	89	204	313	220	401	297	498	419	655	573	642	1132	1120	2124	1919	3001	2663	3713	3875	4360	4845	4248	5001	3718	4688	3515	4072	2347	2370	1800	1265	31590	34399	65889	
Pelvis	37	64	31	37	83	107	251	342	282	398	353	480	495	641	595	600	975	937	1719	1509	2176	2091	2644	2753	3105	3465	3102	3496	2665	3284	2640	2148	1791	1663	1434	882	24382	25500	49882	
Angiographie TDM	16	23	5	0	18	6	212	218	310	342	514	373	589	506	713	588	850	838	1327	1258	1891	1739	1665	2077	2038	2551	2009	2753	1774	2507	1968	2367	1479	1538	1057	840	18208	20305	38712	
Cou	163	185	80	124	143	172	367	352	305	345	388	444	483	498	538	534	752	753	1108	1053	1430	1374	1521	1673	1498	1772	1412	1738	1140	1459	1006	1215	647	635	415	328	13398	14847	28145	
Massif facial	96	107	98	144	130	186	342	538	498	629	610	671	745	704	781	731	989	881	1167	1079	1249	1023	1200	1014	1146	937	926	756	609	511	536	448	436	247	366	140	11906	10747	22653	
Extrémités	35	22	75	56	257	300	345	628	302	576	276	602	349	564	386	560	472	663	717	839	867	870	879	845	842	783	742	697	619	537	666	470	631	339	821	290	9273	9843	18917	
Abdomen	0	0	5	0	0	20	52	32	57	38	72	59	133	87	147	105	208	189	343	281	440	377	448	457	493	487	526	543	433	409	352	341	252	197	165	76	4117	3888	7815	
Cœur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	255	410	665
Total	2103	2681	1637	2040	3077	3566	8481	9081	9567	10338	11916	11806	14686	14047	16771	15800	23443	21927	34281	30548	40336	37731	42863	42564	46797	48066	45559	48204	41346	43775	43063	41765	35312	28666	34473	10740	165912	131327	888239	

F : sexe féminin; M : sexe masculin

Ensuite, on a extrait de la littérature les valeurs de la dose efficace moyenne en mSv pour chaque type d'examen par région anatomique. Lors des disponibilités, les valeurs utilisées sont celles du rapport de l'APIBQ [2009].

Le produit du nombre d'examen par la valeur moyenne de la dose efficace pour chaque examen donne la dose population en personne-Sv, présentée par catégorie d'âge et de sexe au tableau E-2.

Par exemple : chez les filles de 0 à 4 ans, on a 33 examens de TDM au thorax-abdomen et la dose efficace pour ce genre d'examen est de 14 mSv. On aura donc $33 \times 14 \times 10^{-3} = 0,46$ personne-Sv (voir tableau E-2). On fait ce calcul pour toutes les cases afin d'obtenir les données du tableau E-2.

Tableau E-2 : Valeur de la dose population en personne-Sv

région anatomique	0-4		5-9		10-14		15-19		20-24		25-29		30-34		35-39		40-44		45-49		50-54		55-59		60-64		65-69		70-74		75-79		80-84		85 et +		Total		dose efficace	
	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M				
Tête	3,47	4,39	2,63	3,31	4,32	4,81	9,74	9,57	9,67	9,49	11,20	9,80	12,86	10,24	13,52	10,88	17,46	13,78	23,37	18,85	26,29	22,31	26,12	23,55	28,70	26,17	29,17	27,12	29,82	27,66	36,60	30,69	37,65	25,63	45,13	21,15	38,70	289,40	687,70	2,6
Abdomen et pelvis	1,80	1,88	1,60	2,22	4,14	4,83	22,24	18,80	33,01	27,22	43,94	36,39	53,08	48,89	63,75	60,24	87,53	83,70	124,72	112,33	138,01	137,47	144,61	146,68	151,77	161,11	144,31	155,61	128,07	133,96	126,32	124,68	102,77	81,87	83,83	47,81	145,50	136,89	284,20	12,7
Thorax	1,69	2,36	0,91	0,97	1,52	1,35	3,00	4,24	3,14	4,76	4,58	5,95	6,38	6,86	8,06	8,12	13,72	14,12	24,86	22,80	36,24	33,51	43,32	43,40	51,24	53,99	50,87	58,04	44,46	51,91	41,78	49,22	28,56	29,93	19,66	15,89	383,99	407,44	79,43	7,6
Rechts	0,21	0,36	0,35	0,44	1,21	1,67	4,88	5,63	5,18	7,09	6,22	7,57	9,13	10,21	10,51	12,33	15,84	16,66	22,08	20,89	23,45	22,35	21,71	22,13	21,30	19,84	19,65	17,01	17,74	14,00	17,09	11,83	14,35	8,43	12,49	5,57	223,39	204,01	427,40	6
Thorax et abdomen	0,46	1,02	0,38	0,41	0,83	1,25	2,86	4,38	3,08	5,61	4,16	6,97	5,87	9,17	8,02	8,99	15,85	15,68	29,74	26,87	42,02	37,29	51,98	51,46	61,03	67,84	59,47	70,01	52,05	65,35	49,20	57,00	32,86	33,18	22,40	17,71	442,25	480,19	92,44	14
Pelvis	0,29	0,50	0,24	0,29	0,65	0,83	1,95	2,67	2,20	3,10	2,75	3,74	3,86	5,00	4,64	4,68	7,61	7,31	13,41	11,77	16,99	16,31	20,63	21,48	24,22	27,03	24,20	20,79	25,62	20,69	21,44	13,97	12,97	11,19	6,88	180,18	189,90	388,08	7,8	
Angiographie TDM	0,16	0,23	0,05	0,00	0,18	0,06	2,12	2,18	3,10	3,42	5,14	3,73	5,69	5,06	7,13	5,68	8,90	8,36	13,27	12,58	16,91	17,39	16,65	20,77	20,38	25,51	20,09	27,53	17,74	25,07	19,58	23,67	14,79	15,38	10,57	8,40	182,08	265,85	387,2	10
Cou	0,40	0,48	0,21	0,32	0,37	0,45	0,95	0,92	0,79	0,90	1,01	1,15	1,28	1,27	1,40	1,39	1,95	1,96	2,88	2,74	3,72	3,57	3,95	4,35	3,90	4,61	3,67	4,52	2,96	3,79	2,62	3,16	1,68	1,65	1,08	0,85	34,83	38,08	73,92	2,6
Massifacial	0,25	0,28	0,25	0,37	0,34	0,48	0,89	1,40	1,29	1,64	1,59	1,74	1,94	1,83	2,03	1,90	2,57	2,29	3,01	2,81	3,25	2,86	3,12	2,94	2,98	2,44	2,41	1,97	1,58	1,33	1,39	1,16	1,13	0,64	0,93	0,35	30,95	27,94	58,90	2,6
Extrémities	0,07	0,04	0,15	0,11	0,51	0,80	0,69	1,26	0,60	1,15	0,55	1,20	0,70	1,13	0,77	1,12	0,94	1,33	1,43	1,68	1,73	1,74	1,76	1,69	1,68	1,57	1,48	1,39	1,24	1,07	1,31	0,94	1,26	0,68	1,64	0,58	18,55	18,29	37,83	2
Abdomen	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,25	0,64	0,39	0,70	0,47	0,89	0,73	1,64	1,07	1,29	2,56	2,32	4,22	3,46	5,41	4,64	5,51	5,62	6,06	5,99	6,47	6,68	5,33	5,03	4,33	4,19	3,10	2,42	1,91	0,93	50,63	45,49	96,13	12,3
Cœur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,05	0,10	0,05	0,07	0,13	0,20	0,24	0,31	0,26	0,55	0,32	0,61	0,34	0,52	0,42	0,62	0,25	0,50	0,32	0,36	0,08	0,19	0,09	0,00	2,55	4,10	6,65	10
Total	8,80	11,55	6,84	8,45	14,06	16,58	49,98	51,44	62,77	64,92	82,02	78,99	102,48	100,83	121,70	116,69	174,66	167,72	263,24	237,09	314,27	299,79	339,67	344,38	375,61	396,61	362,21	397,78	322,04	355,30	321,14	328,34	252,21	212,99	210,91	126,15	3382,61	3365,89	6938,20	

F : sexe féminin; M : sexe masculin

Pour en arriver au tableau E-3, il faut utiliser les valeurs de BEIR VII. Celles-ci expriment le risque à vie de cancer attribuable à l'exposition aux radiations ionisantes et se traduisent par le nombre de cas de cancer par 100 000 personnes exposées à 100 mSv, et ce, par sexe et par groupe d'âge au moment de l'irradiation.

Par exemple, si 100 000 garçons âgés de 10 ans sont exposés à 100 mSv de radiation, le modèle projette qu'il y aura 1445 cas de cancer (réf. tableau E-3, coefficient BEIR, âge de 10 à 14, sexe masculin (M) au cours de la vie de ces enfants. On peut aussi dire que chacun de ces garçons a un risque de 1,45 % d'avoir un cancer à la suite de cette exposition. De façon similaire, pour les filles de 10 ans, le modèle projette 2611 cas de cancer et chaque fille aura un risque de 2,61 %. À noter que les valeurs de BEIR VII sont fournies à des âges spécifiques et que les données de la RAMQ sont par groupe d'âge. Ainsi, la valeur moyenne du groupe d'âge a été utilisée pour faire les calculs du nombre de cas; par exemple, pour les filles de 0 à 4 ans, nous prenons la valeur moyenne entre la valeur pour les filles nouveau-nées (4777) et la valeur pour les filles de 5 ans (3777). Ce qui résulte en une valeur de 4077 pour le groupe de filles de 0 à 4 ans. Ce genre de calcul est répété sur chaque groupe et on obtient le nombre de cas de cancer pour chaque âge, et selon le sexe.

On peut aussi considérer que les coefficients BEIR VII indiquent le nombre de cancers associés à une dose collective donnée. Cette dose est de 10 000 personne-Sv (100 000 personnes x 100 mSv). Pour continuer l'exemple chez les filles de 0 à 4 ans, les TDM du thorax-abdomen au Québec en 2009 (données du tableau E-2) ont contribué à une dose collective de 0,46 personne-Sv. Dans ce groupe d'âge, on s'attend à ce qu'il y ait 4077 cas par 10 000 personne-Sv, ou, autrement dit, 0,4077 cas par personne-Sv. On s'attend donc à $0,46 \times 0,4077 = 0,19$ cas de cancer lié à cet examen dans ce groupe d'âge. On procède de la même façon pour toutes les cases du tableau E-2 avec les valeurs moyennes du nombre de cas fournis par BEIR VII pour obtenir le tableau E-3.

Tableau E-3 : Nombre de cas de cancer (à vie) associés à l'exposition aux examens de TDM en 2009 au Québec

coefficients BEIR		4777	2563	3377	1816	2611	1445	2064	1182	1646	977	1085	686	886	648	740	591	586	489	409	343	214	174	85 et +	Total															
région anatomique	0 - 4	5 - 9		10 - 14		15 - 19		20 - 24		25 - 29		30 - 34		35 - 39		40 - 44		45 - 49		50 - 54		55 - 59		60 - 64		65 - 69		70 - 74		75 - 79		80 - 84		85 et +						
		F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M			
Thorax et abdomen	0.19	0.22	0.11	0.07	0.19	0.16	0.63	0.47	0.46	0.51	0.50	0.53	0.60	0.62	0.75	0.69	1.35	0.99	2.31	1.63	2.95	2.11	3.25	2.65	3.31	3.07	2.70	2.66	1.87	1.97	1.29	1.23	0.70	0.58	0.48	0.31	24	20	44	
Tête	1.41	0.96	0.79	0.54	1.01	0.63	1.81	1.03	1.45	0.86	1.36	0.74	1.31	0.69	1.26	0.72	1.48	0.87	1.81	1.14	1.84	1.26	1.63	1.21	1.55	1.18	1.32	1.03	1.07	0.83	0.96	0.66	0.81	0.45	0.97	0.37	24	15	39	
Cou	0.16	0.11	0.06	0.05	0.09	0.06	0.18	0.10	0.12	0.08	0.12	0.09	0.13	0.09	0.17	0.12	0.22	0.17	0.22	0.17	0.26	0.20	0.25	0.22	0.21	0.21	0.17	0.17	0.11	0.11	0.07	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	3	2	4	
Thorax	0.69	0.52	0.27	0.16	0.36	0.18	0.66	0.46	0.47	0.43	0.55	0.45	0.65	0.46	0.75	0.53	1.17	0.90	1.93	1.38	2.54	1.90	2.71	2.23	2.78	2.44	2.31	2.20	1.60	1.56	1.10	1.06	0.61	0.52	0.42	0.26	21	18	39	
Abdomen	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.12	0.04	0.11	0.04	0.11	0.05	0.17	0.07	0.17	0.08	0.22	0.15	0.33	0.21	0.38	0.26	0.34	0.29	0.33	0.27	0.29	0.25	0.19	0.15	0.11	0.09	0.07	0.04	0.04	0.02	3	2	5	
Pelvis	0.12	0.11	0.07	0.05	0.15	0.11	0.36	0.29	0.33	0.28	0.33	0.28	0.39	0.34	0.43	0.31	0.65	0.46	1.04	0.71	1.19	0.92	1.29	1.10	1.31	1.22	1.10	1.03	0.75	0.77	0.54	0.46	0.30	0.23	0.24	0.12	11	9	19	
Abdomen et pelvis	0.74	0.41	0.48	0.36	0.97	0.63	4.13	2.03	4.95	2.46	5.32	2.76	5.42	3.31	5.93	3.96	7.44	5.30	9.68	6.80	9.68	7.77	9.03	7.55	8.22	7.29	6.54	5.91	4.61	4.03	3.32	2.70	2.20	1.42	1.79	0.83	90	66	156	
Rachis	0.09	0.08	0.10	0.07	0.28	0.22	0.90	0.61	0.78	0.64	0.75	0.57	0.93	0.69	0.98	0.81	1.35	1.06	1.71	1.26	1.65	1.26	1.36	1.14	1.15	0.90	0.88	0.65	0.64	0.42	0.45	0.26	0.31	0.15	0.27	0.10	15	11	26	
Extrémités	0.03	0.01	0.04	0.02	0.12	0.08	0.13	0.14	0.09	0.10	0.07	0.09	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.11	0.10	0.12	0.10	0.11	0.09	0.09	0.07	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.04	0.01	1	1	3	
Massif facial	0.10	0.06	0.08	0.06	0.08	0.06	0.16	0.15	0.19	0.15	0.19	0.13	0.20	0.12	0.19	0.12	0.22	0.15	0.23	0.17	0.23	0.15	0.19	0.14	0.16	0.11	0.11	0.11	0.07	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	2	2	4
Cœur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	
Angiographie TDM	0.07	0.05	0.01	0.00	0.04	0.01	0.39	0.24	0.47	0.31	0.62	0.28	0.58	0.34	0.65	0.37	0.72	0.53	1.03	0.76	1.19	0.98	1.04	1.07	1.10	1.15	0.91	1.04	0.64	0.75	0.51	0.51	0.32	0.27	0.23	0.15	11	9	19	
Total	3.59	2.63	2.05	1.38	3.29	2.18	9.27	5.55	9.42	5.87	9.93	5.99	10.46	6.82	11.33	7.67	14.84	10.63	20.44	14.35	22.05	16.95	21.21	17.72	20.24	17.95	16.42	15.10	11.60	10.68	8.44	7.10	5.40	3.71	4.51	2.19	204	164	369	

F : sexe féminin; M : sexe masculin

Résumé des résultats du tableau E-3 : si l'on additionne le nombre de cas de cancer produits dans chaque groupe d'âge pour les filles et les garçons, pour l'ensemble des régions anatomiques on obtienne le total du nombre de cas; par exemple, pour les enfants de 0 à 4 ans on a 3,59 cas chez les filles et 2,53 cas chez les garçons. La somme pour le groupe d'âge de 0 à 19 ans, en regroupant garçons et filles, donne un total de 29,8 cas. Le même calcul, appliqué à tous les groupes d'âge, résulte en un total de 359 cas de cancer pour l'année 2009 au Québec. Cela représente le nombre de cas de cancer qui seront causés par les examens de TDM effectués en 2009, mais ces cancers peuvent apparaître pendant les prochains 100 ans environ. Chaque année, il y aura un nombre similaire de cas futurs générés, dans la mesure où la taille de la population, le nombre d'examen, et la dose par examen restent similaires. Le nombre de 359 cas représente donc le nombre de cas qui se produiront par année dans une sorte d'équilibre hypothétique de population et de pratique médicale. Le nombre de 29,8 cas de cancer produits chez les enfants et les jeunes représente 8,3 % de ce total.

Enfin, pour estimer le nombre de décès dus au cancer, nous employons la même logique que pour les nouveaux cas de cancer, sauf que nous utilisons les coefficients BEIR qui correspondent à ce résultat. Par exemple, pour 100 000 filles de 0 à 4 ans exposées à 100 mSv de radiation chacune, le modèle BEIR prédisait 4777 nouveaux cas de cancer, et il prédit aussi 1770 décès dus au cancer (tableau E-4).

RÉFÉRENCES

- Alessio AM et Phillips GS. A pediatric CT dose and risk estimator. *Pediatr Radiol* 2010;40(11):1816-21.
- Allison W. *Fundamental physics for probing and imaging*. Oxford, Royaume-Uni : Oxford University Press; 2006.
- American Association of Physicists in Medicine (AAPM). *The measurement, reporting, and management of radiation dose in CT*. College Park, MD : AAPM; 2008. Disponible à : http://www.aapm.org/pubs/reports/rpt_96.pdf.
- Amis ES, Jr., Butler PF, Applegate KE, Birnbaum SB, Brateman LF, Hevezi JM, et al. American College of Radiology white paper on radiation dose in medicine. *J Am Coll Radiol* 2007;4(5):272-84.
- Arch ME et Frush DP. Pediatric body MDCT: A 5-year follow-up survey of scanning parameters used by pediatric radiologists. *AJR Am J Roentgenol* 2008;191(2):611-7.
- Association canadienne des radiologistes (CAR). *Lignes directrices pour les examens d'imagerie diagnostique*. Montréal, Qc : Canadian Association of Radiologists / Association canadienne des radiologistes; 2005. Disponible à : http://car.ca/uploads/membership/Guidelines_FR.pdf.
- Association des physiciens et ingénieurs biomédicaux du Québec (APIBQ). *Étude des doses en tomographie : rapport d'étude. Première partie : analyse des examens courants*. Montréal, Qc : APIBQ; 2009. Disponible à : <http://www.otrq.qc.ca/SiteInterets/~media/pdf/MembresEtEtudiants/CT2009.ashx>.
- Aurengo A, Averbeck D, Bonnin A, Le Guen B, Masse R, Monier R, et al. Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. Paris, France : Académie des Sciences, Académie nationale de Médecine; 2005. Disponible à : <http://www.radscihealth.org/rsh/Docs/Correspondence/BEIRVII/TubianaAurengo5Oct05.pdf>.
- Balthazar EJ, Birnbaum BA, Yee J, Megibow AJ, Roshkow J, Gray C. Acute appendicitis: CT and US correlation in 100 patients. *Radiology* 1994;190(1):31-5.
- Becquerel H. Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 1896;122:420-1.
- Berrington de González A, Mahesh M, Kim KP, Bhargavan M, Lewis R, Mettler F, Land C. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Arch Intern Med* 2009;169(22):2071-7.
- Bertell R, Ehrle LH, Schmitz-Feuerhake I. Pediatric CT research elevates public health concerns: Low-dose radiation issues are highly politicized. *Int J Health Serv* 2007;37(3):419-39.
- Boone JM, Geraghty EM, Seibert JA, Wootton-Gorges SL. Dose reduction in pediatric CT: A rational approach. *Radiology* 2003;228(2):352-60.
- Brenner DJ. Effective dose: A flawed concept that could and should be replaced. *Br J Radiol* 2008;81(967):521-3.
- Brenner DJ et Hall EJ. Computed tomography—An increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007;357(22):2277-84.
- Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100(24):13761-6.
- Brenner DJ, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176(2):289-96.
- Brody AS, Frush DP, Huda W, Brent RL. Radiation risk to children from computed tomography. *Pediatrics* 2007;120(3):677-82.
- Calabrese EJ et Baldwin LA. Toxicology rethinks its central belief. *Nature* 2003;421(6924):691-2.

- Cameron JR. Moderate dose rate ionizing radiation increases longevity. *Br J Radiol* 2005;78(925):11-3.
- Chen J et Moir D. An estimation of the annual effective dose to the Canadian population from medical CT examinations. *J Radiol Prot* 2010;30(2):131-7.
- Chen J, Timmins R, Verdecchia K, Sato T. An estimation of Canadian population exposure to cosmic rays. *Radiat Environ Biophys* 2009;48(3):317-22.
- Cody DD, Moxley DM, Krugh KT, O'Daniel JC, Wagner LK, Eftekhari F. Strategies for formulating appropriate MDCT techniques when imaging the chest, abdomen, and pelvis in pediatric patients. *AJR Am J Roentgenol* 2004;182(4):849-59.
- Conseil canadien de la santé (CCS). Décisions, décisions : les médecins de famille en tant que gardes de l'accès aux médicaments d'ordonnance et à l'imagerie diagnostique au Canada. Toronto, ON : CCS; 2010. Disponible à : http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/ccs-hcc/H174-19-2010-fra.pdf.
- Donnelly LF, Emery KH, Brody AS, Laor T, Gylys-Morin VM, Anton CG, et al. Minimizing radiation dose for pediatric body applications of single-detector helical CT: Strategies at a large Children's Hospital. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176(2):303-6.
- Doria AS, Moineddin R, Kellenberger CJ, Epelman M, Beyene J, Schuh S, et al. US or CT for diagnosis of appendicitis in children and adults? A meta-analysis. *Radiology* 2006;241(1):83-94.
- Environmental Protection Agency (EPA). EPA radiogenic cancer risk models and projections for the U.S. population. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency; 2011. Disponible à : <http://epa.gov/radiation/docs/bluebook/402-r-11-01.pdf>.
- Fazel R, Krumholz HM, Wang Y, Ross JS, Chen J, Ting HH, et al. Exposure to low-dose ionizing radiation from medical imaging procedures. *N Engl J Med* 2009;361(9):849-57.
- Frieben A. Demonstration eines Cancroids des rechten Handrückens, das sich nach langdauernder Einwirkung von Röntgenstrahlen bei einem 33 jährigen Mann entwickelt hatte. *Fortschr Röntgenstr* 1902;6:106-11.
- Fujii K, Aoyama T, Koyama S, Kawaura C. Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations. *Br J Radiol* 2007;80(956):657-67.
- Goske MJ, Applegate KE, Boylan J, Butler PF, Callahan MJ, Coley BD, et al. The Image Gently campaign: Working together to change practice. *AJR Am J Roentgenol* 2008;190(2):273-4.
- Grasty RL et LaMarre JR. The annual effective dose from natural sources of ionising radiation in Canada. *Radiat Prot Dosimetry* 2004;108(3):215-26.
- Health Physics Society (HPS). Radiation risk in perspective: Position statement of the Health Physics Society. PS010-2. McLean, VA : HPS; 2010. Disponible à : http://hps.org/documents/risk_ps010-2.pdf.
- Hesse O. Symptomatology, pathogenesis and therapy of the X-ray carcinoma. Leipzig, Allemagne : J. A. Barth; 1911.
- Heyer CM, Peters S, Lemburg S, Nicolas V. Einschätzung der Strahlenbelastung radiologischer Thorax-Verfahren: Was ist Nichtradiologen bekannt? *Rofo* 2007;179(3):261-7.
- Horton MD, Counter SF, Florence MG, Hart MJ. A prospective trial of computed tomography and ultrasonography for diagnosing appendicitis in the atypical patient. *Am J Surg* 2000;179(5):379-81.
- Huda W et Vance A. Patient radiation doses from adult and pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol* 2007;188(2):540-6.
- Hunter N et Muirhead CR. Review of relative biological effectiveness dependence on linear energy transfer for low-LET radiations. *J Radiol Prot* 2009;29(1):5-21.
- Institut canadien d'information sur la santé (ICIS). L'imagerie médicale au Canada, 2007. Ottawa, ON : ICIS; 2008. Disponible à : http://secure.cihi.ca/cihiweb/products/MIT_2007_f.pdf.

- Institut canadien d'information sur la santé (ICIS). Technologies d'imagerie médicale au Canada, 2006 – Nombre, utilisation et sources de fonds d'exploitation. Analyse en bref. Ottawa, ON : ICIS; 2006. Disponible à : http://secure.cihi.ca/cihiweb/products/mit_analysis_in_brief_f.pdf.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique. Publication 103. Édition en langue française par Jean-Claude Nénot assisté de Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou et Dominique Thierry. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN); 2007. Disponible à : http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 60. Ann ICRP 1991;21(1-3):1-201.
- Johnson DA, Helft PR, Rex DK. CT and radiation-related cancer risk-time for a paradigm shift? *Nat Rev Gastroenterol Hepatol* 2009;6(12):738-40.
- Karakas SP, Guelfguat M, Leonidas JC, Springer S, Singh SP. Acute appendicitis in children: Comparison of clinical diagnosis with ultrasound and CT imaging. *Pediatr Radiol* 2000;30(2):94-8.
- Khursheed A, Hillier MC, Shrimpton PC, Wall BF. Influence of patient age on normalized effective doses calculated for CT examinations. *Br J Radiol* 2002;75(898):819-30.
- Kuppermann N, Holmes JF, Dayan PS, Hoyle JD, Jr., Atabaki SM, Holubkov R, et al. Identification of children at very low risk of clinically-important brain injuries after head trauma: A prospective cohort study. *Lancet* 2009;374(9696):1160-70.
- Laboratoire de santé publique du Québec (LSPQ). Rapport d'activités 2007-2008 : certification des installations de mammographie dans le cadre du PQDCS Québec, Qc : LSPQ; 2008. Disponible à : http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/798_CertificationInstMammo.pdf.
- Lee CI, Haims AH, Monico EP, Brink JA, Forman HP. Diagnostic CT scans: Assessment of patient, physician, and radiologist awareness of radiation dose and possible risks. *Radiology* 2004;231(2):393-8.
- Lee SL, Walsh AJ, Ho HS. Computed tomography and ultrasonography do not improve and may delay the diagnosis and treatment of acute appendicitis. *Arch Surg* 2001;136(5):556-62.
- Leswick DA, Syed NS, Dumaine CS, Lim HJ, Fladeland DA. Radiation dose from diagnostic computed tomography in Saskatchewan. *Can Assoc Radiol J* 2009;60(2):71-8.
- Lévesque B, Gauvin D, McGregor RG, Martel R, Gingras S, Dontigny A, et al. Étude d'exposition au radon²²² dans les résidences de la province de Québec. Québec, Qc : Centre de santé publique de Québec; 1995.
- Linet MS, Kim KP, Rajaraman P. Children's exposure to diagnostic medical radiation and cancer risk: Epidemiologic and dosimetric considerations. *Pediatr Radiol* 2009;39(Suppl 1):S4-26.
- Lo GG, Chan JK, Lau CW, Geng H, Yu SK. Radiation dose survey: Comparison between new-generation computed tomography and 64-slice multidetector computed tomography. *J HK Coll Radiol* 2010;12:107-12.
- Lowe LH, Penney MW, Stein SM, Heller RM, Neblett WW, Shyr Y, Hernanz-Schulman M. Unenhanced limited CT of the abdomen in the diagnosis of appendicitis in children: Comparison with sonography. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176(1):31-5.
- McCullough CH, Primak AN, Braun N, Kofler J, Yu L, Christner J. Strategies for reducing radiation dose in CT. *Radiol Clin North Am* 2009;47(1):27-40.
- Mettler FA Jr, Bhargavan M, Thomadsen BR, Gilley DB, Lipoti JA, Mahesh M, et al. Nuclear medicine exposure in the United States, 2005-2007: Preliminary results. *Semin Nucl Med* 2008a;38(5):384-91.
- Mettler FA Jr, Huda W, Yoshizumi TT, Mahesh M. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: A catalog. *Radiology* 2008b;248(1):254-63.

- Mettler FA Jr, Thomadsen BR, Bhargavan M, Gilley DB, Gray JE, Lipoti JA, et al. Medical radiation exposure in the U.S. in 2006: Preliminary results. *Health Phys* 2008c;95(5):502-7.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Limitation of exposure to ionizing radiation. Bethesda, MD : NCRP; 1993.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Exposure of the population in the United States and Canada from natural background radiation Bethesda, MD : NCRP; 1987.
- National Research Council (NRC). Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC : National Academies Press; 2006.
- Nievelstein RA, van Dam IM, van der Molen AJ. Multidetector CT in children: Current concepts and dose reduction strategies. *Pediatr Radiol* 2010;40(8):1324-44.
- Olsen OE. Imaging of abdominal tumours: CT or MRI? *Pediatr Radiol* 2008;38(Suppl 3):S452-8.
- Osmond MH, Klassen TP, Wells GA, Correll R, Jarvis A, Joubert G, et al. CATCH: A clinical decision rule for the use of computed tomography in children with minor head injury. *Cmaj* 2010;182(4):341-8.
- Perik PJ, de Korte MA, van Veldhuisen DJ, Gietema JA, Sleijfer DT, de Vries EG. Cardiotoxicity associated with the use of trastuzumab in breast cancer patients. *Expert Rev Anticancer Ther* 2007;7(12):1763-71.
- Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res* 2003;160(4):381-407.
- Puderbach M et Kauczor HU. Can lung MR replace lung CT? *Pediatr Radiol* 2008;38(Suppl 3):S439-51.
- Rice HE, Frush DP, Harker MJ, Farmer D, Waldhausen JH. Peer assessment of pediatric surgeons for potential risks of radiation exposure from computed tomography scans. *J Pediatr Surg* 2007a;42(7):1157-64.
- Rice HE, Frush DP, Farmer D, Waldhausen JH. Review of radiation risks from computed tomography: essentials for the pediatric surgeon. *J Pediatr Surg* 2007b;42(4):603-7.
- Sagan LA. What is hormesis and why haven't we heard about it before? *Health Phys* 1987;52(5):521-5.
- Santé Canada. Radioprotection en radiologie – Grands établissements. Code de sécurité 35. Ottawa, ON : Santé Canada; 2008. Disponible à : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/radiation/safety-code_35-securite/safety-code35-securite-fra.pdf.
- Schubert J et Lapp RE. Global radiation limits. *Bulletin of the Atomic Scientists* 1958;14(1):23-6.
- Semelka RC, Armao DM, Elias J, Jr., Huda W. Imaging strategies to reduce the risk of radiation in CT studies, including selective substitution with MRI. *J Magn Reson Imaging* 2007;25(5):900-9.
- Serwer DP. The rise of radiation protection: Science, medicine, and technology in society, 1896-1935. Brookhaven National Laboratory Informal Report BNL 22279. Upton, NY : 1976. Disponible à : <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/7212842-JbnLpr/7212842.pdf>.
- Shuryak I, Sachs RK, Brenner DJ. Cancer risks after radiation exposure in middle age. *J Natl Cancer Inst* 2010;102(21):1628-36.
- Siemens Healthcare. Easy guide to low dose. Answers for life. Munich, Allemagne : Siemens AG; 2010. Disponible à : http://www.medical.siemens.com/siemens/it_IT/gg_nm_FBAs/files/broch/br_10_ct_low_dose_guide.pdf.
- Siemiatycki J, Richardson L, Straif K, Latreille B, Lakhani R, Campbell S, et al. Listing occupational carcinogens. *Environ Health Perspect* 2004;112(15):1447-59.
- Smith-Bindman R, Lipson J, Marcus R, Kim KP, Mahesh M, Gould R, et al. Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer. *Arch Intern Med* 2009;169(22):2078-86.

- Société canadienne du cancer (SCC). Statistiques canadiennes sur le cancer 2009. Toronto, ON : SCC; 2009. Disponible à : http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca/collection_2009/statcan/CS2-37-2009F.pdf.
- Statistique Canada. Projections démographiques pour le Canada, les provinces et les territoires 2009 à 2036. Ottawa, ON : Statistique Canada; 2010. Disponible à : <http://www.statcan.gc.ca/pub/91-520-x/91-520-x2010001-fra.pdf>.
- Thomas KE, Parnell-Parmley JE, Haidar S, Moineddin R, Charkot E, BenDavid G, Krajewski C. Assessment of radiation dose awareness among pediatricians. *Pediatr Radiol* 2006;36(8):823-32.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I: Sources. General Assembly, Official Records, Fifty-fifth session, Supplement no 46 (A/55/46). New York, NY : UNSCEAR; 2000. Disponible à : http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html.
- Van Hoe L et Miserez M. Effectiveness of imaging studies in acute appendicitis: A simplified decision model. *Eur J Emerg Med* 2000;7(1):25-30.
- Verdun FR, Gutierrez D, Vader JP, Aroua A, Alamo-Maestre LT, Bochud F, Gudinchet F. CT radiation dose in children: A survey to establish age-based diagnostic reference levels in Switzerland. *Eur Radiol* 2008;18(9):1980-6.
- Wall BF et Hart D. Revised radiation doses for typical X-ray examinations. Report on a recent review of doses to patients from medical X-ray examinations in the UK by NRPB. National Radiological Protection Board. *Br J Radiol* 1997;70(833):437-9.
- Watson DJ et Coakley KS. Paediatric CT reference doses based on weight and CT dosimetry phantom size: Local experience using a 64-slice CT scanner. *Pediatr Radiol* 2010;40(5):693-703.
- Whitlock EP, Lin JS, Liles E, Beil TL, Fu R. Screening for colorectal cancer: A targeted, updated systematic review for the U.S. Preventive Services Task Force. *Ann Intern Med* 2008;149(9):638-58.
- Willmann JK, Baumert B, Schertler T, Wildermuth S, Pfammatter T, Verdun FR, et al. Aortoiliac and lower extremity arteries assessed with 16-detector row CT angiography: Prospective comparison with digital subtraction angiography. *Radiology* 2005;236(3):1083-93.
- Young KC, Burch A, Oduko JM. Radiation doses received in the UK Breast Screening Programme in 2001 and 2002. *Br J Radiol* 2005;78(927):207-18.