

# Cancer chez les enfants dû à l'exposition aux rayonnements ionisants

Antonella Mazzei-Abba<sup>a</sup>, Christophe L. Folly<sup>a</sup>, Ben D. Spycher<sup>a</sup>

Traduction: Astrid Coste<sup>a</sup>, Manon Jaboyedoff<sup>a</sup>, Christian Kreis<sup>a</sup>

## Introduction

Les effets des radiations ionisantes sur la santé humaine, en particulier chez les enfants, suscitent de nombreux débats et sont un sujet de préoccupation majeur en santé publique. Cet article se penche plus particulièrement sur les risques de cancer de l'enfant associés aux expositions rencontrées quotidiennement par la population générale. Comme il y a encore peu de preuves épidémiologiques des effets d'une exposition aux radiations à faible dose, la plupart de nos connaissances sur le sujet proviennent d'études sur des populations très ou modérément exposées. Ainsi, nous commençons par résumer les connaissances sur les expositions à des doses moyennes et élevées avant d'approfondir la question des expositions aux faibles doses.

Cet article aborde les questions suivantes : 1) Qu'entendons-nous par « radiations ionisantes » et comment les mesurer ? 2) Quels sont les risques de cancer associés à l'exposition aux radiations ionisantes ? 3) Dans quelle mesure les enfants sont-ils plus sensibles à cette exposition que les adultes ? 4) Quelles sont les sources d'exposition aux radiations ionisantes rencontrées par la population générale en Suisse ?

## Qu'est-ce que les radiations ionisantes et comment les mesurer ?

Pour la plupart des gens, les termes « radioactivité » ou « radiation radioactive » et leurs effets sur la santé sont associés à des événements dramatiques, comme les accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima ou la menace des bombes atomiques. Le terme « radioactivité » décrit la propriété d'émettre de la radiation qu'ont certains atomes, appelés radionucléides ou radio-isotopes, et non la radiation émise par ces atomes radioactifs. Cette radiation, et plus précisément toute radiation ayant suffisamment d'énergie pour

ioniser des atomes, ce qui signifie provoquer la libération d'électrons, est appelée « radiation ionisante ». Les atomes radioactifs ont un noyau instable. Avec le temps, ces noyaux se désintègrent de différentes manières, principalement en émettant un noyau d'hélium (particule  $\alpha$ ) ou un électron ou positron (particules  $\beta^-$  et  $\beta^+$ ), se transformant ainsi en un autre élément. Après désintégration, les atomes sont laissés dans un état « excité » et se désexcitent en émettant un photon de haute énergie, processus communément appelé désintégration  $\gamma$ .

Nous sommes exposés en permanence à un rayonnement naturel d'origine cosmique et terrestre. Les rayons cosmiques sont des particules de haute énergie provenant de l'espace extra-terrestre ou, de manière moins significative pour ce qui concerne l'exposition à la surface terrestre, du soleil. Ces particules interagissent avec l'atmosphère, générant des rayonnements cosmiques qui atteignent la surface de la terre. Le rayonnement terrestre provient des radionucléides potassium-40, isotopes de l'uranium et thorium-232, qui sont présents dans la croûte terrestre. En raison du processus de désintégration de ces radionucléides et de leurs produits, du rayonnement  $\gamma$  est émis de manière constante à la surface terrestre par le sol et les roches. Le radon-222, un produit de désintégration de l'uranium, présente un intérêt particulier. Tandis que les autres produits de désintégration mentionnés sont solides dans la plupart des conditions, le radon est un gaz (lourd) qui peut être libéré par le sol et les roches dans l'atmosphère, mais aussi dans des immeubles où il peut s'accumuler. Les concentrations intérieures en radon peuvent beaucoup varier en fonction de la porosité et de la perméabilité du sol/de la roche, des caractéristiques de l'immeuble, et de la ventilation de la pièce.

Les deux unités usuelles de mesure de la dose de radiation sont le gray et le sievert (*Tableau*

1). Le gray est utilisé pour quantifier l'énergie physique absorbée par unité de masse (dose absorbée). Pour une dose absorbée donnée, l'effet sur les cellules vivantes dépend du type de radiation et est 20 fois plus élevée pour la radiation  $\alpha$  que pour la radiation  $\gamma$ . Les doses équivalentes combinent les doses absorbées de différents types de radiation en appliquant un facteur de pondération pour chaque dose afin de tenir compte des différences d'efficacité biologique. Une procédure similaire est faite pour tenir compte des différentes sensibilités des organes à la radiation. Pour les doses équivalentes et doses effectives, l'unité sievert est utilisée. Des conventions de conversion des doses sont utilisées pour estimer les doses basées sur la concentration des radionucléides dans l'environnement, par exemple les concentrations intérieures de radon qui sont typiquement mesurées en Bq/m<sup>3</sup>.

En 2011, la commission internationale de protection radiologique (*International Commission on Radiological Protection, ICRP*) a publié un rapport analysant les études sur le radon et le risque de cancer pulmonaire. Les résultats de ces diverses études ont amené l'ICRP à conclure que la convention de conversion de dose devait être adaptée, menant ainsi à doubler la dose estimée de radon en comparaison avec les études précédentes<sup>1)</sup>. Même si les cancers pulmonaires sont rares chez l'enfant, l'exposition au radon à un jeune âge pourrait augmenter le risque de cancer pulmonaire plus fortement qu'en cas d'exposition plus tardive.

## Risques de cancer associés aux doses modérées à fortes

La plupart des connaissances que nous avons au sujet des effets des radiations ionisantes sur la santé humaine viennent de populations exposées à un niveau de dose excédant de loin l'exposition de la population générale, comme notamment celle des survivants de la bombe atomique. L'induction de cancer appartient aux effets stochastiques de la radiation, ce qui signifie qu'il n'y a pas de seuil en-dessous duquel il n'y a pas d'effet et que la probabilité qu'un effet apparaisse augmente linéairement avec la dose reçue. Au contraire, les effets déterministes surviennent uniquement au-dessus d'un certain seuil, le risque augmentant fortement lorsque ce seuil est dépassé.

<sup>a</sup>Institut de médecine sociale et préventive, Université de Berne

Types de radiation ionisante importantes		
<b>Rayonnement <math>\alpha</math></b> Noyau hélium $W_R = 20$	<b>Rayonnement <math>\beta</math></b> Electrons/positrons $W_R = 1$	<b>Rayonnement <math>\gamma</math></b> Photons de haute énergie $W_R = 1$
Profondeur: <10 <sup>2</sup> $\mu\text{m}$	Profondeur: $\sim 10^1$ mm	Peut pénétrer le corps humain
Unités physiques		
<b>Activité</b>	Nombre de désintégrations par unité de temps. Becquerel: 1 Bq = 1 s <sup>-1</sup>	
<b>Dose absorbée</b>	Energie absorbée par unité de masse. Gray: 1 Gy = 1 J/kg	
Unités calculées		
<b>Dose équivalente</b>	Dose absorbée multipliée par un facteur $W_R$ , pour tenir compte des différents effets selon le type de radiation. Mesurée en Sievert: 1 Sv = 1 J/kg	
<b>Dose effective</b>	Dose équivalente multipliée par un facteur $W_T$ , pour tenir compte des différences de susceptibilité des organes à la radiation. Mesurée en Sievert	

**Tableau 1 :** Types de radiation les plus importants émis par désintégration atomique. Comme les particules chargées interagissent en raison de leur charge avec les électrons des atomes et molécules qu'ils rencontrent, la radiation des particules chargées ne pénètre en général pas profondément dans le corps. Différentes unités de dose sont utilisées pour quantifier l'exposition aux radiations ionisantes.

### Survivants des bombes atomiques

L'étude Life-Span (LSS), une étude à long terme sur les survivants des bombes atomiques d'Hiroshima et Nagasaki, apporte des preuves indiscutables d'une relation dose-effet entre exposition aiguë aux radiations ionisantes et risque de tumeurs solides et hémopathies malignes<sup>2</sup>. Pour une dose élevée de l'ordre de 0,1 à 2 Gy, le risque augmente linéairement pour les tumeurs solides; alors que pour les leucémies, la relation est plutôt courbée vers le haut. L'augmentation du risque dépend également de l'âge au moment de l'exposition et du temps écoulé depuis l'exposition.

Une autre découverte importante de la LSS est le fait que les enfants sont plus sensibles aux radiations ionisantes en comparaison des adultes. Cela est encore plus marqué pour les leucémies. Pour les expositions dans l'enfance, la LSS a montré que le risque de leucémie variait de manière importante en fonction du temps écoulé depuis l'exposition. Après une période de latence d'à peu près deux ans, le risque augmentait rapidement avant de diminuer à nouveau. En raison du petit nombre de cas, la forme de cette courbe temporelle ne peut pas être précisément définie. Néanmoins, les données suggèrent que

le risque peut atteindre un niveau 50 fois supérieur ou plus par Gy environ 7 ans après une exposition pendant l'enfance<sup>3</sup>. Les résultats de la LSS et d'autres études suggèrent que pour au moins un quart des types de tumeurs, le risque de développer un cancer plus tard est plus élevé pour les personnes exposées pendant l'enfance que pour celles exposées à l'âge adulte. Cela inclut les leucémies, les cancers de la thyroïde, de la peau, du sein, et les tumeurs cérébrales. Les risques peuvent en outre varier significativement selon l'âge pendant l'enfance<sup>4</sup>.

Bien que la LSS ait apporté des preuves importantes sur les risques de cancer pour une large amplitude de doses de modérées à élevées, elle fournit très peu d'informations sur le risque associé à des doses inférieures à 100 mSv. À des fins de protection radiologique, on fait communément la présomption que ces risques peuvent être extrapolés d'après les modèles d'effet-dose obtenus de la LSS, en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de seuil en deçà duquel aucun risque de cancer n'existe<sup>3</sup>. Cependant, cette hypothèse se référant à un modèle linéaire sans seuil est controversée.

### Radiothérapie

Le risque de cancer chez les enfants exposés

à la radiothérapie effectuée dans le contexte de pathologies oncologiques ou pour d'autres pathologies historiquement traitées par radiothérapie (par exemple thymus élargi, tinea capitis, ou hémangiome cutané) a également été étudié. La plupart des études ont montré un excès de cas de leucémies quelques années après l'exposition, confirmant l'observation d'une courte période de latence minimum faite auprès des survivants de la bombe atomique<sup>5</sup>. Une revue systématique de ces études a également mis en évidence des risques constamment élevés de tumeurs du système nerveux central (SNC)<sup>6</sup>, mais avec une grande variation dans la force de l'association selon les études.

Les résultats des études sur les expositions d'origine thérapeutique doivent être interprétés avec précaution. Dans le cas de traitements oncologiques, les effets attribués à la radiothérapie peuvent être confondus avec ceux des traitements médicamenteux d'une chimiothérapie reçus concomitamment. Par ailleurs, les enfants traités par radiothérapie ne sont peut-être pas représentatifs de la population générale et, dans le cas de ceux traités pour un cancer, peuvent avoir une prédisposition génétique aux cancers.

### Etudes épidémiologiques s'intéressant aux faibles doses

Peu d'enfants sont exposés à des doses aussi élevées que celles des radiations thérapeutiques. Cependant, l'exposition à de faibles doses lors d'exams radiologiques diagnostiques comme les CT-scans est plus fréquente et l'exposition aux radiations ionisantes d'origine naturelle à de faibles débits de dose est ubiquitaire (Tableau 2). La mesure du risque de cancer associé à ces faibles doses est habituellement fondée sur une extrapolation des modèles provenant de populations exposées à de plus fortes doses, principalement des survivants des bombes atomiques. La raison en est que les preuves directes des risques dus aux radiations des populations exposées à de faibles doses sont peu nombreuses et sont plus difficiles à obtenir. Le problème principal est que des échantillons de grande taille sont nécessaires afin d'avoir la puissance statistique suffisante pour détecter le risque présumé faible associé à une exposition à des doses faibles.

### Exposition médicale

Récemment, plusieurs études ont investigué le risque de cancer dans des cohortes d'en-

fants ayant bénéficié de CT-scans cérébraux. Les deux plus grandes études à ce jour, une étude britannique incluant 180 000 enfants exposés à des CT-scans et une étude australienne en incluant 680 000 ont montré des résultats similaires<sup>7),8)</sup>. Pour les tumeurs cérébrales, les augmentations estimées étaient de 2,3% (95% IC: 1,0-4,9%) et 2,1% (1,4-2,9%) par mGy de dose reçue par le cerveau dans les études britanniques et australiennes respectivement. Les estimations correspondantes pour les leucémies étaient de 3,6% (0,5-12%) et 3,9% (1,4-7%). Cela suggérerait que les doses cumulées à la moelle osseuse d'environ 50 mGy (correspondant à environ 5 à 10 CT cérébraux dans l'étude britannique) et au cerveau d'environ 60 mGy (2 à 3 CT cérébraux) pourraient respectivement tripler le risque de leucémie et de tumeurs cérébrales. Les deux études suggèrent également une augmentation nette des risques associés à la radiation lors d'âge plus jeune au moment de l'exposition. Deux études plus petites en France et en Allemagne étaient aussi indicatives de risques augmentés dû aux scanners pédiatriques, néanmoins les intervalles de confiance étaient larges et compatibles avec l'absence d'effet.

Les résultats des études sur les scanners pédiatriques doivent être analysés avec prudence. La principale réserve réside dans le fait que la prescription de scanners en première instance peut inclure la suspicion de cancer (causalité inversée), ou le diagnostic ou la surveillance de certaines conditions elles-mêmes liées à un risque accru de cancer (biais d'indication)<sup>9)</sup>. Dans l'étude française mentionnée, l'ajustement sur les facteurs prédisposant aux cancers a réduit les estima-

tions d'augmentation de risque. Les incertitudes sur la reconstitution de la dose reçue sont une autre limite majeure de ces études. Dans le but de dépasser ces limitations, une grande étude multinationale a été lancée, l'étude EPI-CT, avec des premiers résultats attendus prochainement. Elle prévoit d'étudier le risque de cancer chez les patients pédiatriques ayant bénéficié d'un CT-scan et de reconstruire les doses spécifiques à chaque organe en utilisant des méthodes d'estimation de dose améliorées, et prévoit d'inclure plus d'un million de patients de différents pays européens (<http://epi-ct.iarc.fr>).

### Rayonnement naturel

Durant la dernière décennie, plusieurs études à l'échelle nationale en Europe et en Suisse ont investigué l'association entre le rayonnement naturel et les cancers pédiatriques. Afin d'obtenir de grandes populations d'étude, ces dernières identifient les cas de cancers pédiatriques à partir de registres nationaux de cancers pédiatriques et incluent des témoins sains à partir de bases de données recueillies en routine. Dans une étude anglaise par exemple, les témoins sains ont été sélectionnés à partir d'un registre de naissance, tandis qu'une étude suisse a utilisé une cohorte fondée sur le recensement de la population (*Swiss National Cohort*). Ces études, appelées études fondées sur des registres, estiment le rayonnement naturel (comme le radon ou le rayonnement gamma terrestre) au lieu de domicile de l'enfant en utilisant des modèles de prédictions géographiques à partir de mesures de radiation faites dans tout le pays. Cela évite d'avoir recours à la participation active des familles au travers de questionnaires sur l'exposition ou de devoir faire des mesures au lieu de domicile des

enfants. En effet, la nécessité de la participation des familles peut facilement conduire à des taux de réponses faibles, entraînant des biais dans l'étude.

La première étude de ce type, réalisée au Danemark, a montré un risque accru de leucémie chez les sujets exposés à leur domicile à des taux élevés de radon<sup>10)</sup>. Par la suite, une plus grande étude britannique a montré que le risque de leucémie chez l'enfant augmentait de 12% (intervalle de confiance IC de 95%: 3-22%) par mSv de dose équivalente cumulée de rayonnement gamma terrestre au niveau de la moelle osseuse. Elle n'a par contre pas montré d'association avec d'autres cancers, ni d'association avec l'exposition au radon en milieu résidentiel<sup>11)</sup>. De manière similaire, nous n'avons pas trouvé d'association entre cancer de l'enfant et exposition au radon dans les études fondées sur les données du Registre Suisse du Cancer de l'Enfant et de la Cohorte Nationale Suisse<sup>12)</sup>, mais une association a été mise en évidence entre leucémie et tumeur du SNC avec la dose totale de radiations gamma terrestres et cosmiques<sup>13)</sup>. Pour ces deux catégories diagnostiques, une augmentation de risque de 4% (IC: 0-8%) par mSv de dose équivalente cumulée au corps entier a été estimée. Même si l'incertitude est importante, les estimations du risque de leucémie chez l'enfant en relation avec le rayonnement gamma des études suisses et britanniques sont en accord avec celles concernant les survivants de la bombe atomique. Au contraire, une grande étude française récente n'a pas trouvé de lien entre cancer de l'enfant et rayonnement ambiant, que cela concerne le radon ou le rayonnement gamma terrestre<sup>14)</sup>. Une étude finlandaise récente a rapporté de faibles preuves d'augmentation du risque de leucémie de l'enfant en lien avec l'exposition au rayonnement gamma terrestre, mais uniquement chez les enfants de 2 à 6 ans (correspondant à la fenêtre d'incidence maximale)<sup>15)</sup>.

Ces études ont leurs limitations, comme pour les études s'intéressant aux CT-scans. Une des plus importantes sources d'erreur concerne l'estimation des doses cumulées reçues par les enfants, qui est faite sur la base du lieu de résidence. Elles incluent notamment les déménagements (les lieux de vie antérieurs sont rarement disponibles), les erreurs de doses prédites ou de concentrations de radon au domicile des enfants, ainsi que les incertitudes concernant la fenêtre de

Source	Doses types	Années de rayonnement naturel
Radiothérapie	10 - 100 Gy	>2300 ans
Survivants de bombes atomiques	<0,1 - 1 Sv	<20 - 235 ans
CT-scan abdominal	5 - 13 mSv	1.3 - 3 ans
Rayonnement naturel en Suisse	~4,3 mSv/an	1 an
CT-scan cérébral	~ 2mSv	~ 6 mois
Radiographie du thorax	0,1 mSv	1 semaine
Vol long-courrier	0,06 mSv	5 jours
Radiographie d'un membre	0,001 mSv	2 heures

**Tableau 2:** Doses reçues lors de certaines interventions médicales en comparaison avec les doses reçues en Suisse par rayonnement naturel et radon. Source: UNSCEAR, 2008<sup>25)</sup> et Wakeford, 2013<sup>5)</sup>.

susceptibilité (qui nécessiterait de pondérer les doses reçues différemment en fonction de l'âge) et les périodes de latence.

### Contamination radioactive

Les essais nucléaires dans les années 1950 à 1960 ont amené à la dispersion de quantités significatives de matériel radioactif dans l'atmosphère et à la surface terrestre<sup>16</sup>). Les doses disséminées par ces essais étaient faibles à élevées. Celles reçues par la population générale ont culminé au début des années 1960 et étaient plus élevées dans l'hémisphère nord, où la plupart des essais ont eu lieu. Une analyse des tendances des cas de leucémie de l'enfant fondée sur des grands registres de cancers de différents continents n'a pas montré d'augmentation notable durant cette période, même si une étude a rapporté une augmentation dans les pays nordiques<sup>17</sup>). Un risque plus élevé de cancer de la thyroïde ou de leucémie (à tout âge) a été trouvé dans les populations exposées à des plus hautes doses en raison de leur proximité à certains sites d'essais nucléaires (Nevada, îles Marshall)<sup>5</sup>).

En 1986, la catastrophe nucléaire de Tchernobyl a entraîné la libération d'importantes quantités d'éléments radioactifs dans l'atmosphère, conduisant à une exposition humaine à la radioactivité sur de vastes régions. L'exposition humaine à la radioactivité a eu lieu principalement au travers de l'isotope à courte demi-vie iode-131, qui s'accumule dans la thyroïde lorsqu'il est inhalé ou ingéré, mais aussi au travers d'isotopes plus stables, comme le césium-137, qui ont été dispersés sur des grandes distances et se sont accumulés dans les sols par précipitation. Dans les régions fortement contaminées (actuelles Ukraine, Biélorussie et Russie), une augmentation du risque de leucémie a été rapporté chez les individus exposés à l'âge de moins de 6 ans et in utero<sup>5</sup>). Même si les risques estimés sont globalement compatibles avec les modèles de risque standard dérivés des survivants des bombes atomiques, il y a des doutes quant à la fiabilité des données utilisées dans ces études. Aucune augmentation du risque de leucémie n'a été rapportée dans les régions extérieures à l'URSS. Environ un quart des cancers de la thyroïde survenus en 2001-2008 parmi les habitants non-évacués des régions contaminées en Ukraine, Biélorussie et Russie qui avaient moins de 18 ans au moment de l'accident ont été attribués à l'exposition à la radiation<sup>18</sup>).

La centrale nucléaire japonaise de Fukushima-Daiichi a été endommagée à la suite du tremblement de terre et du tsunami de 2011, dispersant des quantités significatives de matériel radioactif. En comparaison avec Tchernobyl, les doses de radioactivité reçues par les populations ont été bien plus faibles. A la suite de cet accident, un programme de santé a été mis en place pour les populations touchées et constitue une cohorte d'étude. Il inclut des questionnaires et des dépistages médicaux des habitants des zones évacuées et des ultrasons de la thyroïde pour les enfants (18 ans ou moins au moment de l'accident), et durera 30 ans. Deux séries de dépistage de cancer de la thyroïde ont déjà été effectuées et n'ont pas montré d'association entre la prévalence de cancer de la thyroïde et le niveau d'exposition. La prévalence était de manière générale plus élevée qu'attendue, mais cela a été attribué à l'effet du dépistage et la cohorte est encore trop jeune pour tirer des conclusions définitives, les effets sur la santé pouvant se manifester dans le futur<sup>19</sup>).

### Centrales nucléaires

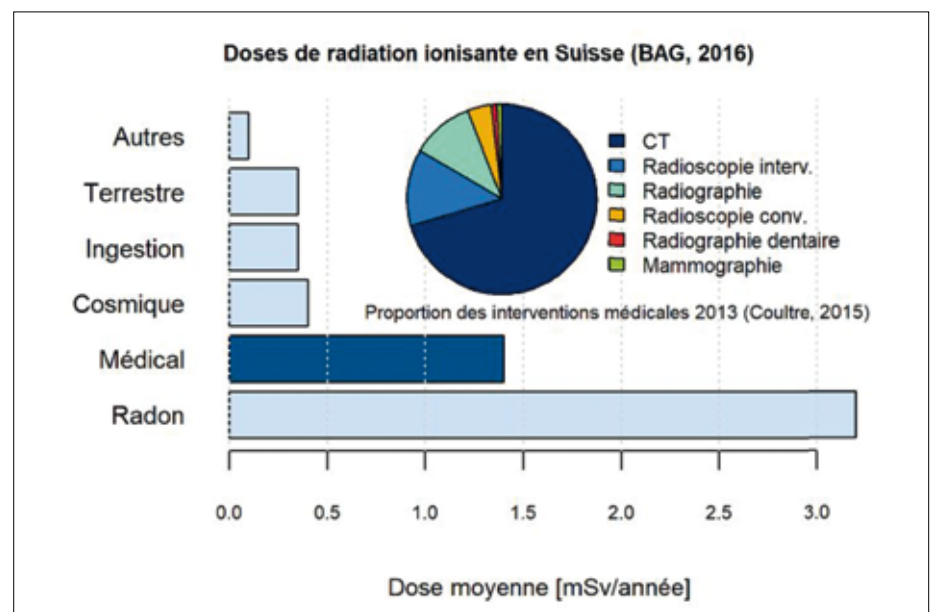
Il y a depuis des années un grand intérêt concernant la potentielle augmentation du risque de leucémie de l'enfant autour des centrales et autres installations nucléaires<sup>20</sup>). Cet intérêt a été nourri notamment par des rapports mentionnant un regroupement de cas de leucémies autour de sites de ce type, comme le «Seascale leukaemia cluster» au-

tour de l'usine de retraitement nucléaire de Sellafield au nord de l'Angleterre. Néanmoins, des investigations minutieuses n'ont pas pu mettre en lien ces regroupements avec la contamination radioactive de ces sites. En cas de fonctionnement normal, les doses additionnelles de radioactivité émanant des radionucléides émis par les centrales nucléaires et reçues par les populations avoisinantes correspondent à une petite fraction du rayonnement naturel. Certaines études ayant systématiquement investigué l'incidence de cancer de l'enfant autour des centrales nucléaires ont trouvé un risque accru, en particulier l'étude allemande KIKK qui a rapporté un doublement du risque parmi les enfants de moins de 5 ans vivant dans un rayon de 5 km d'une centrale nucléaire. Ces observations restent inexplicables<sup>21</sup>). Dans une étude investiguant les cancers chez les enfants vivant à proximité des centrales nucléaires en Suisse (CANUPIS), nous n'avons pas trouvé de preuves d'une augmentation du risque de cancer<sup>22</sup>).

### Exposition aux rayonnements ionisants – Situation en Suisse

La contribution des différentes sources de radiation à l'exposition de la population générale en Suisse est décrite dans la *Figure 1*.

Radon: La source de radiation ionisante la plus importante pour la population suisse vient du radon domestique et est estimée à



**Figure 1:** Exposition aux radiations ionisantes en Suisse sur la base des derniers rapports de la section sur la radioactivité environnementale de l'OFSP. Les proportions dues aux expositions médicales sont tirées de Coultré, 2015<sup>24</sup>).

3,2 mSv/an<sup>23)</sup>. Les concentrations en radon varient beaucoup selon les régions (figure 2B). A l'intérieur des bâtiments, les concentrations varient de manière encore plus importante et dépendent des caractéristiques du bâtiment et de son utilisation (chauffage, air conditionné, aération). Comme le radon émet des particules alpha qui ne peuvent pénétrer profondément dans les tissus, les poumons et la peau reçoivent la plus grande partie de la dose. Le radon est la seconde cause de cancer pulmonaire après le tabagisme.

Rayonnement terrestre et cosmique: En raison de sa géologie et topologie complexes, il y a une grande variabilité dans les doses de rayonnement cosmique et de rayonnement gamma terrestre sur le territoire suisse (figure 2A). Le rayonnement cosmique à la surface terrestre augmente avec l'altitude en raison de l'atmosphère moins protectrice, et atteint des valeurs considérables durant les vols en avion. Le rayonnement terrestre dépend principalement de la concentration des radionucléides dans les sols. Les doses moyennes pour la population générale suisse sont estimées à environ 0,4 mSv/an pour le rayonnement cosmiques et 0,35 mSv/an pour le rayonnement terrestre<sup>23)</sup>. Le rayonnement terrestre gamma des radionucléides provenant des essais nucléaires et de l'accident nucléaire de Tchernobyl ne contribue que de manière marginale aux doses totales de rayonnement de fond.

Ingestion: L'ingestion de radionucléides contribue environ à environ 0,35 mSv/an de la dose totale reçue. Avec une contribution de 0,2 mSv/an, la plus grande proportion provient du potassium-40. Les isotopes artificiels sont peu significatifs, les plus courants (strontium-90 et césium-137) étant responsables de moins de 0,01 mSv/an<sup>23)</sup>.

Procédures médicales: Après le radon et le rayonnement naturel, les procédures médicales sont la deuxième source de rayonnement ionisant en Suisse. Entre 2008 et 2013, la dose effective par habitant de rayonnement ionisant dû aux procédures diagnostiques a augmenté d'environ 17%<sup>24)</sup>. En Suisse, en 2013, la dose moyenne d'origine médicale reçue était de 1,4 mSv/an<sup>23)</sup>. Cette moyenne peut être trompeuse puisque plus de deux-tiers de la population ne reçoit que des doses marginales, voire pas du tout, et qu'un petit pourcentage reçoit plusieurs fois la dose moyenne. La source la plus importante d'exposition aux rayonnements ionisants en milieu médical est due aux CT-scans, représentant 70% de cette exposition.

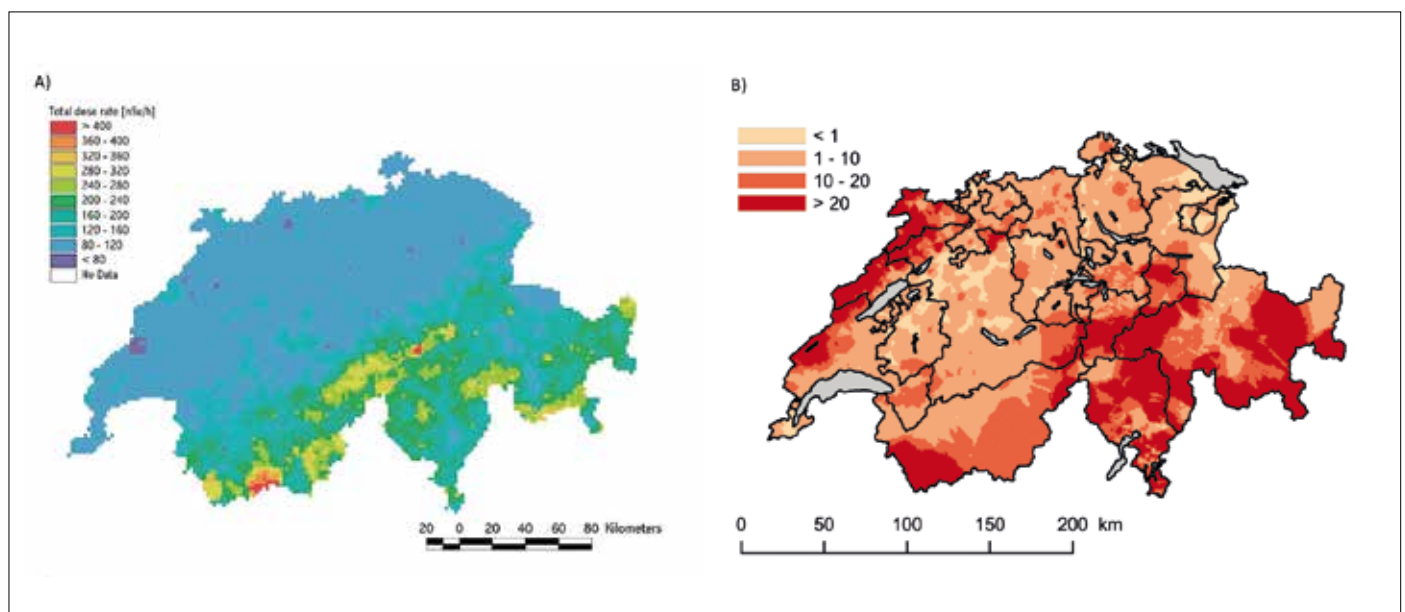
### Conclusions

Il est incontesté que l'exposition aux radiations ionisantes peut induire des cancers chez l'humain. Les preuves scientifiques permettant de quantifier le risque induit par la radiation proviennent de populations relativement petites et qui ont été exposées à des doses

dépassant largement celles auxquelles la population générale est exposée au quotidien. Ces études montrent que les enfants sont plus sensibles à l'exposition aux radiations que les adultes. L'estimation du risque de cancers associés à de faibles doses de radiation est fondée sur l'extrapolation de modèles de risque standard dérivés des études des survivants des bombes atomiques.

Les preuves épidémiologiques directes du risque de cancer associé à des faibles doses sont plus difficiles à obtenir en raison de la nécessité d'avoir des échantillons de grande taille et de la difficulté à évaluer de manière fiable l'exposition. Néanmoins, des études de cohorte d'enfants exposés à des CT-scans ont récemment rapporté un risque augmenté, qui suit les modèles de risque standard. Au contraire, les résultats des études sur le risque de cancer de l'enfant associé au rayonnement naturel ou au radon résidentiel sont discordants.

La plus grande préoccupation de santé publique en ce qui concerne l'exposition à la radiation dans la population générale est l'exposition au radon résidentiel, qui compte pour plus de 50% de la dose annuelle en Suisse. De nouveaux règlements et campagnes de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) traitent du « problème du radon » avec le but de garantir un niveau d'activité en-dessous de 300 Bq/m<sup>3</sup> à l'intérieur (Plan d'action



**Figure 2:** A) Cartographie de la radiation terrestre et cosmique en Suisse fondée sur un modèle de Rybach et al. 2002<sup>26)</sup>. B) Carte du risque de radon en Suisse. Risque pour les bâtiments d'avoir une concentration en radon plus élevée que la référence de 300Bq/m<sup>3</sup>. Source : OFSP.

radon 2012-2020). Environ un quart de la dose annuelle reçue par la population suisse provient des examens radiologiques, en particulier des CT-scans. Au vu de la susceptibilité augmentée des enfants à la radiation, il est particulièrement important d'éviter toute exposition non-nécessaire en pédiatrie.

## References

- 1) Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E, Marsh JW. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. *Annals of the ICRP*. 2010;40(1):1-64.
- 2) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2006, Effects of ionizing radiation, Vol. I Annex A, Epidemiological studies of radiation and cancer. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2006.
- 3) Richardson D, Sugiyama H, Nishi N, Sakata R, Shimizu Y, Grant EJ, et al. Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950-2000. *Radiation research*. 2009;172(3):368-82.
- 4) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2013, Sources, effects and risks of ionizing radiation, vol. II Annex B, Effects of radiation exposure of children. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2013.
- 5) Wakeford R. The risk of childhood leukaemia following exposure to ionising radiation—a review. *Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection*. 2013;33(1):1-25.
- 6) Braganza MZ, Kitahara CM, Berrington de Gonzalez A, Inskip PD, Johnson KJ, Rajaraman P. Ionizing radiation and the risk of brain and central nervous system tumors: a systematic review. *Neuro-oncology*. 2012;14(11):1316-24.
- 7) Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2012;380(9840):499-505.
- 8) Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *Bmj*. 2013;346:f2360.
- 9) Journy N, Rehel JL, Ducou Le Pointe H, Lee C, Brisse H, Chateil JF, et al. Are the studies on cancer risk from CT scans biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. *British journal of cancer*. 2015;112(1):185-93.
- 10) Raaschou-Nielsen O, Andersen CE, Andersen HP, Gravesen P, Lind M, Schuz J, et al. Domestic radon and childhood cancer in Denmark. *Epidemiology*. 2008;19(4):536-43.
- 11) Kendall GM, Little MP, Wakeford R, Bunch KJ, Miles JC, Vincent TJ, et al. A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980-2006. *Leukemia*. 2013;27(1):3-9.
- 12) Hauri D, Spycher B, Huss A, Zimmermann F, Grotzer M, von der Weid N, et al. Domestic radon exposure and risk of childhood cancer: a prospective census-based cohort study. *Environmental health perspectives*. 2013;121(10):1239-44.
- 13) Spycher BD, Lupatsch JE, Zwahlen M, Roosli M, Niggli F, Grotzer MA, et al. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study. *Environmental health perspectives*. 2015;123(6):622-8.
- 14) Demoury C, Marquant F, Ielsch G, Goujon S, Debayle C, Faure L, et al. Residential Exposure to Natural Background Radiation and Risk of Childhood Acute Leukemia in France, 1990 - 2009. *Environmental health perspectives*. 2016.
- 15) Nikkila A, Erme S, Arvela H, Holmgren O, Raitanen J, Lohi O, et al. Background radiation and childhood leukemia: A nationwide register-based case-control study. *International journal of cancer Journal international du cancer*. 2016;139(9):1975-82.
- 16) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2000, Sources and effects of ionizing radiation, vol. I Sources, Annex C, Exposures to the public from man-made sources of radiation. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2000.
- 17) Wakeford R, Darby SC, Murphy MF. Temporal trends in childhood leukaemia incidence following exposure to radioactive fallout from atmospheric nuclear weapons testing. *Radiation and environmental biophysics*. 2010;49(2):213-27.
- 18) UNSCEAR. Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2018.
- 19) UNSCEAR. Developments since the 2013 UNSCEAR Report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the great East-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2017.
- 20) Wakeford R. Childhood leukaemia and nuclear installations: the long and winding road. *British journal of cancer*. 2014;111(9):1681-3.
- 21) Laurier D, Jacob S, Bernier MO, Leuraud K, Metz C, Samson E, et al. Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review. *Radiation protection dosimetry*. 2008;132(2):182-90.
- 22) Spycher BD, Feller M, Zwahlen M, Roosli M, von der Weid NX, Hengartner H, et al. Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study. *International journal of epidemiology*. 2011;40(5):1247-60.
- 23) Bundesamt für Gesundheit. Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz, Jahresbericht 2017. Bundesamt für Gesundheit BAG, Abteilung Strahlenschutz, Schweizerische Eidgenossenschaft; 2018.
- 24) Coultre RL, Bize J, Champendal M, Wittwer D, Trueb P, Verdun FR. Exposure of the Swiss population to ionizing radiation in medical radiology in 2013. Lausanne: University of Health Sciences HESAV; 2015.
- 25) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2008, Sources and effects of ionizing radiation, vol. I Sources, Annex A, Medical radiation exposures. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2008.
- 26) Rybach L, Bachler B, Bucher B, Schwarz G. Radiation doses of Swiss population from external sources. *J Environ Radioact*. 2002;62(3):277-86.

## Correspondance

[ben.spycher@ispm.unibe.ch](mailto:ben.spycher@ispm.unibe.ch)

Les auteurs n'ont pas déclaré de soutien financier ou d'autres conflits d'intérêts en relation avec cet article.