

## Conséquences sanitaires 35 ans et 10 ans après les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima

ENORA CLÉRO<sup>1,2</sup>  
KLERVI LEURAUD<sup>1,2</sup>  
DOMINIQUE LAURIER<sup>2</sup>  
MASAHARU TSUBOKURA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire  
d'épidémiologie des  
rayonnements ionisants  
BP 17 - 92262 Fontenay-aux-  
Roses  
France  
<enora.clero@irsn.fr>  
<klervi.leuraud@irsn.fr>

<sup>2</sup> Service de recherche sur  
les effets biologiques et  
sanitaires des rayonnements  
ionisants  
Pôle santé et  
environnement  
Institut de radioprotection  
et de sûreté nucléaire  
BP 17 - 92262 Fontenay-aux-  
Roses  
France  
<dominique.laurier@  
irsn.fr>

<sup>3</sup> Service de médecine  
interne  
Hôpital Central de Hirata  
Kami-Yomogida  
Hirata-mura  
Ishikawa-gun  
Fukushima 963-8202  
Japon  
<tsubokura\_tky@me.com>

<sup>4</sup> Service de santé publique  
Ecole de médecine  
Université médicale de  
Fukushima  
Fukushima 960-1295  
Japon

Tirés à part :  
E. Cléro

**Résumé.** Suite aux deux accidents nucléaires majeurs de Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011, les populations touchées ont été exposées aux radionucléides libérés accidentellement dans l'environnement et pouvant affecter leur santé. De nombreuses études épidémiologiques ont montré des effets sanitaires des rayonnements ionisants dans des populations exposées dans différentes situations ( survivants japonais des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki, mineurs d'uranium, populations exposées au radon dans l'habitat, etc.). La santé des populations affectées par les retombées radioactives des accidents de Tchernobyl en Ukraine et de Fukushima au Japon a également fait l'objet d'études épidémiologiques. En termes de conséquences sanitaires, l'accident de Fukushima diffère de celui de Tchernobyl à bien des égards. Nous proposons ici une synthèse des connaissances sur les conséquences sanitaires de ces deux accidents nucléaires majeurs. Les effets sanitaires reconnus et les potentiels effets sanitaires associés aux retombées radioactives de ces accidents sont brièvement présentés.

**Mots clés :** Tchernobyl ; Fukushima ; radioactivité ; effet sanitaire ; cancer de la thyroïde.

### Abstract

#### **Health consequences 35 years and 10 years after the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents**

*After the two major nuclear accidents of Chernobyl in 1986 and Fukushima in 2011, the affected populations were exposed to radionuclides accidentally released into the environment that could affect their health. Numerous epidemiological studies have shown the health effects of ionizing radiation in populations exposed to different situations (Japanese atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki, uranium miners, populations exposed to indoor radon, etc.). The health of populations affected by radioactive fallout from the Chernobyl accident in Ukraine and the Fukushima accident in Japan has also been the subject of epidemiological studies. The health consequences of the Fukushima accident differ in many ways from those of the Chernobyl accident. We propose here a synthesis of the knowledge on the health consequences of these two major nuclear events. The recognized health effects and the potential health effects associated with radioactive fallout from these accidents are briefly presented.*

**Key words:** Chernobyl; Fukushima; radioactivity; health effect; thyroid cancer.

Article reçu le 21 septembre 2021,  
accepté le 30 septembre 2021

doi: 10.1684/ers.2021.1597

Pour citer cet article : Cléro E, Leuraud K, Laurier D, Tsubokura M. Conséquences sanitaires 35 ans et 10 ans après les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima. *Environ Risque Sante* 2021 ; 20 : 525-534. doi : 10.1684/ers.2021.1597

## Glossaire

Bq : Becquerel, unité de mesure de l'activité (nombre de désintégrations par seconde) d'une matière radioactive.

Gy : Gray, unité de mesure de la dose de radiation physiquement absorbée par un organe/tissu exposé aux rayonnements.

Sv : Sievert, unité de mesure des doses équivalente et efficace, permettant d'évaluer l'impact sanitaire et biologique d'un ou plusieurs types de rayonnement sur la matière vivante.

La population est exposée quotidiennement à des sources de rayonnements ionisants, d'origine naturelle ou artificielle. Les rayonnements telluriques et cosmiques, l'inhalation de radon, ainsi que l'incorporation d'éléments radioactifs naturels (via l'eau, l'alimentation ou encore le tabac), constituent les principales sources naturelles de rayonnements ionisants. Parmi les sources artificielles, on distingue les expositions liées à des examens médicaux (tels que le scanner ou la radiographie), les rejets des installations nucléaires, les retombées des essais nucléaires atmosphériques et les retombées des accidents nucléaires.

Selon le type de rayonnement (irradiation externe ; contamination interne ; nature physique de type alpha, bêta, gamma, X, proton, neutron) et la dose reçue, les rayonnements ionisants peuvent provoquer des effets différents sur l'organisme. Le système de radioprotection considère deux types d'effets : les réactions tissulaires et les effets stochastiques. Les réactions tissulaires se produisent de manière certaine lorsque les doses de rayonnements dépassent un certain seuil, allant de quelques centaines de milliGray (mGy) à plusieurs Gy selon le type d'effets, tels que des brûlures cutanées, des pertes de cheveux, des vomissements (syndrome aigu d'irradiation), ou encore la stérilité. Les effets stochastiques, principalement les cancers, se produisent de manière aléatoire parmi des personnes exposées et peuvent être observés même pour des faibles doses (effets sans seuil). Ces effets sur l'homme dépendent du niveau de dose et varient selon divers paramètres, tels

que le débit de dose, la zone du corps exposée (corps entier, organes spécifiques) ou encore le temps écoulé depuis l'exposition. Ils peuvent également varier selon les caractéristiques individuelles d'une personne (âge à l'exposition, sexe, origine géographique, carence en iode, etc.). Les effets cancérogènes des rayonnements ionisants ont été démontrés chez les survivants japonais des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki [1], ainsi que chez d'autres populations exposées à des sources de rayonnements environnementales [2], médicales [3] ou professionnelles [4]. Le temps de latence d'un cancer radio-induit peut aller de quelques années à plusieurs dizaines d'années, c'est-à-dire qu'un cancer dû à une exposition aux radiations peut se développer plus ou moins longtemps après l'exposition et ce temps de latence peut varier selon le type de cancer (leucémie, cancer de la thyroïde, du poumon, du sein, du côlon, etc.).

De nombreuses études épidémiologiques ont également été réalisées suite à l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986, s'intéressant aux conséquences sanitaires de l'accident. Certaines de ces études ont montré une augmentation du risque de certains cancers avec l'exposition aux retombées radioactives, alors que d'autres études n'ont pas observé d'association. En se basant sur l'expérience de Tchernobyl, plusieurs études épidémiologiques ont été mises en place suite à l'accident de Fukushima en 2011. Cet article propose de faire une synthèse des connaissances sur les conséquences sanitaires de ces deux accidents nucléaires majeurs, classés au niveau maximum de l'échelle internationale des événements nucléaires (INES).

## Conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl, 35 ans après

L'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine s'est produit le 26 avril 1986, lors d'un test de contrôle effectué sur l'un des réacteurs qui avait été mis à l'arrêt pour des opérations courantes de maintenance. L'explosion a entraîné un incendie pendant une dizaine de jours et de grandes quantités de matières radioactives ont été libérées dans l'atmosphère (tableau 1).

**Tableau 1.** Activités de radionucléides rejetés dans l'atmosphère [5].

*Table 1. Activity of the radionuclides released into the atmosphere [5].*

Radionucléides	Demi-vie	Tchernobyl (PBq)	Fukushima (PBq) [rejetés en mer]
Xénon 133, gaz rare	5,25 jours	6 500	7 300
Iode 131	8 jours	≈ 1 760	120 [11 à 18]
Césium 137	30 jours	≈ 85	10 [3,5 à 5,6]
Strontium 90	29 ans	≈ 10	< 0,01 [0,04 à 1]

Les retombées du nuage radioactif varient d'un endroit à l'autre, selon les conditions météorologiques (vents, précipitations, etc.), au sein de la région la plus touchée et dans le reste de l'Europe. Parmi les principaux radionucléides libérés, l'iode 131 et le césium 137 présentent un intérêt particulier pour la santé de la population.

## Populations touchées

Les 600 pompiers et employés de la centrale nucléaire intervenus le premier jour de l'accident sont les individus ayant reçu les doses les plus élevées. Parmi eux, 134 ont été atteints du syndrome aigu d'irradiation après avoir reçu de fortes doses comprises entre 0,8 et 16 Gy. Au total, deux employés sont décédés immédiatement de brûlures, 28 sont morts dans les premiers mois qui ont suivi l'accident et 19 sont décédés plus tardivement, entre 1987 et 2004, de diverses causes non nécessairement liées aux rayonnements ionisants.

Environ 530 000 « liquidateurs », nom donné en ex-URSS au personnel civil et militaire engagé dans les travaux visant à atténuer les conséquences de l'accident (immédiatement après la catastrophe ou dans la consolidation et l'assainissement du site à plus long terme), ont été recensés. La majorité d'entre eux ont reçu des doses de radiation comprises entre 0,02 et 0,5 Gy entre 1986 et 1990.

Les zones géographiques les plus impactées par les retombées de l'accident de Tchernobyl sont l'Ukraine, la Biélorussie et les quatre *oblasts* (entités administratives russes) de Bryansk, Kaluga, Oryol et Tula en Russie, entraînant ainsi la contamination de la population vivant sur ces territoires. Environ 115 000 personnes ont été évacuées en 1986, puis 220 000 ont été déplacées par la suite.

De nombreuses études épidémiologiques ont été réalisées chez les liquidateurs et dans les populations vivant dans ces zones les plus contaminées.

## Cancer de la thyroïde

Dans les premiers mois qui ont suivi l'accident, les doses reçues à la thyroïde ont été particulièrement élevées chez les enfants et adolescents ayant consommé du lait fortement contaminé à l'iode 131 et résidant en Ukraine, en Biélorussie ou dans les régions les plus contaminées de Russie. Par exemple, dans une cohorte de 12 000 enfants biélorusses âgés de 18 ans ou moins en 1986, la dose moyenne à la thyroïde était estimée à 580 mGy chez les 0-18 ans et à environ 1 000 mGy chez les 0-3 ans [6]. Chez les adultes, les doses reçues à la thyroïde étaient généralement moins élevées, en raison de la taille de leur glande thyroïdienne et de leur métabolisme (en moyenne 100 mGy à la thyroïde [5]). Dès le début des années 1990, des médecins pédiatres d'Ukraine et de Biélorussie ont constaté une augmentation importante du

nombre de cancers de la thyroïde, principalement de type papillaire, chez des enfants et adolescents. Par la suite, de nombreuses études ont montré que cette hausse était principalement due aux iodes radioactifs relâchés durant l'accident, l'incidence de ce cancer augmentant avec la dose reçue à la thyroïde [7].

Afin de mieux caractériser l'augmentation du risque de cancer de la thyroïde suite à l'exposition aux iodes radioactifs, un dépistage de la thyroïde comprenant une imagerie par ultrasons et un examen clinique a été mis en place pour environ 13 000 enfants en Ukraine et 12 000 en Biélorussie (âgés de 18 ans ou moins en 1986) chez qui des mesures directes de l'activité radiologique thyroïdienne avaient pu être réalisées dans les deux mois qui ont suivi l'accident [8, 9]. Ces dépistages ont été effectués plus de 10 ans après la catastrophe nucléaire, une fois que l'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde avait été bien établie chez les jeunes âgés de 18 ans ou moins au moment de l'accident. En Russie, un examen clinique annuel réalisé sur la population, complété par une échographie ou d'autres procédures d'imagerie si nécessaire, a été mis en place en 1991 parmi les 110 000 résidents des régions les plus contaminées âgés de moins de 18 ans au moment de l'accident [10].

L'ensemble de ces études a montré une augmentation significative du risque de cancer de la thyroïde chez les personnes exposées aux retombées radioactives dans l'enfance et l'adolescence, avec un risque multiplié par 2,5 à 6 pour une dose de 1 Gy à la thyroïde selon les études. Elles ont également permis d'estimer la part respective du dépistage thyroïdien et de l'exposition aux rayonnements ionisants dans l'augmentation du risque de cancer de la thyroïde. D'après le bilan sur le cancer de la thyroïde en Ukraine, en Biélorussie et dans les régions les plus contaminées de Russie, publié en 2018 par le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) [11], environ 20 000 cas de cancer thyroïdien (dont 80 % de femmes) ont été diagnostiqués sur la période 1991-2015 chez les jeunes âgés de moins de 18 ans au moment de l'accident, soit presque trois fois plus que sur la période 1991-2005. Sur la période la plus récente 2011-2015, environ 7 600 nouveaux cas ont été diagnostiqués. Cette augmentation au cours du temps de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les jeunes âgés de moins de 18 ans en 1986 est attribuable à plusieurs facteurs :

- à la hausse des taux de base de cancer avec l'âge (le risque de cancer augmentant spontanément avec l'âge) ;
- à l'amélioration des méthodes de détection médicale (surdiagnostic) ;
- à l'exposition aux rayonnements ionisants.

D'après l'UNSCEAR, environ 25 % de ces cancers thyroïdiens seraient attribuables à l'exposition aux rayonnements ionisants durant l'enfance ou l'adolescence (entre 7 % et 50 % avec les incertitudes) [11].

L'exposition à l'iode 131 consécutive à l'accident de Tchernobyl entraîne-t-elle une augmentation du risque de

cancer de la thyroïde chez les personnes exposées à l'âge adulte ? Cette question persiste en raison de résultats discordants et de possibles biais de surveillance. Des augmentations de l'incidence du cancer de la thyroïde ont été observées parmi les liquidateurs russes [12], baltes [13] et ukrainiens [14], en particulier parmi ceux ayant travaillé dans les premiers mois après l'accident (lorsque l'exposition à l'iode radioactif était la plus élevée), mais ces études ne prenaient pas en compte la dose individuelle de rayonnements. Une étude sur les liquidateurs biélorusses, russes et baltes [15], utilisant une reconstruction de doses individuelles, a trouvé une augmentation du risque de cancer de la thyroïde avec la dose : le risque était multiplié par cinq pour une dose de 1 Gy reçue à la thyroïde et, d'après les auteurs, cette augmentation ne pouvait s'expliquer uniquement par les campagnes de dépistage thyroïdien et l'attention accrue des professionnels de santé vis-à-vis de ce type de cancer chez les liquidateurs. Une autre étude sur les adultes résidant en territoire contaminé a également observé un excès de cancer thyroïdien dans les régions contaminées par rapport aux régions non contaminées [16]. Cependant, une étude récente sur les résidents russes exposés à l'âge adulte n'a pas montré de relation dose-réponse [17].

En France, les doses les plus élevées ont été reçues dans l'est du pays (moins de 1 milliSievert [mSv] en 1986), puis ont diminué de façon continue les années suivantes, sachant que la dose moyenne annuelle due à la radioactivité naturelle est de 2,4 mSv. Les doses reçues à la thyroïde chez les enfants âgés de 0 à 14 ans en France au moment de l'accident ont été estimées entre 1 et 13 mGy à la thyroïde en moyenne selon l'âge [18]. Un nombre très faible de cancers de la thyroïde, entre 7 et 55 cas en excès, théoriquement attribuables aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl a été estimé sur la période 1991-2015 parmi les 2,3 millions d'enfants de moins de 15 ans résidant dans l'est de la France en 1986. Cette estimation est du même ordre de grandeur que l'incertitude associée au nombre de cancers de la thyroïde attendus en l'absence d'exposition accidentelle à l'iode 131 au sein de cette population ( $889 \pm 60$  cas spontanés). Un tel excès de cas serait très difficilement détectable par une étude épidémiologique, en raison du faible niveau de doses dues aux retombées de l'accident en France, de l'ordre de 100 fois moins que celles reçues par les enfants en Biélorussie parmi lesquels une augmentation du nombre de cancers thyroïdiens a été décelée [19, 20].

### Hémopathies malignes

Des études s'appuyant sur une reconstruction détaillée de la dose individuelle reçue à la moelle osseuse (organe à risque de la leucémie) ont montré une augmentation du risque de leucémie avec la dose estimée

chez les liquidateurs des Pays Baltes, de Biélorussie, de Russie et d'Ukraine, y compris pour la leucémie lymphoïde chronique généralement considérée comme non radio-induite [21-23]. En Ukraine, une augmentation de l'incidence du myélome multiple et du syndrome myélodysplasique a également été observée chez les liquidateurs par rapport à la population générale, mais ces résultats sont à considérer avec prudence car la dose n'a pas été prise en compte dans l'analyse [24].

Une étude a également été réalisée chez les enfants âgés de moins de 5 ans au moment de l'accident résidant dans les zones les plus contaminées, suggérant une augmentation du risque de leucémie chez les enfants ayant reçu plus de 10 mGy à la moelle osseuse. Cependant, les résultats étaient contradictoires selon les régions étudiées et doivent donc être interprétés avec précaution [25].

### Autres effets sanitaires

De nombreuses autres maladies ont été étudiées suite à l'accident de Tchernobyl, telles que le cancer du sein [26], les cancers solides (c'est-à-dire tous les types de cancers hors hémopathies malignes) [27, 28], les maladies thyroïdiennes bénignes [29], les cataractes (chez les liquidateurs) [30], les maladies cardio- et cérébro-vasculaires [31-33], les malformations congénitales [34-36], les troubles neuropsychiatriques [37], etc. Néanmoins, une éventuelle association avec les retombées radioactives de l'accident n'est pas confirmée à ce jour. Quelques études ont observé un excès de cas, mais sans prendre en compte la dose individuelle. Certaines études suggèrent une association avec l'exposition aux radiations, alors que d'autres tendent à observer le contraire. En ce qui concerne les risques héréditaires, aucun effet transgénérationnel des rayonnements ionisants n'a été détecté sur l'ADN de la lignée germinale chez l'homme [38]. Il est donc nécessaire de consolider ces résultats et de poursuivre le suivi de ces études sur le long terme pour confirmer ou non les observations faites à ce jour.

Suite à l'accident de Tchernobyl, les populations touchées ont été confrontées à de nombreux changements et conséquences psychologiques et sociales : évacuation, relogement, modifications alimentaires, restriction d'activités, perte d'emploi, stigmatisation sociale, etc. Une augmentation de l'incidence du syndrome de stress post-traumatique et de l'anxiété a été observée chez les adultes résidant en territoire contaminé. La prévalence de la dépression et du syndrome de stress post-traumatique chez les liquidateurs était toujours élevée 20 ans après la catastrophe nucléaire. Ces effets psychosociaux sont principalement attribués aux changements de conditions de vie et aux conséquences socio-économiques (notamment avec la chute de l'URSS) et dans une moindre mesure à la peur des rayonnements [39].

## Conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima, 10 ans après

Le 11 mars 2011, le Japon a été frappé par une triple catastrophe : un séisme d'une magnitude de 8,9 sur la côte Pacifique, suivi d'un tsunami avec notamment une vague de 14 m de haut qui a déferlé sur la centrale de Fukushima Daiichi, entraînant un accident nucléaire. Une partie du site nucléaire a ainsi été submergée par le tsunami, engendrant une perte des alimentations électriques et des sources de refroidissement. Les événements se sont enchaînés avec l'explosion de trois réacteurs du 12 au 15 mars et l'incendie d'un autre réacteur le 15 mars (parmi les six réacteurs à eau bouillante de la centrale). Des rejets atmosphériques se sont ainsi dispersés dans l'environnement, dont une grande quantité au-dessus de l'océan Pacifique. Comparés à l'accident de Tchernobyl, les rejets atmosphériques en iode 131 sont environ 10 fois plus faibles (tableau 1).

### Populations touchées

Environ 21 000 travailleurs ont été employés dans des opérations d'urgence et de remédiation sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Entre mars 2011 et octobre 2012, la dose moyenne reçue était de l'ordre de 12 mSv, soit 10 fois moins que celle reçue par les liquidateurs de Tchernobyl. Sur cette même période, environ 35 % des travailleurs ont reçu une dose totale supérieure à 10 mSv et moins de 1 % une dose totale supérieure à 100 mSv (dose maximale estimée à 679 mSv) [5, 40]. Aucun syndrome aigu d'irradiation et aucun décès pouvant être attribué à une exposition aux rayonnements ionisants n'a été observé.

Une étude de cohorte sur les travailleurs, dénommée NEWS pour « *Nuclear Emergency Workers Study* », a été mise en place sous la coordination de la Fondation de recherche sur les effets des radiations au Japon (*Radiation Effects Research Foundation*) [41]. Des informations sur la santé des travailleurs ont été et sont encore recueillies par le biais de questionnaires et d'échantillons biologiques (sang, urine). L'enquête de base de cette étude a commencé en 2016, et le premier suivi longitudinal a commencé en 2020 : l'étude NEWS devrait donc fournir des premiers résultats sur le risque de maladies des travailleurs dans les prochaines années.

En s'appuyant dans un premier temps sur la distance à la centrale nucléaire, puis sur les estimations de dose à la population supérieures à 20 mSv, environ 210 000 personnes ont été évacuées progressivement dans un rayon de 2 à 80 km autour de la centrale entre le 11 mars et le 22 avril 2011 (zone d'évacuation jusqu'à 20 km, évacuation spontanée entre 20 et 30 km, zone

d'évacuation élargie pouvant aller jusqu'à 80 km selon les mesures de débit de dose ambiant).

Un vaste programme de surveillance sanitaire de la population, appelé « *Fukushima Health Management Survey* », a été mis en place dès juillet 2011 par l'université médicale de Fukushima à la demande du gouvernement de la préfecture de Fukushima [42]. Ce programme vise à assurer une surveillance des effets sanitaires sur le long terme, apporter des conseils et intervenir auprès de la population résidant dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident. Il inclut plusieurs enquêtes :

- une enquête de base ayant pour objectif d'estimer l'exposition aux rayonnements ionisants des 2 millions de résidents de la préfecture de Fukushima. Environ 475 000 résidents ont accepté de participer à cette enquête (dont environ 9 000 travailleurs) : au cours des quatre premiers mois suivant l'accident, 94 % d'entre eux ont reçu une dose efficace inférieure à 2 mSv. La dose maximale était estimée à 25 mSv parmi les résidents hors travailleurs ;
- des enquêtes spécifiques sur :
  - le bilan de santé des 210 000 personnes des zones évacuées ;
  - la santé mentale et le mode de vie des 210 000 évacués ;
  - la santé des femmes enceintes et les naissances ;
  - le dépistage du cancer de la thyroïde chez les enfants et adolescents.

### Cancer de la thyroïde

Sur la base du retour d'expérience de l'accident de Tchernobyl, et en l'absence de registre de cancer dans la préfecture de Fukushima, il a été décidé de mettre en place un dépistage systématique du cancer de la thyroïde par échographie pour les 360 000 jeunes âgés de 18 ans ou moins en 2011 et qui résidaient dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident. La première campagne de dépistage a eu lieu d'octobre 2011 à mars 2014. Depuis 2014, des bilans de suivi thyroïdien sont réalisés tous les deux ans chez les jeunes âgés de moins de 20 ans, puis tous les cinq ans au-delà de cet âge. Les doses de rayonnements à la thyroïde estimées chez les enfants et adolescents la première année après l'accident de Fukushima étaient plus faibles comparé à Tchernobyl, de l'ordre de quelques mGy, avec une dose à la thyroïde maximale d'environ 20 mGy, soit 10 à 250 fois moins que les doses reçues après l'accident de Tchernobyl [5].

Les résultats de ce dépistage systématique montrent un taux élevé de nodules tumoraux à la thyroïde (cancers) chez les enfants âgés de 18 ans ou moins au moment de l'accident [43]. Les fréquences de nodules tumoraux sont de l'ordre de :

- 39/100 000 dans la première campagne de dépistage (octobre 2011 à mars 2014 : prévalence de 116 cas parmi 300 472 enfants) ;

- 13/100 000 par an dans la deuxième campagne (avril 2014 à mars 2016 : incidence de 71 nouveaux cas en deux ans parmi 270 552 enfants) ;
- 7/100 000 par an dans la troisième campagne (avril 2016 à mars 2018 : incidence de 31 nouveaux cas en deux ans parmi 217 922 enfants) ;
- 9/100 000 par an dans la quatrième campagne (avril 2018 à mars 2020 : incidence de 33 nouveaux cas en deux ans parmi 183 239 enfants). Le nombre de cas de cette campagne n'est pas encore consolidé et est susceptible d'augmenter ;
- aucun cas n'a été diagnostiqué jusqu'à présent dans la cinquième campagne (avril 2020 à mars 2022 : 0 nouveau cas parmi 21 624 enfants à ce jour). Cette campagne est en cours, donc ces chiffres sont susceptibles d'évoluer.

La première campagne de dépistage fournit des données de prévalence qui ne s'interprètent pas de la même façon que les données d'incidence fournies par les campagnes suivantes. La prévalence correspond à la fréquence d'enfants présentant un ou plusieurs nodules tumoraux à la thyroïde détectés entre 2011 et 2014, incluant à la fois les nouveaux cas de nodules survenus sur cette période et les anciens cas de nodules déjà présents avant l'accident mais non diagnostiqués. L'incidence, quant à elle, correspond à la fréquence de nouveaux cas de nodules survenus uniquement depuis la précédente campagne de dépistage sur une période donnée, par exemple entre 2014 et 2016 pour la deuxième campagne. Les résultats des quatre dernières campagnes ne peuvent donc pas être comparés directement à ceux de la première campagne. Dans le cas de maladies à évolution lente, telles que le cancer de la thyroïde (en particulier de type papillaire, diagnostiqué en grande majorité après les accidents de Tchernobyl et de Fukushima), la prévalence est supérieure à l'incidence.

Par ailleurs, la plupart des cas identifiés par le dépistage systématique mis en place dans la préfecture de Fukushima sont des nodules tumoraux de petite taille, sans expression clinique (c'est-à-dire sans grosseur détectable au cou par palpation) et sans perturbation endocrinienne. Ces cas ne peuvent pas être comparés à ceux détectés par un registre de cancers qui enregistre essentiellement les cas cliniquement exprimés ou découverts fortuitement. La fréquence des nodules tumoraux détectés par une campagne de dépistage thyroïdien par échographie est donc naturellement très supérieure à celle des cancers identifiés par un registre.

On parle de « facteur de dépistage » lorsque l'augmentation de la prévalence ou de l'incidence est liée au caractère systématique d'une campagne de dépistage. La Corée du Sud, qui n'a pas été touchée par un accident nucléaire, illustre très bien ce facteur de dépistage : le taux observé de cancer de la thyroïde en Corée du Sud a été multiplié par 15 entre 1993 et 2011, suite à la mise en place d'un dépistage du cancer de la thyroïde par échographie chez l'adulte en 1999 [44]. Plusieurs études réalisées en Ukraine et en Russie après l'accident de

Tchernobyl ont également montré qu'un dépistage systématique par échographie pouvait entraîner une augmentation de l'incidence observée du cancer de la thyroïde [45]. Dernièrement, une étude a montré que les résultats observés dans le monde sur l'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les enfants et adolescents étaient comparables à ceux observés chez l'adulte, suggérant un rôle majeur du surdiagnostic [46].

Dix ans après l'accident, il est encore trop tôt pour se prononcer sur une éventuelle augmentation des cancers de la thyroïde attribuable aux retombées radioactives chez les enfants résidant dans la préfecture de Fukushima en 2011. Plusieurs éléments disponibles à ce jour indiquent que la fréquence élevée de nodules tumoraux de la thyroïde observée à Fukushima est liée à un effet du dépistage plutôt qu'à un effet des rayonnements :

- entre novembre 2012 et janvier 2013, un dépistage par échographie thyroïdienne a été réalisé chez des enfants âgés de 18 ans ou moins dans trois préfectures japonaises non contaminées par les retombées radioactives de l'accident de Fukushima (Aomori, Yamaguchi et Nagasaki), en utilisant le même protocole d'examen que celui de la préfecture de Fukushima afin de rendre la comparaison pertinente. La prévalence de nodules thyroïdiens détectés par échographie chez les enfants résidant dans ces trois préfectures était similaire à celle observée dans la première campagne de dépistage de la préfecture de Fukushima, quelle que soit la taille des nodules [47] ;
- les études publiées à ce jour ne montrent pas d'association entre la distribution des doses de rayonnement et la fréquence des cancers de la thyroïde observée dans la préfecture de Fukushima [48] ;
- la distribution d'âge des cas observés à Fukushima est proche de celle classiquement observée dans une population non exposée, alors que les cas observés après l'accident de Tchernobyl étaient beaucoup plus jeunes [49] ;
- la fréquence d'altérations génétiques observées à Fukushima est similaire à celle observée dans une population non exposée, mais est différente de celle observée après l'accident de Tchernobyl (prédominance de la mutation BRAF à Fukushima versus RET/PTC à Tchernobyl) [50].

### Autres effets sanitaires

L'enquête sur les femmes enceintes et les naissances, réalisée dans le cadre de la « *Fukushima Health Management Survey* », a montré que les taux d'accouchements prématurés, les taux d'enfants à faible poids de naissance et les taux d'anomalies congénitales étaient similaires à ceux observés au niveau national au Japon, de 2011 à 2018 [51].

Comparé à l'accident de Tchernobyl où les doses de radiation étaient beaucoup plus élevées, l'UNSCEAR considère que les futurs effets sanitaires dus aux

rayonnements, incluant le cancer de la thyroïde, seront difficilement discernables à Fukushima étant donné le faible niveau d'exposition aux radiations [5]. En effet, il est peu probable qu'une augmentation de l'incidence des cancers (cancers solides, leucémies) attribuable aux rayonnements ionisants soit perceptible, y compris chez les travailleurs (pour rappel, moins de 1 % des travailleurs a reçu une dose efficace supérieure à 100 mSv durant la première année suivant l'accident).

L'accident de Fukushima a néanmoins eu de nombreuses conséquences sur la santé de la population touchée, notamment dues à l'évacuation. D'après le bilan de santé des personnes évacuées réalisé dans la « *Fukushima Health Management Survey* », les fréquences d'hypertension, de surpoids et d'obésité, de diabète, et de dyslipidémie (taux élevé de lipides dans le sang) ont augmenté après 2011. L'augmentation significative de ces risques serait liée à l'évacuation ayant entraîné de nombreux changements dans le mode de vie, l'alimentation, les activités physiques, etc., des personnes déplacées [52]. Avec le temps, les problèmes liés à l'alcool ont diminué et les personnes évacuées ressentent de moins en moins le besoin d'un soutien dû à la dépression ou l'anxiété. Environ 15 % des évacués avaient besoin d'un soutien en 2011, contre seulement 6 % en 2018, mais ce dernier chiffre reste deux fois plus élevé que le niveau national japonais qui est de 3 % [51].

## Discussion-Conclusion

En résumé, l'augmentation de la fréquence des cancers de la thyroïde est le principal effet sanitaire démontré associé aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl. L'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les personnes exposées durant l'enfance ou l'adolescence au moment de l'accident a été forte et rapide (trois-quatre ans après l'accident) et persiste encore aujourd'hui chez ces enfants devenus adultes. Entre 1991 et 2015, environ 20 000 cas de cancer de la thyroïde ont été diagnostiqués chez les enfants et adolescents résidant dans les régions les plus contaminées d'Ukraine, de Biélorussie et de Russie au moment de l'accident, dont 25 % seraient attribuables à l'exposition aux retombées radioactives [11]. Plus récemment, à partir des années 2000, une association a également été observée entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le risque de leucémie chez les liquidateurs et les enfants. D'autres effets sanitaires ont été étudiés, tels que les cancers solides, les cataractes ou encore les maladies de l'appareil circulatoire, mais les résultats ne sont pas concluants et nécessitent d'être confirmés par de nouvelles études, notamment en continuant le suivi.

Bien qu'il existe des incertitudes sur le risque de cancers solides chez les liquidateurs, les résultats estimés en termes de mortalité sont compatibles avec ceux obtenus dans des études récentes sur les travailleurs de l'industrie nucléaire [53] et sont compatibles avec les extrapolations des études sur les survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki [54]. Concernant les malformations congénitales, une augmentation ponctuelle de trisomie 21 a été observée en Biélorussie en janvier 1987 (soit neuf mois après l'accident de Tchernobyl) [36], mais la relation de cause à effet n'a pas été étudiée, donc il existe toujours des incertitudes sur un lien éventuel entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le développement de malformations congénitales. Par ailleurs, au sujet de la santé mentale, de nombreux effets psychologiques ont été observés et sont attribués aux changements de l'environnement de vie et aux conséquences sociales et économiques de l'accident de Tchernobyl, sans lien direct avec l'exposition aux retombées radioactives (tableau 2).

Suite à l'accident de Fukushima, aucune réaction tissulaire n'a été observée chez les travailleurs intervenant sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, contrairement à l'accident de Tchernobyl. À ce jour, en l'absence d'association observée avec la distribution de dose de radiation, la fréquence élevée observée de nodules tumoraux thyroïdiens détectés chez les enfants et adolescents résidant dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident est considérée comme étant attribuable au dépistage systématique mis en place dans la préfecture. Étant donné le faible niveau d'exposition aux rayonnements ionisants, il est attendu que les potentiels effets sanitaires dus aux radiations soient très faibles et difficilement discernables par des études épidémiologiques au sein des populations touchées par l'accident de Fukushima, y compris chez les travailleurs. Malgré cela, un suivi épidémiologique est recommandé pour ces populations, notamment pour répondre à leurs interrogations et surveiller leur santé.

Les études épidémiologiques post-accidentelles mises en place après les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont été confrontées à plusieurs difficultés notamment dues à la complexité du contexte socio-économique en ex-URSS, au problème d'identification (en particulier pour les liquidateurs) et de suivi des populations (déplacements), à la qualité des estimations dosimétriques individuelles (données manquantes, imprécisions), ou encore à la capacité limitée de détecter un risque radio-induit (en raison du niveau de doses et de la taille des populations). Concernant le cancer de la thyroïde, l'effet du dépistage est une conséquence à ne pas négliger. D'après les leçons tirées des expériences des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, il n'est pas recommandé de mettre en place un dépistage systématique du cancer de la thyroïde par échographie après un

**Tableau 2.** Synthèse des principales conséquences sanitaires des accidents de Tchernobyl et Fukushima.

Table 2. Synthesis of the principal health consequences of the accidents at Chernobyl and Fukushima.

	Tchernobyl	Fukushima
<b>Effets attribuables aux rayonnements ionisants</b>	<p><u>Effets avérés à ce jour</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du risque de cancer de la thyroïde après exposition durant l'enfance (25 % attribuables aux retombées radioactives)</li> <li>• Augmentation du risque de leucémie chez les liquidateurs</li> </ul> <p><u>Effets suspectés</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du risque de cancer de la thyroïde chez les liquidateurs</li> <li>• Augmentation du risque de leucémie chez les enfants</li> <li>• Augmentation du risque de cancer du sein dans la population générale</li> <li>• Malformations congénitales</li> <li>• Troubles psychiatriques et cognitifs</li> </ul> <p><u>Effets non avérés</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effets héréditaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Futurs effets sanitaires attribuables aux rayonnements difficilement discernables, étant donné le faible niveau d'exposition aux radiations (plus les doses sont faibles, plus le risque est faible, et plus il est difficile de le mettre en évidence statistiquement)</li> <li>• Sur-diagnostic du cancer de la thyroïde dû au dépistage systématique chez les enfants (d'après les résultats disponibles à ce jour)</li> </ul>
<b>Conséquences sanitaires dues à l'accident et à l'évacuation</b>	Syndrome de stress post-traumatique, anxiété	Hypertension, diabète, surpoids et obésité, dyslipidémie, dépression, anxiété, problème avec l'alcool, etc.

accident nucléaire, notamment dû au risque de surdiagnostic ; un programme de surveillance thyroïdienne est toutefois recommandé pour les personnes à haut risque ou pour les personnes qui en feraient la demande [45, 55, 56]. Si la préfecture de Fukushima avait disposé d'un registre de cancers en 2011, elle aurait pu utiliser ce suivi sanitaire pour quantifier l'incidence des cancers avant et après l'accident, afin de repérer une éventuelle augmentation des cancers de la thyroïde ou d'autres cancers. En Biélorussie, il existe un registre national des malformations congénitales depuis 1979, de bonne qualité, qui a permis d'étudier la fréquence de ces pathologies avant et après l'accident de Tchernobyl. Le projet européen SHAMISEN recommande la mise en place de registres de maladies, telles que les cancers et les malformations congénitales, car ils permettent d'aider à estimer le risque sanitaire (surveillance générale de la santé, caractérisation de la fréquence des maladies, fourniture d'une référence permettant une comparaison avant/après accident) et de dialoguer avec la société civile en cas d'accident nucléaire [55].

Après l'accident de Fukushima, l'impact sanitaire de l'évacuation de la population locale a été le problème majeur au cours des premiers mois, en particulier parmi les personnes les plus vulnérables telles que les personnes âgées. Suite à ce changement de mode de vie à grande échelle, de nombreux problèmes sont apparus à moyen et

long termes : défaillances des infrastructures et des services médicaux, isolement social, perte de motivation dans la vie, conflits entre générations, perturbation du régime alimentaire, entraînant des troubles psychologiques (dépression, anxiété), l'aggravation de maladies chroniques comme le diabète, ainsi que des diagnostics et des prises en charge de maladies plus tardifs. L'apparition ou l'aggravation de ces problèmes sont aujourd'hui attribuées à un manque de soutien social et à des changements au niveau sociétal et communautaire, plutôt qu'à des facteurs individuels tels que la perception du risque lié à l'exposition aux radiations. La réorganisation des services de santé et la mise à disposition de ressources humaines et matérielles adéquates sont essentielles pour limiter les impacts négatifs sur la santé physique et mentale des populations touchées par un accident nucléaire. Une prise en compte équilibrée de ces différents risques sanitaires interconnectés et la mise en œuvre de contre-mesures à long terme sont donc nécessaires pour faire face aux conséquences sanitaires d'un accident nucléaire [57, 58]. ■

## Remerciements et autres mentions

**Financement** : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, université médicale de Fukushima ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

## Références

1. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, *et al.* Solid cancer incidence among the life span study of atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat Res* 2017 ; 187 (5) : 513-37.
2. Darby S, Hill D, Auvinen A, *et al.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 2005 ; 330 (7485) : 223.
3. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, *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.
4. Laurier D, Richardson DB, Cardis E, *et al.* The International Nuclear Workers Study (Inworks): a collaborative epidemiological study to improve knowledge about health effects of protracted low-dose exposure. *Radiat Prot Dosimetry* 2017 ; 173 (1-3) : 21-5.
5. UNSCEAR 2020 Report (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). *Sources and effects of ionizing radiation. Annex B, levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 report.* New York : United Nations, 2021.
6. Drozdovitch V, Minenko V, Khrouch V, *et al.* Thyroid dose estimates for a cohort of belarusian children exposed to radiation from the Chernobyl accident. *Radiat Res* 2013 ; 179 (5) : 597-609.
7. UNSCEAR 2008 Report (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). *Sources and effects of ionizing radiation. Volume II. Annex D, health effects due to radiation from the Chernobyl accident.* New York : United Nations, 2011.
8. Tronko M, Brenner AV, Bogdanova T, *et al.* Thyroid neoplasia risk is increased nearly 30 years after the Chernobyl accident. *Int J Cancer* 2017 ; 141 : 1585-8.
9. Zablotska LB, Ron E, Rozhko AV, *et al.* Thyroid cancer risk in Belarus among children and adolescents exposed to radioiodine after the Chernobyl accident. *Br J Cancer* 2011 ; 104 : 181-7.
10. Ivanov VK, Kashcheev VV, Chekin SY, *et al.* Thyroid cancer: lessons of Chernobyl and projections for Fukushima. *Radiat Risk* 2016 ; 25 : 5-19.
11. UNSCEAR 2018 Report (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). *Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Tchernobyl accident.* New York : United Nations, 2018.
12. Ivanov VK, Chekin SY, Kashcheev VV, Maksioutov MA, Tumanov KA. Risk of thyroid cancer among Chernobyl emergency workers of Russia. *Radiat Environ Biophys* 2008 ; 47 : 463-7.
13. Rahu K, Hakulinen T, Smalyte G, *et al.* Site-specific cancer risk in the Baltic cohort of Chernobyl cleanup workers, 1986-2007. *Eur J Cancer* 2013 ; 49 : 2926-33.
14. Ostroumova E, Gudzenko N, Brenner A, *et al.* Thyroid cancer incidence in Chernobyl liquidators in Ukraine: SIR analysis, 1986-2010. *Eur J Epidemiol* 2014 ; 29 : 337-42.
15. Kesminiene A, Evrard AS, Ivanov VK, *et al.* Risk of thyroid cancer among Chernobyl liquidators. *Radiat Res* 2012 ; 178 : 425-36.
16. Fuzik M, Prysazhnyuk A, Shibata Y, *et al.* Thyroid cancer incidence in Ukraine: trends with reference to the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 2011 ; 50 (1) : 47-55.
17. Ivanov VK, Kashcheev VV, Chekin SY, *et al.* Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period). *Radiat Prot Dosim* 2012 ; 151 : 489-99.
18. Catelinois O, Laurier D, Verger P, *et al.* Uncertainty and sensitivity analysis in assessment of the thyroid cancer risk related to Chernobyl fallout on Eastern France. *Risk Analysis* 2005 ; 25 (2) : 243-52.
19. Cardis E, Krewski D, Boniol M, *et al.* Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident. *Int J Cancer* 2006 ; 119 (6) : 1224-35.
20. Rogel A, Bernier MO, Motreff Y, Cléro E, Pirard P, Laurier D. Épidémiologie du cancer de la thyroïde 30 ans après l'accident de Tchernobyl : fréquence, facteurs de risque et impact des pratiques diagnostiques. *Bull Epidemiol Hebdo* 2016 ; 11-12 : 200-5.
21. Kesminiene A, Evrard AS, Ivanov VK, *et al.* Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators. *Radiat Res* 2008 ; 170 : 721-35.
22. Romanenko AY, Finch SC, Hatch M, *et al.* The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res* 2008 ; 170 : 711-20.
23. Zablotska LB, Bazyka D, Lubin JH, *et al.* Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers. *Environ Health Perspect* 2013 ; 121 : 59-65.
24. Bazyka DA, Gudzenko NA, Dyagil IS, *et al.* Multiple myeloma among Chernobyl accident clean-up workers - state and perspectives of analytical study. *Probl Radiat Med Radiobiol* 2013 ; 18 : 169-72.
25. Noshchenko GA, Bondar OY, Drozdova VD. Radiation-induced leukemia among children aged 0-5 years at the time of the Chernobyl accident. *Int J Cancer* 2010 ; 127 (2) : 412-26.
26. Zupunski L, Yaumenenka A, Ryzhov A, *et al.* Breast cancer incidence in the regions of Belarus and Ukraine most contaminated by the Chernobyl accident: 1978 to 2016. *Int J Cancer* 2021 ; 148 (8) : 1839-49.
27. Prysazhnyuk AY, Bazyka DA, Romanenko AY, *et al.* Quarter of century since the Chernobyl accident: cancer risks in affected groups of population. *Probl Radiat Med Radiobiol* 2014 ; 19 : 147-69.
28. Kashcheev VV, Chekin SY, Maksioutov MA, *et al.* Incidence and mortality of solid cancer among emergency workers of the Chernobyl accident: assessment of radiation risks for the follow-up period of 1992-2009. *Radiat Environ Biophys* 2015 ; 54 : 13-23.
29. Ostroumova E, Brenner A, Oliynyk V, *et al.* Subclinical hypothyroidism after radioiodine exposure: Ukrainian-American Cohort Study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident (1998-2000). *Environ Health Perspect* 2009 ; 117 (5) : 745-50.
30. Worgul BV, Kundiyev YI, Sergiyenko NM, *et al.* Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. *Radiat Res* 2007 ; 167 : 233-43.

31. Ivanov VK, Maksoutov MA, Chekin SY, et al. The risk of radiation-induced cerebrovascular disease in Chernobyl emergency workers. *Health Phys* 2006 ; 90 : 199-207.
32. Krasnikova LI, Buzunov VO. Role of radiation and non-radiation factors on the development of coronary heart disease in the Chernobyl clean-up workers: epidemiological study results. *Probl Radiac Med Radiobiol* 2014 ; 19 : 67-79.
33. Kashcheev VV, Chekin SY, Maksoutov MA, et al. Radiation-epidemiological study of cerebrovascular diseases in the cohort of Russian recovery operation workers of the Chernobyl accident. *Health Phys* 2016 ; 111 : 192-7.
34. Lazjuk G, Verger P, Gagnière B, Kravchuk Z, Zatsepin I, Robert-Gnansia E. The congenital anomalies registry in Belarus: a tool for assessing the public health impact of the Chernobyl accident. *Reprod Toxicol* 2003 ; 17 (6) : 659-66.
35. Wartecki W, Koerblein A, Ievtushok B, et al. Elevated congenital anomaly rates and incorporated cesium-137 in the Polissia region of Ukraine. *Birt Defects Res A Clin Mol Teratol* 2016 ; 106 (3) : 194-200.
36. Zatssepin I, Verger P, Robert-Gnansia E, et al. Down syndrome time-clustering in January 1987 in Belarus: link with the Chernobyl accident? *Reprod Toxicol* 2007 ; 24 (3-4) : 289-95.
37. Loganovsky K, Marazziti D. Mental health and neuropsychiatric aftermath 35 years after the Chernobyl catastrophe: current state and future perspectives. *Clin Neuropsychiatry* 2021 ; 18 (2) : 101-6.
38. Yeager M, Machiela MJ, Kothiyal P, et al. Lack of transgenerational effects of ionizing radiation exposure from the Chernobyl accident. *Science* 2021 ; 372 (6543) : 725-9.
39. Bromet EJ. Mental health consequences of the Chernobyl disaster. *J Radiol Prot* 2012 ; 32 (1) : N71-5.
40. UNSCEAR 2013 Report (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). *Sources and effects of ionizing radiation. Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annex A – Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami*. New York : United Nations, 2014.
41. Kitamura H, Okubo T, Kodama K, Nuclear Emergency Workers Study Group. Epidemiological study of health effects in Fukushima nuclear emergency workers – Study design and progress report. *Radiat Prot Dosimetry* 2018 ; 182 (1) : 40-8.
42. Yasumura S, Hosoya M, Yamashita S, et al. Study protocol for the Fukushima health management survey. *J Epidemiol* 2012 ; 22 (5) : 375-83.
43. Fukushima Health Management Survey. *Report of thyroid ultrasound examinations. 42<sup>th</sup> prefectural oversight committee meeting for Fukushima health management survey* (Held on 2021, July 26). Fukushima Medical University, Fukushima Prefecture, 2021. Available in Japanese: <https://www.pref.fukushima.lg.jp>
44. Ahn HS, Kim HJ, Welch HG. Korea's thyroid-cancer "epidemic" – Screening and overdiagnosis. *N Engl J Med* 2014 ; 371 : 1765-7.
45. Cléro E, Ostroumova E, Demoury C, et al. Lessons learned from Chernobyl and Fukushima on thyroid cancer screening and recommendations in case of a future nuclear accident. *Environ Int* 2021 ; 146 : 106230.
46. Vaccarella S, Lortet-Tieulent J, Colombet M, 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.
47. Hayashida N, Imaizumi M, Shimura H, et al. Thyroid ultrasound findings in a follow-up survey of children from three Japanese prefectures: Aomori, Yamanashi and Nagasaki. *Sci Rep* 2015 ; 5 : 9046.
48. Ohira T, Shimura H, Hayashi F, et al. Absorbed radiation doses in the thyroid as estimated by UNSCEAR and subsequent risk of childhood thyroid cancer following the Great East Japan earthquake. *J Radiat Res* 2020 ; 61 : 243-8.
49. Tronko MD, Saenko VA, Shpak VM, et al. Age distribution of childhood thyroid cancer patients in Ukraine after Chernobyl and in Fukushima after the TEPCO-Fukushima Daiichi NPP accident. *Thyroid* 2014 ; 24 (10) : 1547-8.
50. Mitsutake N, Fukushima T, Matsuse M, et al. BRAF<sup>V600E</sup> mutation is highly prevalent in thyroid carcinomas in the young population in Fukushima: a different oncogenic profile from Chernobyl. *Sci Rep* 2015 ; 5 : 16976.
51. Fukushima Medical University. *Report of the Fukushima Health Management Survey. FY2019*. Fukushima Medical University, 2020.
52. Ohira T, Nakano H, Nagai M, et al. Changes in cardiovascular risk factors after the Great East Japan earthquake: a review of the comprehensive health check in the Fukushima health management survey. *Asia Pacific J Public Health* 2017 ; 29 (2S) : 47S-55S.
53. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* 2015 ; 351 : h5359.
54. Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950-2003: An overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res* 2012 ; 177 (3) : 229-43.
55. Oughton D, Albani V, Barquinero JF, et al. *Recommendations and procedures for preparedness and health surveillance of populations affected by a radiation accident*. 2017. <https://www.isglobal.org/en/-/shamisen>
56. Togawa K, Ahn Sh, Auvinen A, et al. Long-term strategies for thyroid health monitoring after nuclear accidents: recommendations from an Expert Group convened by IARC. *Lancet Oncol* 2018 ; 19 (10) : 1280-3.
57. Tsubokura M. Secondary health issues associated with the Fukushima Daiichi nuclear accident, based on the experiences of Soma and Minamisoma cities. *J Natl Inst Public Health* 2018 ; 67 (1) : 71-83.
58. Tsubokura M. *Overviews of secondary health issues after the Fukushima incident*. ICRP International Conference on recovery after nuclear accidents – Radiological protection lessons from Fukushima and beyond. 2020.