

# Accident de centrale nucléaire : éviter l'irradiation de la thyroïde

## *Nuclear power plant accident: Avoid thyroid irradiation*

Martin Schlumberger<sup>a</sup>  
Bernard Le Guen<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institut Gustave-Roussy et Université Paris-Saclay,  
rue Edouard-Vaillant, 94800 Villejuif, France

<sup>b</sup>Électricité de France (EDF), DPNT, DPN, Site de  
Cap Ampère, 1, place Pleyel, 93282 Saint-Denis  
cedex, France

### RÉSUMÉ

En cas d'accident de centrale nucléaire, de grandes quantités d'iode radioactif peuvent être libérées dans l'atmosphère. Chez les individus contaminés par inhalation et ingestion de produits contaminés, les isotopes radioactifs de l'iode peuvent irradier la thyroïde. Cette irradiation lorsqu'elle survient à un âge jeune augmente le risque de cancer de la thyroïde. Ceci constitue la principale pathologie radio-induite observée dans les suites de l'accident de Tchernobyl, à la suite duquel aucune mesure de protection n'avait été prise. Les jeunes enfants sont les plus sensibles à l'action cancérigène des radiations ionisantes. Lorsque la dose projetée à la thyroïde est supérieure à 50 mSv, les sujets de moins de 20 ans ainsi que les femmes enceintes et les femmes allaitantes doivent être protégés en priorité par la prise d'iodure de potassium (KI). Son efficacité est maximale lorsque le KI est administré juste avant la contamination, et très peu d'effets secondaires ont été observés notamment en Pologne ou au moment de l'accident de Tchernobyl une prise d'iode a été prescrite à la population. Ceci a conduit des 1997 à sa prédistribution aux populations vivant d'abord dans un rayon de 10 km, puis depuis 2019 dans un rayon de 20 km autour de chaque site nucléaire en France. Cette prise de KI doit être associée aux autres mesures de protection incluant confinement, restrictions alimentaires, voire évacuation.

© 2022 Société Française de Médecine de Catastrophe. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### SUMMARY

*In case of a nuclear power plant accident, enormous amounts of radioactive iodine isotopes may be released in the atmosphere. Individuals can then be contaminated by inhalation and ingestion of contaminated foods and water, and radioactive iodine isotopes will irradiate the thyroid gland. Such an irradiation at a young age will increase the risk of developing a thyroid cancer. That is the main radiation-induced sanitary consequence observed after the Chernobyl accident during which no protective measure was undertaken. Young children are the most sensitive subjects to the carcinogenic effects of ionizing radiation, and when the projected radiation dose to the thyroid gland is over 50 mSv, individuals younger than 20 years, and pregnant and lactating women should be protected in priority by potassium iodine (KI). The efficacy of KI is maximal in case of administration just before any contamination, and very few side effects were observed in Poland where KI was distributed to the general population at the time of the Chernobyl accident. This led in 1997 to a pre-distribution to populations living within 10 km and since 2019 within 20 km from any nuclear power plant in France. The administration of KI should be associated with other protective measures, including sheltering, alimentary restrictions and eventually with evacuation.*

© 2022 Société Française de Médecine de Catastrophe. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

### MOTS CLÉS

Accident nucléaire  
Iode radioactif  
Cancer de la thyroïde  
Iodure de potassium

### KEYWORDS

*Nuclear power plant accident  
Radioactive iodine  
Thyroid cancer  
Potassium iodine*

### Auteur correspondant :

**M. Schlumberger,**  
Institut Gustave-Roussy et  
Université Paris-Saclay, rue  
Edouard-Vaillant, 94800 Villejuif,  
France.  
Adresse e-mail :  
martin.schlumberger@gustaver  
oussy.fr

## INTRODUCTION

Lors des deux accidents majeurs de centrale nucléaire, Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011, des quantités considérables d'iodes radioactifs contenus dans les réacteurs ont été libérées dans l'environnement mais de manière différente [1–4] : à Tchernobyl en raison de l'absence d'enceinte de confinement autour du réacteur, la totalité des iodes s'est retrouvée dans l'atmosphère ; à Fukushima les quantités libérées ont été moindres, de l'ordre de 10 % des quantités libérées à Tchernobyl, car non due à un emballement de la réaction en chaîne comme à Tchernobyl mais à divers accidents impliquant des explosions d'hydrogène par défaut de refroidissement du combustible présent dans sa gaine d'alliage de zirconium. En cas de contamination atmosphérique, l'iode 131 ( $^{131}\text{I}$ ), isotope radioactif de l'iode dont la demi-vie est de 8,02 jours, est mélangé à des isotopes de demi-vie courte, dont l' $^{133}\text{I}$  (demi-vie de 20,8 heures) et le tellurium 132 (demi-vie de 3,26 jours) qui se désintègre en  $^{132}\text{I}$  (demi-vie de 2,3 heures) [5]. La dose de radiations délivrée à la glande thyroïde par chaque isotope radioactif de l'iode dépend de sa concentration radioactive initiale dans la glande et de sa demi-vie effective [6]. En l'absence de mesures prophylactiques lors de l'accident de Tchernobyl, la glande thyroïde des sujets qui vivaient dans les régions contaminées a été irradiée et les doses élevées délivrées chez les enfants et adolescents ont provoqué l'apparition d'un grand nombre de cancers de la thyroïde.

Les doses de radiation seront exprimées en sieverts (Sv) ou millisieverts (mSv) plutôt qu'en grays (Gy) ou milligrays (mGy). Le gray, l'unité internationale de dose absorbée est la plus utilisée en médecine, alors que l'utilisation du sievert est préférée dans le domaine de la radioprotection, y compris pour les estimations des risques. Il s'agit aussi d'une unité de dose absorbée, mais qui prend en compte les différences des effets biologiques de chaque type de rayonnement et aussi le tissu/organe irradié. Dans le cas des isotopes radioactifs de l'iode qui sont des émetteurs bêta et gamma, le facteur de correction est égal à 1. Donc, 1 mSv = 1 mGy. L'unité de radioactivité est le Becquerel (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde.

## LES DÉTERMINANTS DE LA CANCÉROGÈNE RADIO-INDUITE THYROÏDIENNE

Le risque de tumeurs de la thyroïde après exposition aux rayonnements ionisants dépend de deux facteurs principaux : la dose d'irradiation délivrée à la thyroïde et l'âge lors de l'exposition.

Le risque de tumeur de la thyroïde est significatif pour une dose d'environ 40–50 mSv délivrée chez l'enfant et augmente linéairement avec la dose à la thyroïde soit par voie externe (par exemple lors d'une radiothérapie), soit par voie interne lors d'une contamination par les iodes radioactifs par inhalation ou ingestion [7–9].

Lors d'une contamination par l'iode radioactif, la dose à la thyroïde dépend de sa concentration radioactive initiale dans la thyroïde et de sa demi-vie effective, qui elle-même dépend de la demi-vie physique et de la demi-vie biologique [5,6]. La demi-vie biologique dans la thyroïde varie peu entre 80 et 120 jours, c'est donc la demi-vie physique qui détermine l'exposition de la thyroïde. La concentration radioactive est

le rapport entre la quantité d'iode radioactif présente dans la thyroïde et le volume du tissu thyroïdien. La quantité d'iode radioactif présente dans la thyroïde dépend de l'importance de la contamination, quantité d'iode radioactif qui pénètre dans l'organisme par inhalation et surtout par ingestion de produits contaminés et de l'avidité de la thyroïde pour l'iode (pourcentage de l'iode radioactif présent dans l'organisme qui est concentré activement dans la thyroïde). Les cellules thyroïdiennes possèdent en effet un mécanisme très efficace de concentration de l'iode à partir du sang et qui est régulé par la quantité d'iode stable présente dans l'organisme : en cas de carence alimentaire en iode (moins de 10–20  $\mu\text{g}/\text{j}$  comme en Biélorussie, Ukraine et Russie), cette concentration est très efficace et quasiment tout l'iode radioactif présent dans l'organisme peut être concentré dans la thyroïde ; cette concentration est de 15–25 % en cas d'apport alimentaire en iode normal (150  $\mu\text{g}/\text{j}$ ) ; à l'inverse, en cas de surcharge iodée, la fixation de l'iode radioactif va être faible ou nulle. C'est cette propriété qui permet la protection des populations par la prise d'une grande quantité d'iode stable.

L'autre paramètre important est la masse de la thyroïde qui est d'environ 1 g à l'âge de 1 an et qui augmente progressivement avec l'âge pour atteindre 15–20 g chez l'adulte. Le pourcentage d'iode présent dans l'organisme et qui est concentré par la thyroïde est relativement stable avec l'âge du sujet pour un même apport alimentaire en iode et on conçoit que pour un même niveau de contamination, la concentration radioactive soit beaucoup plus élevée chez le jeune enfant que chez l'adulte. En raison de ce mécanisme de fixation très efficace dans une glande de petite taille, une contamination par les iodes radioactifs qui va délivrer une dose peu importante aux différents organes est susceptible de délivrer à la thyroïde une dose 100 à 10 000 fois plus importante, ce qui peut alors induire une tumeur de la thyroïde.

De plus, le suivi des personnes irradiées par voie externe a montré que la sensibilité de la thyroïde à l'action cancérogène des radiations ionisantes est maximale à un âge jeune et diminue avec l'âge pour devenir faible au-delà d'une vingtaine d'années [7–9]. Ainsi, le suivi des sujets suédois exposés à l' $^{131}\text{I}$  pour scintigraphie de la thyroïde qui étaient pour la plupart adultes lors de l'exposition n'a pas décelé d'augmentation du risque de cancer de la thyroïde [10], ce qui ne permet pas d'exclure un effet carcinogène de l'iode 131 à un âge jeune.

On voit donc que les jeunes enfants constituent la population à protéger en priorité, et qu'à l'inverse le risque chez les sujets âgés de plus de 40 ans lors de l'exposition est faible.

## L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

En avril 1986, l'explosion d'un réacteur de la centrale nucléaire de Tchernobyl (nord de l'Ukraine) a provoqué la libération de plus de  $10^{19}$  Bq d'isotopes radioactifs dans l'atmosphère [1,2]. En raison des vents prédominants soufflants vers le nord lors de l'explosion et les jours suivants, les régions les plus contaminées ont été le sud de la Biélorussie, le nord de l'Ukraine et le sud de la Russie. Le nuage radioactif a ensuite contaminé à des niveaux moindres la Pologne, la Scandinavie puis l'Europe de l'Ouest.

Les isotopes radioactifs de l'iode et le césium 137 sont les isotopes radioactifs les plus préoccupants au plan sanitaire. Le

césium 137 a une demi-vie de 30 ans et peut contaminer l'environnement pendant des décennies ; il peut être incorporé dans la chaîne alimentaire et contaminer des individus. Le césium se distribuera au niveau de tous les tissus, l'irradiation gamma sera homogène au niveau corps entier, à la différence des isotopes radioactifs de l'iode qui sont concentrés dans un organe, la thyroïde.

Les isotopes radioactifs de l'iode,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$  et tellurium 132 qui se désintègre en  $^{132}\text{I}$  ont pu contaminer les populations par inhalation ou ingestion d'aliments frais contaminés produits sur place (légumes et surtout lait), en l'absence de restrictions alimentaires ; jusqu'à 100 % de l'iode radioactif présent dans l'organisme peut être concentré dans la thyroïde en cas de carence iodée alimentaire, ce qui va délivrer des doses d'irradiation élevées à la thyroïde. En raison de leur demi-vie (8,02 jours pour  $^{131}\text{I}$ ), le risque de contamination ne dure que quelques semaines après l'accident et n'est plus significatif au-delà de 10 semaines.

Lors de l'accident de Tchernobyl, aucune mesure prophylactique n'a été prise pour éviter la contamination des populations, il n'y pas eu de confinement, ni de restriction alimentaire, ni de distribution généralisée de KI. Le risque de cancer de la thyroïde a été encore augmenté par la carence alimentaire en iode qui était présente dans de nombreuses régions fortement contaminées : la carence en iode augmente la concentration de l'iode dans la thyroïde et ainsi pour une même contamination de l'organisme l'irradiation à la thyroïde sera plus importante et de plus augmente le taux de prolifération des cellules thyroïdiennes, ce qui va favoriser l'accumulation d'anomalies génétiques et ainsi le développement de tumeurs. La dose moyenne estimée à la thyroïde des enfants dans les régions fortement contaminées de Biélorussie, Ukraine et Russie a été de 1100, 330 et 440 mSv, respectivement [1,2] et a été moins importante chez les adultes.

Les doses individuelles à la thyroïde ont été pour la plupart estimées à distance de l'accident avec des modèles qui doivent prendre en compte les multiples facteurs susceptibles de modifier chaque contamination individuelle, tels que les conditions atmosphériques, le mode de vie, les habitudes alimentaires et les paramètres anatomiques et physiologiques individuels et sont donc peu précises ; toutefois, la contamination a été mesurée directement par comptage de l'activité de la thyroïde et des urines pendant les semaines qui ont suivi l'accident dans deux cohortes en Biélorussie et en Ukraine. Plus de 35 ans après l'accident, les cancers de la thyroïde survenus représentent la conséquence sanitaire directe la plus importante de l'exposition aux radiations chez les sujets contaminés qui avaient moins de 18 ans lors de l'accident.

En 1986, deux millions d'enfants et d'adolescents âgés de moins de 18 ans vivaient dans les régions fortement contaminées de Biélorussie, Ukraine et Russie. Des cancers de la thyroïde ont été observés dès 1990 parmi ces enfants qui étaient âgés de moins de 14 ans en 1986 (et dont la majorité avait moins de 10 ans lors de l'accident). Dans ces trois pays, entre 1991 et 2005, un cancer de la thyroïde a été diagnostiqué chez 7000 sujets qui avaient moins de 18 ans lors de l'accident et en 2016 chez plus de 11 000 de ces sujets [1,2].

Le risque de cancer de la thyroïde est plus élevé chez les enfants qui étaient les plus jeunes en 1986 (âgés de 0–4 ans) et pour chaque groupe d'âge en 1986, le risque augmente avec la dose estimée à la thyroïde. Le risque est augmenté chez les sujets contaminés in utero ou peu après la naissance, mais n'est pas augmenté chez les sujets nés plus de un an

après l'accident, à une date où le risque de contamination par les isotopes radioactifs de l'iode avait disparu.

La plupart des cancers de la thyroïde survenus chez les enfants et les adolescents contaminés durant les années qui ont suivi l'accident ont été attribués à l'accident, car l'incidence des cancers sporadiques (non liés à l'irradiation) de la thyroïde cliniquement détectables est faible chez les enfants (0,3–1 cas/an/million d'enfants) et la majorité des tumeurs décelées par l'examen clinique étaient volumineuses et étendues avec métastases ganglionnaires et pulmonaires fréquentes. À l'inverse, l'augmentation de l'incidence observée par la suite lorsque ces enfants ont atteint l'âge adulte peut être aussi liée à une augmentation de l'incidence des cancers sporadiques avec l'âge et à un dépistage plus performant. La plupart de ces sujets jeunes avec cancer de la thyroïde ont survécu, mais ces cancers ont été responsables de plusieurs dizaines de décès.

Dans de multiples études chez les enfants de Biélorussie, Ukraine et Russie une relation linéaire a été établie entre la dose de radiations délivrée par la contamination interne due à l'iode 131 et le risque de cancer de la thyroïde [1,2]. Aucun effet n'a été décelé pour des doses à la thyroïde < 50 mSv, et le risque augmente linéairement pour des doses plus importantes. L'excès de risque relatif de cancer de la thyroïde par gray (EER/Gy) après contamination interne était compris entre 3,2 et 7,35 chez les jeunes enfants [1,2,9]. Ces données sont en accord avec celles observées après irradiation externe (ERR/Gy : 7,7 chez les enfants de moins de 15 ans lors de l'exposition) [7,8].

Chez les adultes qui vivaient en Biélorussie, Ukraine et Russie en 1986 et chez les liquidateurs qui ont travaillé sur le site de Tchernobyl après l'accident, l'incidence du cancer de la thyroïde est augmentée mais moins que chez les enfants et adolescents et sans lien avec la dose d'irradiation à la thyroïde, ce qui suggère un effet majeur du dépistage [1,2].

En dehors de la Biélorussie, Ukraine et Russie, il n'y a pas eu d'augmentation détectable de l'incidence des cancers de la thyroïde qui puisse être considérée comme conséquence de la contamination liée à l'accident de Tchernobyl. En Pologne, 18 millions de doses d'iode stable ont été distribuées à la population pendant les jours qui ont suivi l'accident, la dose individuelle à la thyroïde est restée < 50 mSv et aucune augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde n'a été décelée [11], ce qui a démontré à la fois la faisabilité et l'efficacité de la prophylaxie par l'iode stable. L'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde observée dans la plupart des pays industrialisés depuis le début des années 1980 est en grande partie liée à leur dépistage par échographie [12] chez l'adulte et même chez l'enfant et l'adolescent [13]. Ceci est en accord avec la faible dose d'irradiation délivrée à la thyroïde dans ces pays à la suite de l'accident de Tchernobyl, les doses les plus élevées à la thyroïde des enfants en Europe de l'Ouest étant de quelques mSv, du même ordre de grandeur que l'irradiation naturelle annuelle (2,4 mSv/an en France).

## L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA

Le matin du 11 mars 2011, un tremblement de terre et un tsunami ont provoqué dans le nord-est du Japon 22 626 décès ou disparus, et un accident grave à la centrale nucléaire

TEPCO Fukushima Daiichi, tsunami qui a lui-même été responsable de deux décès parmi les travailleurs de la Centrale [3].

Malgré le désastre provoqué par le séisme et le tsunami, pour minimiser les conséquences sanitaires de l'accident, l'évacuation des zones sous les retombées radioactives a été rapidement effectuée par le gouvernement japonais. Selon le communiqué de l'Agence de sûreté NISA du 4 avril, la déclaration d'urgence radiologique a été faite le 11 mars à 19h03, et après des mesures transitoires de confinement, la décision d'évacuer le périmètre de 3 km autour de Fukushima Daiichi a été prise à 21h23, celle des 10 km a été prise le 12 mars à 5h44 et celle de la zone de 20 km le 12 mars à 18h05. L'évacuation de 85 000 personnes qui vivaient dans un rayon de 20 km autour de la centrale a ainsi eu lieu dès le lendemain de l'accident, et une évacuation des populations vivant dans le nord-ouest de la centrale a été plus tardive. Les conséquences du stress ont été majeures, lié au tremblement de terre, au tsunami et à l'accident de la centrale nucléaire, aux difficultés de communication, à l'évacuation et aux mauvaises conditions de vie [14]. Ceci a provoqué une morbidité élevée, avec syndrome dépressif, addictions (tabac, alcool) et aggravation de pathologies antérieures. Un problème majeur a été la contamination des sols par le césium et un énorme programme de décontamination de 500 km<sup>2</sup> a été mis en place.

En comparaison avec l'accident de Tchernobyl, l'activité libérée d'isotopes radioactifs de l'iode a été bien moindre (un dixième environ) [3], l'apport alimentaire en iode était élevé et la protection contre une irradiation de la thyroïde a été organisée rapidement, avec confinement, évacuation et restrictions alimentaires et en eau de boisson. Il est rapidement apparu que les doses à la thyroïde seraient faibles et il y a eu peu de distribution et d'administration de KI auprès de la population.

Un programme complet de surveillance sanitaire (*The Fukushima Health Management (FHM) survey*) a été mis en place rapidement après l'accident. Il inclut des bilans de santé, le suivi des grossesses et des naissances, des comptages de radioactivités du corps entier et des examens échographiques de la thyroïde [14].

La plupart des mesures ont montré des niveaux très faibles d'irradiation externe [3] et de contamination interne (99,9 % des comptages corps entier étaient en dessous du seuil de détection). Il est donc attendu que l'accident de Fukushima n'aura pas de conséquences décelables directes en termes de pathologies radio-induites, tels que cancers et leucémies.

Les mesures directes de la contamination de la thyroïde ont aussi été rassurantes en termes d'impact sanitaire potentiel, avec des doses à la thyroïde de 1–2 mSv et aucune dose supérieure à 60 mSv. Durant les 10 années qui ont suivi l'accident, il n'y a pas eu d'augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde détectés par l'examen clinique chez les enfants et les adolescents qui vivaient dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident.

Les 324 301 sujets âgés de 18 ans ou moins qui vivaient dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident ont été inclus dans un programme de dépistage par échographie de la thyroïde avec ponction à l'aiguille fine des anomalies suspectes pour cytologie. Ce dépistage a été répété tous les deux ans jusqu'à l'âge de 21 ans puis tous les cinq ans. Un cancer de la thyroïde a été diagnostiqué chez 116 sujets lors du premier contrôle (2011–2013), chez 71 sujets lors du deuxième contrôle (2014–2015), chez 31 sujets lors du troisième

contrôle (2016–2017) et chez 21 sujets lors du quatrième contrôle (2018–2019) [14]. Parmi les 196 tumeurs opérées, 193 [98 %] étaient des cancers papillaires et plus de la moitié mesuraient 2 cm ou plus. L'augmentation du nombre de cas de cancer de la thyroïde avec l'âge des sujets au moment de l'accident et au moment du dépistage est semblable à ce qui a été observé dans les cohortes d'enfants et d'adolescents atteints de cancers sporadiques de la thyroïde (non radio-induits). Au contraire, chez les enfants fortement contaminés après l'accident de Tchernobyl, les cancers de la thyroïde étaient plus fréquents chez les enfants les plus jeunes lors de l'accident (âgés alors de 0–4 ans), alors qu'aucun cancer de la thyroïde n'a été observé dans ce groupe d'âge dans les suites de l'accident de Fukushima [15]. De plus, l'augmentation de l'incidence observée chez les enfants fortement contaminés lors de l'accident de Tchernobyl a été précoce, étant significative dès 1990, alors que pendant les 10 ans qui ont suivi l'accident de Fukushima l'incidence n'a pas varié significativement [1–3]. Nous l'avons vu, la dose d'irradiation à la thyroïde a été faible et aucune relation n'a été mise en évidence entre la dose et la survenue d'un cancer de la thyroïde, soit en prenant en compte la dose individuelle soit la distribution géographique des doses internes et externes par municipalité [3]. Enfin, les mutations présentes dans ces cancers de la thyroïde opérés sont le plus souvent des mutations ponctuelles (mutations BRAF et RAS présentes dans 69 % des cancers), les réarrangements étant peu fréquents (réarrangements RET et TRK présents dans 14 % des cancers), alors que dans les cancers survenus dans les suites de l'accident de Tchernobyl chez les enfants fortement contaminés les mutations ponctuelles étaient peu fréquentes (présentes dans 15 % des cancers) et les réarrangements étaient fréquents (présents dans 85 % des cancers) [16,17].

En conclusion, ces données montrent que l'examen échographique de la thyroïde peut mettre en évidence des cancers chez des sujets jeunes et asymptomatiques avec une incidence lors du premier contrôle qui était 30 fois supérieure à celle des cancers cliniques à cet âge. L'incidence augmente avec l'âge des sujets et n'est pas liée à une éventuelle irradiation de la thyroïde. L'existence de ce réservoir important de cancers de la thyroïde asymptomatiques chez les sujets jeunes est en accord avec l'augmentation de son incidence dans les études de registres qui est proportionnelle et simultanée à celle observée chez l'adulte, ce qui suggère un effet majeur du dépistage [12,13].

Il y avait après l'accident une forte attente de la population de pouvoir bénéficier d'une surveillance sanitaire, mais il est apparu que ce dépistage par échographie de la thyroïde à grande échelle a été une cause de détresse psychologique et d'anxiété considérable dans la population [14].

## PROPHYLAXIE EN FRANCE

Tout d'abord, il faut rappeler que de nombreuses études n'ont pas montré d'augmentation du risque de cancer ou de leucémie chez les personnes habitant à proximité d'une centrale nucléaire dans des conditions de fonctionnement normal. Toutefois, de petits agrégats de leucémies aiguës lymphoblastiques appelés clusters ont été rapportés chez les enfants vivant à proximité d'une centrale nucléaire par trois des 198 études effectuées dans 10 pays. Ils ne sont pas liés

à la dose d'irradiation reçue par ces populations et ont aussi été observés autour de sites industriels non-nucléaires [18]. Les conséquences de l'accident de Tchernobyl ont montré que la prophylaxie de l'irradiation de la thyroïde est impérative en cas de forte contamination atmosphérique par les isotopes radioactifs de l'iode. Les cancers de la thyroïde survenus chez les enfants qui avaient reçu de fortes doses d'irradiation constituent la principale conséquence sanitaire de la contamination radioactive observée dans ces populations. Rappelons qu'à l'inverse, aucun effet sur la thyroïde n'a été observé chez les enfants qui vivaient dans le district de Fukushima en 2011 au moment de l'accident, mais, les mesures de confinement, de restriction alimentaire et d'évacuation ont été mises en place rapidement après le début de l'accident, et par ailleurs leur alimentation était riche en iode. En conséquence, la dose à la thyroïde a été faible ou nulle, rendant inutile la prophylaxie par l'iode stable.

Cette prophylaxie est possible par une contre-mesure qui est à la fois simple et efficace : l'administration de grandes quantités d'iode stable qui va diluer l'iode radioactif présent dans l'organisme et qui va saturer le mécanisme de concentration de l'iode dans la thyroïde et par ces deux moyens va empêcher la concentration de l'iode radioactif dans la thyroïde et ainsi son irradiation. L'efficacité de l'iode de potassium dépend de la quantité d'iodure administrée et du moment de son administration par rapport à la contamination [11,19].

L'iode stable, administré sous la forme d'iodure de potassium (KI) inhibe la concentration de l'iode radioactif dans la thyroïde par plus de 98 % lorsque des quantités importantes d'iodure ont été administrées quelques heures avant la contamination, de 90 % s'il est administré en même temps que la contamination, et seulement de 50 % s'il est administré six heures après la contamination [19]. La concentration de l'iode radioactif par la thyroïde va alors rester inhibée pendant 48–72 heures, puis va réapparaître. Ceci est la raison pour laquelle l'iode stable ne doit pas être administré en l'absence de contamination mais uniquement lorsqu'elle est recommandée par les autorités sanitaires ; si la contamination persiste plusieurs jours, l'iode stable doit être ré-administré. À l'évidence, le KI ne protège que la glande thyroïde de l'irradiation par les isotopes radioactifs de l'iode. Il ne protège pas l'organisme contre les autres isotopes radioactifs libérés lors de l'accident d'un réacteur et son administration doit être associée au confinement, aux restrictions alimentaires et éventuellement à l'évacuation qui peut être décidée en fonction du niveau de la contamination.

La prophylaxie par l'iode stable nécessite donc pour une efficacité maximale que les comprimés de KI soient disponibles immédiatement en cas d'accident de centrale nucléaire. Depuis 1997, à la demande des pouvoirs publics, Electricité de France (EDF) est en charge en France de la prédistribution aux populations (qui comprennent les résidents mais aussi tous les services ouverts au public, écoles, commerces, affaires, industries et artisanats, administrations et services, etc.) dans un rayon de 10 km de chacun des 19 sites français de production nucléaire et depuis 2019 dans un rayon de 20 km (et à une population d'environ 2 200 000 individus). De plus, de nombreux stocks de comprimés de KI ont été mis en place dans les régions où existent des centrales nucléaires. L'efficacité de cette prédistribution et de toutes les mesures de radioprotection associées est régulièrement contrôlée par des exercices de crise [20,21]. En cas de contamination atmosphérique, les autorités publiques décident de la nécessité de la

prophylaxie par le KI et du moment de sa mise en œuvre. Pour l'*International Atomic Energy Association*, le niveau d'intervention pour l'administration de KI est atteint lorsque la glande thyroïde des enfants risque de recevoir une dose de 50 mSv [22]. Cette dose est calculée à partir de modèles qui prennent en compte la gravité de l'accident et les conditions météorologiques. Les réacteurs nucléaires occidentaux sont entourés d'une enceinte de confinement équipée de filtres à sable (qui n'existait pas sur le réacteur de Tchernobyl), et qui devrait permettre de disposer d'un délai de plusieurs heures entre le début d'un accident grave et le relâchement de radioactivité dans l'atmosphère. Ce délai doit être mis à profit par les autorités publiques pour organiser la prophylaxie par le KI.

En France, le KI est disponible en comprimés de 65 mg, qui contiennent 50 mg d'iodure, et sont délivrés en boîtes de 10 comprimés sous blister. Ils ont une stabilité d'au moins cinq ans. Les comprimés sont sécables en quatre et peuvent être dissous dans l'eau, le lait ou un jus de fruit ce qui permet d'atténuer son goût désagréable. Il faut éviter sa prise à jeun. Les doses individuelles recommandées sont :

- 100 mg d'iodure (130 mg de KI, deux comprimés) chez les adultes (y compris les femmes enceintes) ;
- 50 mg d'iodure (65 mg KI, un comprimé) chez les enfants âgés de moins de 13 ans ;
- 25 mg d'iodure (32,5 mg KI, un demi-comprimé) chez les enfants âgés de moins de 3 ans ;
- 12,5 mg d'iodure (16 mg KI, un quart de comprimé) chez les nouveau-nés.

Les enfants et adolescents de moins de 20 ans, les femmes enceintes et les femmes allaitantes doivent bénéficier en priorité de la prophylaxie par le KI, puis celle-ci peut être élargie aux personnes de moins de 45 ans. Celle-ci n'est pas recommandée chez les sujets âgés de plus de 60 ans et chez les adultes atteints de maladie cardiovasculaire ou thyroïdienne. Elle est probablement sans bénéfice au-delà de 40 ans, car les effets cancérogènes de l'iode radioactif sur la thyroïde ne sont pas démontrés à cet âge. Toutefois, une hypothyroïdie peut survenir après exposition à des doses élevées d'irradiation quel que soit l'âge et doit être prévenue par la prophylaxie iodée.

L'autorisation de mise sur le marché de l'iodure de potassium, a été étendue en janvier 2021 par l'ANSM [23], et autorise dorénavant une prise de 130 mg par jour qui peut varier d'une prise unique à une prise quotidienne répétée pendant sept jours maximum pour les adultes et les enfants de plus de 12 ans, sauf avis contraire des autorités compétentes. Des travaux sont en cours afin d'intégrer les enfants de moins de 12 ans et les femmes enceintes dans cette extension d'AMM. La prophylaxie par KI induit très peu d'effets secondaires. Le risque de thyrotoxicose induite par l'iode existe chez les sujets ayant un goitre nodulaire ou un nodule thyroïdien autonome. Les rares effets non spécifiques, nausées, vomissements, diarrhée, gastralgies et goût métallique dans la bouche sont transitoires. En Pologne ou 18 millions de doses d'iode stable ont été administrées à la suite de l'accident de Tchernobyl, trois cas de bronchospasmes spontanément résolutifs ont été signalés [11] ; le registre central de l'hypothyroïdie congénitale n'a pas révélé d'augmentation de l'incidence de cette anomalie après 1986. Une augmentation modérée et transitoire du taux de la TSH avec une diminution du taux de la thyroxine libre a été observée chez 12 des 3212 nouveau-nés traités par KI durant leur premier jour de vie. Ces anomalies se sont normalisées en 3 à 5 jours et par la suite la fonction thyroïdienne et le

développement de ces enfants ont été normaux et sans séquelle.

## CONCLUSION

La survenue d'un cancer de la thyroïde est la principale conséquence directe de la contamination par les isotopes radioactifs lors d'un accident grave de centrale nucléaire. Des mesures efficaces doivent être décidées lorsque la dose projetée à la thyroïde des enfants est de plus de 50mSv, et doit alors comprendre en plus du confinement et des restrictions alimentaires, la prise de KI. La prédistribution des comprimés de KI aux populations vivant dans un rayon de 20 km autour de chaque centrale nucléaire doit permettre sa prise rapide et ainsi garantir son efficacité.

## Financement

Ce travail n'a bénéficié d'aucun soutien financier.

## Déclaration de liens d'intérêts

MS déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

BLG déclare travailler pour EDF et a été en charge d'abord comme conseiller puis comme directeur radioprotection santé de plusieurs campagnes de distribution d'iode stable autour des CNPE EDF.

## RÉFÉRENCES

- [1] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II, Scientific Annex D. UNSCEAR Report 2008. New York: United Nations; 2011, [https://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076\\_Report\\_2008\\_Annex\\_D.pdf](https://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf).
- [2] UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume I, Scientific Annex A. UNSCEAR Report 2013. New York: United Nations; 2014, [https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013\\_1.html](https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html).
- [3] 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, A 2015 White Paper to Guide the Scientific Committee's Future Programme of Work. New York: United Nations; 2015, [https://www.unscear.org/docs/reports/2015/Fukushima\\_WP2015\\_web\\_en.pdf](https://www.unscear.org/docs/reports/2015/Fukushima_WP2015_web_en.pdf).
- [4] Ory C, Leboulleux S, Salvatore D, Le Guen B, De Vathaire F, Chevillard S, et al. Consequences of atmospheric contamination by radioiodine: the Chernobyl and Fukushima accidents. *Endocrine* 2021;71:298–309.
- [5] Le Guen B, Schlumberger M. Iodes radioactifs. *EMC - Pathol Prof Environ* 2016;12:1–12.
- [6] Howell RW, Wessels BW, Loevinger R, Watson EE, Bolch WE, Brill AB, et al. The MIRD perspective 1999. *Medical Internal Radiation Dose Committee. J Nucl Med* 1999;40(1):3S–10S.
- [7] Veiga LH, Holmberg E, Anderson H, Pottern L, Sadetzki S, Adams MJ, et al. Thyroid cancer after childhood exposure to external radiation: an updated pooled analysis of 12 studies. *Radiat Res* 2016;185:473–84.
- [8] Lubin JH, Adams MJ, Shore R, Holmberg E, Schneider AB, Hawkins MM, et al. Thyroid cancer following childhood low-dose radiation exposure: a pooled analysis of nine cohorts. *J Clin Endocrinol Metab* 2017;102:2575–83.
- [9] Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, Malakhova I, Shibata Y, Khrouch V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to 131I in childhood. *J Natl Cancer Inst* 2005;97:724–32.
- [10] Dickman PW, Holm LE, Lundell G, Boice Jr JD, Hall P. Thyroid cancer risk after thyroid examination with 131I: a population-based cohort study in Sweden. *Int J Cancer* 2003;106:580–7.
- [11] Nauman J, Wolff J. Iodide prophylaxis in Poland after the Chernobyl reactor accident: benefits and risks. *Am J Med* 1993;94:524–32.
- [12] Vaccarella S, Franceschi S, Bray F, Wild CP, Plummer M, Dal Maso L. Worldwide thyroid-cancer epidemic? The increasing impact of overdiagnosis. *N Engl J Med* 2016;375:614–7.
- [13] Vaccarella S, Lortet-Tieulent J, Colombet M, Davies L, Stiller CA, Schüz J, et al. Global patterns and trends in incidence and mortality of thyroid cancer in children and adolescents: a population-based study. *Lancet Diabetes Endocrinol* 2021;9:144–52.
- [14] Kamiya K. Health management and care following the Fukushima nuclear power plant accident: overview of Fukushima Health Management Survey. *Ann ICRP* 2021;50(Suppl. 1):82–9.
- [15] Pacini F, Vorontsova T, Demidchik EP, Molinaro E, Agate L, Romei C, et al. Post-Chernobyl thyroid carcinoma in Belarus children and adolescents: comparison with naturally occurring thyroid carcinoma in Italy and France. *J Clin Endocrinol Metab* 1997;82:3563–9.
- [16] Mitsutake N, Fukushima T, Matsuse M, Rogounovitch T, Saenko V, Uchino S, et al. BRAF(V600E) mutation is highly prevalent in thyroid carcinomas in the young population in Fukushima: a different oncogenic profile from Chernobyl. *Sci Rep* 2015;5:16976.
- [17] Morton LM, Karyadi DM, Stewart C, Bogdanova TI, Dawson ET, Steinberg MK, et al. Radiation-related genomic profile of papillary thyroid carcinoma after the Chernobyl accident. *Science* 2021;372. eabg2538.
- [18] Sermage-Faure C, Laurier D, Goujon-Bellec S, Chartier M, Guyot-Goubin A, Rudant J, et al. Childhood leukemia around French nuclear power plants—the Geocap study, 2002-2007. *Int J Cancer* 2012;131:E769–80.
- [19] Zanzonico PB, Becker DV. Effects of time of administration and dietary iodine levels on potassium iodide (KI) blockade of thyroid irradiation by 131I from radioactive fallout. *Health Phys* 2000;78:660–7.
- [20] Loi no 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. *JORF* 2006;136:8946. texte n° 2. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000819043/>.
- [21] Le Guen B, Stricker L, Schlumberger M. Distributing KI pills to minimize thyroid radiation exposure in case of a nuclear accident in France. *Nat Clin Pract Endocrinol Metab* 2007;3:611.
- [22] IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, No. GSG-7, 2018.
- [23] ANSM. Notice. Iodure de potassium Pharmacie centrale des Armées 65 mg, comprimé sécable. Iodure de potassium. Mise à jour le 06/01/2021. <http://agence-prd.ansm.sante.fr/php/ecodex/notice/N0366751.htm>.