

NOTE D'INFORMATION

DATE : 01/03/2021

État des connaissances sur les conséquences sanitaires d'un accident nucléaire

De nombreux programmes de recherche et études épidémiologiques ont été et sont menés sur les conséquences sanitaires pour les intervenants et les populations affectées à la suite des accidents de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986 et de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011.

Cette note d'information en propose une synthèse. Elle traite principalement des risques de cancer de la thyroïde chez les personnes exposées aux rayonnements ionisants pendant l'enfance et l'adolescence, mais aussi des autres types de cancers et effets non cancéreux de l'exposition aux rayonnements ionisants, notamment chez les travailleurs intervenus lors de ces deux accidents.

1. LES CANCERS DE LA THYROÏDE APRÈS UN ACCIDENT NUCLÉAIRE

Les accidents de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima Daiichi en 2011 sont les deux seuls accidents nucléaires classés au niveau maximum de l'échelle internationale des événements nucléaires (INES), bien que les niveaux de contamination soient bien plus faibles autour de la centrale de Fukushima Daiichi qu'autour de celle de Tchernobyl.

À ce jour, le cancer de la thyroïde chez les personnes exposées pendant l'enfance et l'adolescence est le principal effet sanitaire démontré associé aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl, dû à l'iode 131.

Après l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi, en se basant sur l'expérience acquise de l'accident de la centrale de Tchernobyl, un dépistage systématique du cancer de la thyroïde a été mis en place dans la préfecture de Fukushima chez les jeunes âgés de moins de 18 ans au moment de l'accident. À ce stade, environ 10 ans après l'accident, il est encore prématuré de se prononcer sur une éventuelle augmentation des cancers de la thyroïde due à l'accident de Fukushima Daiichi.

1.1. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LE CANCER DE LA THYROÏDE

La thyroïde est une glande située au niveau du cou dont la fonction principale est de fabriquer des hormones à partir de l'iode présent naturellement dans l'alimentation (poissons, fruits de mer, laitages...). Ces hormones thyroïdiennes sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme et, en cas d'ablation de la thyroïde, un traitement hormonal substitutif est prescrit à vie.

Le développement de nodules au niveau de la thyroïde est très fréquent, sous forme liquide (kystes) ou solide. Ces nodules thyroïdiens sont généralement bénins, avec seulement 10 à 15 % des nodules qui sont de nature cancéreuse. Le cancer de la thyroïde survient environ trois fois plus chez la femme que chez l'homme, et l'incidence de ce cancer varie d'un pays à l'autre : par exemple, en 2012, les taux de cancers thyroïdiens pour 100 000 femmes étaient de 89 en Corée du Sud, 20 aux États-Unis, 15 en Italie, 13 en France, 8 en Finlande et 6,5 au Japon. Il est très rare avant l'âge de 15 ans et représente moins de 1 % de l'ensemble des cancers de l'enfant.

Il existe **plusieurs types de cancer de la thyroïde** :

- les cancers différenciés (papillaires ou folliculaires) : les cancers papillaires sont les plus fréquents, représentant environ 80 % des cancers de la thyroïde. Ils sont principalement diagnostiqués entre 30 et 50 ans et sont de bon pronostic. Les cancers folliculaires représentent environ 10 % des cancers de la thyroïde. Ils sont généralement peu agressifs et de progression lente ;
- les cancers indifférenciés (anaplasiques) : ils surviennent principalement chez les personnes âgées (environ 1 % des cancers thyroïdiens), le pronostic est très sombre, avec une espérance de vie de l'ordre de quelques mois ;
- les cancers médullaires (familiaux) : le pronostic des cancers médullaires est plus réservé avec une survie de 65 % 10 ans après le diagnostic.

En général, le processus de diagnostic d'un cancer de la thyroïde débute parce qu'un patient présente des symptômes évocateurs de cette maladie ou parce que des nodules sont détectés fortuitement lors d'un examen clinique de routine.

La réalisation d'un dépistage systématique par échographie dans une population qui ne présente pas de signes cliniques évocateurs d'un cancer de la thyroïde peut révéler des cancers thyroïdiens qui n'auraient pas progressé (généralement de très petite taille) et n'auraient jamais été diagnostiqués en l'absence de dépistage. En effet, le cancer de la thyroïde a la particularité de progresser généralement lentement et ne provoque des symptômes que lorsqu'il est à un stade avancé. Ces cancers diagnostiqués lors d'un dépistage correspondent à ce que les cancérologues appellent des cancers indolents ou quiescents. La détection précoce de ces nodules cancéreux n'améliore ni la santé ni la survie des patients, mais peut au contraire altérer leur qualité de vie à cause d'un traitement médical et/ou de complications chirurgicales. **Le dépistage du cancer de la thyroïde entraîne donc un sur-diagnostic des cancers thyroïdiens, c'est-à-dire une détection de cas pour lesquels une prise en charge n'apporte aucun bénéfice médical.**

La glande thyroïde est un organe particulièrement sensible aux rayonnements ionisants, en particulier après une exposition dans l'enfance. Chez des individus exposés aux rayonnements ionisants durant l'enfance, le risque de survenue d'un cancer thyroïdien varie selon le type d'exposition (irradiation externe ou interne), le type histologique de cancer thyroïdien (papillaire, folliculaire...), l'âge à l'exposition, le temps écoulé depuis l'exposition, la présence d'une carence en iode, etc. L'augmentation de ce risque peut être très élevée, pouvant aller jusqu'à un risque multiplié par 20 pour une dose à la thyroïde de 1 Gy d'après certaines études sur les irradiations externes.

1.2. RISQUE DE CANCER DE LA THYROÏDE DÛ AUX RETOMBÉES RADIOACTIVES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Dès le début des années 1990, des médecins pédiatres de Biélorussie et d'Ukraine ont constaté une augmentation importante du nombre de cancers de la thyroïde, principalement de type papillaire, chez des enfants et adolescents exposés aux retombées radioactives après l'accident de Tchernobyl. 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 de rayonnement à la thyroïde.

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 2 mois qui ont suivi l'accident de Tchernobyl. Ces dépistages ont été effectués plus de 10 ans après l'accident, 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.

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 selon les études. Elles ont également permis d'estimer la part respective du dépistage 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, 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), 19 233 cas de cancer thyroïdien ont été diagnostiqués sur la période 1991-2015 chez les personnes âgées de moins de 18 ans au moment de l'accident, soit presque 3 fois plus que sur la période 1991-2005. Sur la dernière période 2011-2015, 7 630 nouveaux cas ont été diagnostiqués au total, dont 80 % de femmes. Cette augmentation au cours du temps de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les moins de 18 ans au moment de l'accident est attribuable à la hausse des taux de base de cancer avec l'âge (le risque de cancer augmentant spontanément avec l'âge), à l'exposition aux rayonnements ionisants et à l'amélioration des méthodes de détection médicale. L'UNSCEAR a estimé qu'environ 25 % de ces cancers de la thyroïde étaient attribuables à l'exposition aux rayonnements ionisants (entre 7 % et 50 % étant donné les incertitudes).



Nombre total de cancers de la thyroïde diagnostiqués entre 1986 et 2015 chez les jeunes âgés de moins de 18 ans en 1986 en Ukraine, en Biélorussie et dans les régions les plus contaminées de Russie (Source : UNSCEAR 2018)

Le risque de cancer de la thyroïde attribuable aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl en France

En 2000, une étude de l'IRSN et de l'Institut national de Veille Sanitaire (aujourd'hui Santé publique France) a estimé le nombre théorique de cancers de la thyroïde sur la période 1991-2015 attribuables aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl parmi les 2,3 millions d'enfants de moins de 15 ans résidant dans l'Est de la France en 1986. L'estimation aboutissait à un nombre très faible de cancers de la thyroïde théoriquement attribuables aux retombées radioactives de l'accident : entre 7 et 55 cas en excès.

Cette estimation était du même ordre de grandeur que l'incertitude associée au nombre attendu de cancers de la thyroïde en l'absence d'exposition accidentelle à l'iode 131 au sein de cette population (889 ± 60 cas spontanés).

Ce constat s'explique par la faiblesse des doses dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl en France (de l'ordre de 100 fois moins que celles reçues par les enfants de Biélorussie parmi lesquels une augmentation du nombre de cancers thyroïdiens a été décelée). L'étude concluait qu'un tel excès de cas serait très difficilement détectable par une étude épidémiologique (Rogel et al. BEH 2016).

1.3. RISQUE DE CANCER DE LA THYROÏDE APRÈS L'ACCIDENT DE LA CENTRALE DE FUKUSHIMA DAIICHI

Peu de temps après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011, sur la base du retour d'expérience de l'accident de Tchernobyl, le gouvernement japonais a lancé un vaste programme de surveillance sanitaire nommé « Fukushima Health Management Survey ». Il inclut la mise en place d'un dépistage systématique du cancer de la thyroïde par échographie pour les 300 000 jeunes qui résidaient dans la préfecture de Fukushima au moment de l'accident.

Depuis 2014, des bilans thyroïdiens de suivi sont réalisés tous les 2 ans chez les jeunes âgés de moins de 20 ans, puis tous les 5 ans au-delà de cet âge. Comparativement à Tchernobyl, les doses de rayonnements à la thyroïde chez les jeunes à Fukushima ont été plus faibles, de l'ordre de quelques mGy, avec une dose à la thyroïde maximale d'environ 60 mGy chez les enfants, soit 10 à 100 fois moins que les doses reçues après l'accident de Tchernobyl.

Le dépistage systématique mis en place dans la préfecture de Fukushima montre un taux élevé de nodules tumoraux de la thyroïde chez les enfants âgés de 18 ans ou moins au moment de l'accident. Les fréquences de nodules tumoraux sont de l'ordre de :

- 39/100 000 dans la première campagne de dépistage (prévalence de 116 cas parmi 300 476 enfants) ;
- 13/100 000 par an dans la deuxième campagne (incidence de 71 nouveaux cas en 2 ans parmi 270 497 enfants) ;
- 7/100 000 par an dans la troisième campagne (incidence de 31 nouveaux cas en 2 ans parmi 217 921 enfants) ;
- 6/100 000 par an dans la quatrième campagne (incidence de 21 nouveaux cas en 2 ans parmi 180 664 enfants). Pour cette campagne, le nombre de cas est non encore consolidé et susceptible d'augmenter.

Interprétation des résultats du dépistage thyroïdien dans la préfecture de Fukushima

Il faut faire la distinction entre la prévalence et l'incidence de nodules ou cancers de la thyroïde. La prévalence correspond à la fréquence de personnes atteintes d'une maladie à un moment donné, incluant à la fois les nouveaux cas et les anciens cas. L'incidence correspond à la fréquence de nouveaux cas d'une maladie sur une période donnée.

Dans le cadre du dépistage systématique dans la préfecture de Fukushima, la première campagne de dépistage d'octobre 2011 à mars 2014 fournit des données de prévalence : de ce fait, certains nodules identifiés pouvaient être déjà présents chez les individus avant l'accident en mars 2011. Par contre, les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} campagnes de dépistage (ainsi que toutes celles qui suivront) fournissent des données d'incidence : seuls les nouveaux cas survenus depuis la campagne de dépistage précédente sont identifiés. Les résultats des trois dernières campagnes ne peuvent donc pas être comparés directement à ceux de la première campagne. Dans le cas de maladies évoluant lentement, ce qui est le cas du cancer de la thyroïde, la prévalence est supérieure à l'incidence.

La plupart des cas identifiés par le dépistage systématique dans la préfecture de Fukushima sont des nodules tumoraux de petite taille, sans expression clinique, c'est-à-dire sans grosseur au cou détectable par palpation, et sans perturbation endocrinienne. Ces cas ne peuvent 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 est donc naturellement très supérieure à celle des cancers fournie par un registre.

L'augmentation de la prévalence ou de l'incidence liée au caractère systématique d'un dépistage est appelé « facteur de dépistage ». Ainsi, la Corée du Sud a mis en place à partir de 1999 un dépistage du cancer de la thyroïde par échographie chez l'adulte : la comparaison des chiffres de 1993 à ceux de 2011 montre que le taux observé de cancer de la thyroïde a été multiplié par un facteur de 15 du fait de la mise en place de ce dépistage. D'autres travaux réalisés en Ukraine après l'accident de Tchernobyl ont montré qu'un dépistage systématique par échographie (mais se limitant à un diamètre de nodule de 10 mm, soit 2 fois plus large que celui de Fukushima) peut entraîner une augmentation de l'incidence observée du cancer de la thyroïde d'un facteur 7. Dans une étude russe, sur la période 1991-2013, il a été estimé que la mise en place du dépistage augmentait l'incidence du cancer thyroïdien d'un facteur 7 chez les personnes exposées dans l'enfance et de 1,5 chez celles exposées à l'âge adulte.

Afin de rendre la comparaison pertinente, les données issues du dépistage mis en place dans la préfecture de Fukushima doivent être comparées à celles obtenues dans une campagne de dépistage dans des zones non exposées, en utilisant le même protocole d'examen que dans la préfecture de Fukushima. Ainsi, au cours de la période 2011-2014, des campagnes de dépistage systématique du cancer de la thyroïde similaires à celle de Fukushima ont été mises en place chez des enfants âgés de 18 ans ou moins dans trois préfectures japonaises non touchées par l'accident (préfectures d'Aomori, Hiroshima et Yamanashi). Les données issues de ces campagnes montrent que la prévalence de nodules thyroïdiens de taille supérieure à 5 mm ou de kystes de plus de 20 mm détectés chez les jeunes par échographie dans ces préfectures était similaire à la prévalence observée dans la préfecture de Fukushima.

Les cancers de la thyroïde à Fukushima sont-ils dus aux retombées radioactives de l'accident ?

À ce stade, étant donné l'effet du dépistage et les différences entre prévalence et incidence, il est encore prématuré de se prononcer sur une éventuelle augmentation des cancers de la thyroïde consécutive à l'accident chez les enfants présents en 2011 dans la préfecture de Fukushima lors de l'accident nucléaire.

Les études publiées à ce jour ne montrent pas d'association entre la distribution des doses et la fréquence des cancers de la thyroïde dans la préfecture de Fukushima (Ohira et al. 2020). L'UNSCEAR considère que les futurs

effets sanitaires radio-induits (incluant une éventuelle augmentation de la fréquence des cancers de la thyroïde) seront difficilement discernables à Fukushima, étant donné le faible niveau d'exposition aux rayonnements ionisants (UNSCEAR 2021).

À ce jour, plusieurs éléments indiquent que la fréquence élevée de nodules tumoraux thyroïdiens observés dans la préfecture de Fukushima est liée à l'**effet du dépistage** plutôt qu'à un effet des rayonnements (Bogdanova et al. Thyroid 2020) :

- la distribution de l'âge des cas observés 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) ;
- une étude parue dans la revue « Scientific Reports » en 2015 a analysé le profil oncogénique de 68 cas de cancer de la thyroïde identifiés et opérés dans le cadre du dépistage systématique de la préfecture de Fukushima : la fréquence des altérations génétiques observées est similaire à celle observée dans une population non exposée (et très différente de celle observée après l'accident de Tchernobyl) ;
- la prévalence de nodules thyroïdiens observée dans la préfecture de Fukushima dans la première campagne de dépistage apparaît très proche de celle observée dans les préfectures d'Aomori, Hiroshima et Yamanashi non exposées aux rejets radioactifs de l'accident, dans lesquelles des campagnes de dépistage similaires ont été mises en place ;
- plusieurs études de modélisation réalisées en se basant sur des données ukrainiennes, coréennes ou japonaises concluent que l'effet du dépistage est compatible avec la prévalence élevée de nodules thyroïdiens enregistrée dans la préfecture de Fukushima ;
- les niveaux de doses estimés pour les enfants présents en 2011 dans la préfecture de Fukushima sont très faibles pour la plupart d'entre eux. Très peu d'enfants ont pu recevoir des doses à la thyroïde dépassant quelques dizaines de mGy du fait de l'inhalation d'iode radioactif. Actuellement, les doses dues à une contamination interne des enfants n'ont pas été reconstituées individuellement (seulement une répartition géographique des doses absorbées à la thyroïde par commune, estimée par l'UNSCEAR). Mais parmi les cas diagnostiqués pour lesquels la dose externe a été reconstituée, la dose estimée la plus élevée était de l'ordre de 2 mSv. Ces doses sont trop faibles, dans l'état des connaissances actuelles, pour expliquer une augmentation détectable de la fréquence des nodules thyroïdiens.

En 2011, la prise en charge clinique d'un nodule tumoral de la thyroïde dans la préfecture de Fukushima consistait quasi systématiquement en l'ablation chirurgicale complète ou partielle de la thyroïde. Cependant, ces dernières années, considérant que la plupart des nodules (même tumoraux) sont indolents et peuvent rester sans évolution durant de nombreuses années, les recommandations cliniques ont évolué vers une surveillance échographique des nodules ne présentant pas de critère de gravité. Aujourd'hui, la position des médecins de l'Université de Médecine de Fukushima est d'aller vers un mode de dépistage et une prise en charge thérapeutique moins systématique. En particulier, ils conseillent de limiter la réalisation d'opérations chirurgicales lors du diagnostic, et de proposer de façon plus large un suivi individuel permettant de surveiller l'évolution des nodules détectés.

Recommandations sur le dépistage de la thyroïde après un accident nucléaire

Dans le cadre d'un projet européen sur l'amélioration de la surveillance sanitaire et médicale après un accident nucléaire auquel l'IRSN a participé, le Consortium SHAMISEN (Nuclear Emergency Situations - Improvement of Medical And Health Surveillance : <https://www.isglobal.org/en/-/shamisen>) recommande d'envisager un dépistage sanitaire systématique après un accident nucléaire uniquement s'il est dûment justifié, c'est-à-dire en s'assurant que le dépistage fera plus de bien que de mal. En se basant sur l'expérience du dépistage dans la préfecture de Fukushima, le Consortium ne recommande pas le dépistage systématique du cancer de la thyroïde car les effets psychologiques et physiques négatifs l'emporteront probablement sur les bienfaits éventuels dans les populations touchées. Cependant, le Consortium recommande qu'une

surveillance sanitaire de la thyroïde soit mise à la disposition des personnes qui en font la demande, qu'elles présentent un risque de cancer accru ou non, accompagnée d'informations et d'un soutien appropriés (Cléro et al. Environ Int 2021).

Par la suite, un travail spécifique sur l'intérêt du dépistage systématique du cancer de la thyroïde a été réalisé en 2018 par un groupe d'experts du Centre International de Recherche sur le Cancer (IARC, Thyroid monitoring after nuclear accident (TM-NUC) <http://tmnuc.iarc.fr/en/>), dont l'IRSN faisait partie. En cohérence avec les conclusions du Consortium SHAMISEN, ce groupe d'experts ne recommande pas de dépistage systématique du cancer thyroïdien par examen ultrasonographique après un accident nucléaire, notamment du fait du risque de sur-diagnostic. Il recommande de privilégier une mise à disposition des moyens de dépistage pour des groupes d'individus à haut risque, associée à une information détaillée des risques liés au sur-diagnostic auprès des patients et des familles (Togawa et al. Lancet Oncol 2018).

L'expérience nipponne est riche d'enseignements. En 2011, la préfecture de Fukushima ne disposait pas d'un registre des cancers. Si cela avait été le cas, elle aurait pu utiliser ce suivi pour quantifier l'incidence des cancers avant et après l'accident, et ainsi repérer une éventuelle recrudescence des cancers de la thyroïde. La France s'est dotée d'un registre national du cancer chez les enfants à la fin des années 90, mais les registres disponibles chez les adultes ne couvrent pas l'ensemble du territoire. Le projet SHAMISEN recommande la mise en place de registres du cancer, qui aident à estimer le risque sanitaire et à dialoguer avec la société civile en cas d'accident nucléaire.

2. AUTRES CANCERS ET EFFETS NON CANCÉREUX APRÈS UN ACCIDENT NUCLÉAIRE

2.1. RISQUES DE CANCERS POUR LES INTERVENANTS APRÈS UN ACCIDENT NUCLÉAIRE

Accident de la centrale de Tchernobyl

Le 26 avril 1986, le réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl explose accidentellement lors de la réalisation d'un essai technique, provoquant un gigantesque incendie qui ne sera arrêté définitivement que treize jours plus tard.

Les 600 pompiers et personnels de la centrale qui interviennent le premier jour de l'accident reçoivent les doses de rayonnements ionisants les plus élevées : deux d'entre eux décèdent immédiatement de brûlures et 28 décèdent des suites de leur irradiation dans les quatre premiers mois qui suivent l'accident. Au total, un syndrome aigu d'irradiation (SAI) a été diagnostiqué chez 134 intervenants et pompiers. Parmi les survivants, une dégénérescence cutanée secondaire à des brûlures radiologiques et des cataractes sont les principales séquelles observées aujourd'hui.

Suite à l'accident, environ 530 000 personnes civiles et militaires, appelées « liquidateurs », ont participé à l'intervention d'urgence, au confinement et au nettoyage sur le site de Tchernobyl et dans les zones contaminées après l'accident. Environ 240 000 d'entre elles étaient présentes en 1986 et 1987, au moment où les doses étaient les plus élevées sur le site du réacteur et dans la zone environnante des 30 km. La dose efficace moyenne reçue par les liquidateurs entre 1986 et 1990, principalement due à une irradiation externe, est estimée à environ 120 mSv (UNSCEAR 2011), mais certains liquidateurs qui sont intervenus dans les premières semaines ont pu recevoir des doses supérieures à 1 Sv.

Des études s'appuyant sur une reconstruction individuelle détaillée de la dose reçue à la moelle osseuse ont montré une augmentation du risque de leucémie en fonction de 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 (Kesminiene et al. 2008, Romanenko et al. 2008, Zablotska et al. 2013). 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 (Bazyka et al. 2013).

Une question importante à la suite de l'accident de Tchernobyl était de savoir si l'exposition à l'iode 131 pouvait également entraîner un risque accru de cancer de la thyroïde chez les personnes exposées à l'âge adulte (Hatch et al. 2017). Des augmentations de l'incidence du cancer de la thyroïde ont été observées parmi les travailleurs russes (Ivanov et al. 2008) et baltes (Rahu et al. 2013), en particulier parmi ceux ayant travaillé dans les premiers mois après l'accident, lorsque l'exposition à l'iode radioactif pouvait se produire. Une étude sur les cohortes de liquidateurs biélorusses, russes et baltes (Kesminiene et al. 2012), utilisant une reconstruction de doses individuelles, a également trouvé une augmentation du risque de cancer de la thyroïde. Le risque était multiplié par 5 pour une dose de 1 Gy reçue à la thyroïde et 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 cette pathologie chez les liquidateurs.

Enfin, une augmentation de l'incidence des cancers solides liée à la dose chez les travailleurs russes figurant dans le registre national de Tchernobyl a été observée (Kashcheev et al. 2015). Bien que l'exhaustivité de l'identification des cas soit incertaine pour cette cohorte, cette observation est complétée par une augmentation similaire de la mortalité due aux cancers solides, un résultat pour lequel il n'y a pas de biais de surveillance possible. Le risque de cancers solides estimé est cohérent avec celui obtenu dans des études récentes sur les

travailleurs de l'industrie nucléaire (Richardson et al. 2015) et compatible avec les extrapolations des études sur les survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki (Ozasa et al. 2012).

Accident de la centrale de Fukushima Daiichi

En termes de conséquences sur la santé des travailleurs, l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi diffère de celui de Tchernobyl à bien des égards.

Environ 25 000 travailleurs ont été employés entre mars 2011 et octobre 2012 dans des opérations d'urgence et de remédiation sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. La dose efficace moyenne de ces travailleurs au cours des 19 premiers mois après l'accident était de l'ordre de 12 mSv, soit 10 fois moins que celle reçue par les liquidateurs de Tchernobyl. À Fukushima, 35 % des travailleurs ont reçu une dose totale de plus de 10 mSv sur cette période et 0,7 % une dose totale de plus de 100 mSv. La dose efficace maximale rapportée était de 679 mSv (UNSCEAR 2014). Aucun syndrome aigu d'irradiation ni de décès pouvant être attribué à une exposition aux rayonnements ionisants n'ont été observés parmi les travailleurs engagés dans des travaux d'urgence.

Étant donné que la majorité des travailleurs a été faiblement exposée, avec des doses efficaces inférieures à 10 mSv au cours de la première année, et que moins de 1 % des travailleurs a reçu une dose efficace de 100 mSv ou plus au cours de la première année, il est peu probable qu'une augmentation de l'incidence des cancers (cancers solides, leucémies) due aux rayonnements ionisants soit perceptible.

Un petit groupe de 13 travailleurs ayant reçu une dose absorbée à la thyroïde estimée entre 2 et 32 Gy, la possibilité de survenue d'un cancer de la thyroïde chez ces travailleurs ne peut être exclue ; toutefois, le nombre de travailleurs exposés à ces fortes doses absorbées à la thyroïde est probablement trop faible pour pouvoir discerner une incidence accrue de ce cancer. Les résultats provisoires d'une enquête impliquant des examens par ultrasons de la thyroïde de 627 travailleurs d'urgence avec une dose absorbée à la thyroïde supérieure à 100 mGy et de 1 437 travailleurs avec une dose plus faible à la thyroïde ne montrent aucune différence significative de l'incidence des pathologies thyroïdiennes entre les deux groupes (IAEA 2015).

Une étude de cohorte (*Nuclear Emergency Workers Study*) a été mise en place pour fournir une évaluation complète de la santé des travailleurs intervenus sur le site de Fukushima Daiichi après l'accident. Des informations sur la santé sont recueillies par le biais de questionnaires et d'échantillons biologiques (sang, urine) (Kitamura et al. 2018 ; Yasui 2016). Fin 2019, plus de 6 700 travailleurs avaient accepté de participer à cette étude.

2.2. LES PATHOLOGIES NON-CANCÉREUSES POUR LES INTERVENANTS ET LES POPULATIONS EXPOSÉES

Pathologies cardiovasculaires et cérébrovasculaires

Les pathologies de l'appareil circulatoire associées à des expositions aux rayonnements ionisants sont principalement des cardiopathies ischémiques et des maladies cérébrovasculaires majoritairement causées par l'athérosclérose qui se caractérise par le dépôt d'une plaque essentiellement composée de lipides (athérome) sur la paroi des artères. À terme, ces plaques peuvent entraîner des lésions de la paroi artérielle (sclérose), conduire à l'obstruction du vaisseau ou encore se rompre, avec des conséquences telles qu'un infarctus aigu du myocarde ou un accident vasculaire cérébral.

En 2006, un risque accru de maladie cérébrovasculaire et de cardiopathie ischémique lié à la dose de rayonnements ionisants a été observé chez les liquidateurs russes (Ivanov et al. 2006), bien qu'aucune

information n'ait été disponible pour tenir compte d'autres facteurs de risque de ces maladies. Le suivi épidémiologique de ces liquidateurs, basé sur le registre national de Tchernobyl, a été prolongé de 12 ans, jusqu'en 2012, confirmant l'augmentation de l'ordre de 50 % par Gy du risque de maladie cérébrovasculaire (Kashcheev et al. 2016) ; là encore, aucune information n'était disponible sur les autres facteurs de risque, à l'exception des maladies concomitantes telles que le diabète. **Une étude sur les liquidateurs ukrainiens intervenus sur la période 1986-1987 a aussi révélé une augmentation du risque de maladies cardiovasculaires et cérébrovasculaires liée à la dose** (Krasnikova et al. 2013, 2014). Cependant, ces résultats doivent être confirmés car on peut s'interroger sur l'exhaustivité et l'exactitude de l'enregistrement de ces maladies et des estimations de dose, et bien qu'un certain nombre de risques non liés aux rayonnements aient été identifiés, les facteurs de confusion n'ont pas été pris en compte, à l'exception de l'âge.

Une étude publiée en 2018 s'est intéressée au risque d'arythmie cardiaque chez des enfants vivant en territoires russes contaminés par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Cette étude a été menée dans le cadre du programme de recherche EPICE (*Evaluations des Pathologies Induites par le Césium*), lancé par l'IRSN en 2009 en partenariat avec le centre de diagnostic clinique et biologique de la ville de Bryansk (Russie), pour répondre aux questionnements de scientifiques et d'associations quant aux conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl sur les enfants.

Ainsi pendant quatre ans (2009-2013), environ 18 000 enfants âgés de 2 à 18 ans ont été suivis sur le plan cardiaque et radiologique : électrocardiogramme, échographie cardiaque et mesure de l'activité corporelle en césium 137. Pour certains enfants, un enregistrement des paramètres électriques cardiaques (Holter) a été effectué sur 24 heures, ainsi qu'un bilan des principaux marqueurs cardiaques plasmatiques. Une arythmie cardiaque a ainsi été diagnostiquée chez environ 2 500 enfants. La prévalence d'arythmie cardiaque n'était pas différente entre les enfants des territoires contaminés et ceux des territoires non contaminés. De plus, le risque d'arythmie cardiaque n'augmentait pas avec la contamination corporelle en césium 137 des enfants. Ainsi, cette étude n'a pas observé d'association entre la contamination par césium 137 et le risque d'arythmie cardiaque chez l'enfant (Jourdain et al. 2018).

Cataractes

Les cataractes sont la cause la plus fréquente de cécité dans le monde. L'exposition aux rayonnements ionisants du cristallin est un facteur de risque connu d'apparition de cataractes chez l'homme. Les autres facteurs de risque sont le vieillissement, la génétique (cataractes congénitales), l'exposition aux ultraviolets, le diabète, un indice de masse corporelle élevé, le tabagisme, la consommation d'alcool, l'utilisation prolongée de corticostéroïdes et les traumatismes oculaires.

Un risque accru de cataracte, en particulier d'opacité cristallinienne sous-capsulaire postérieure, a été rapporté dans une cohorte de liquidateurs ukrainiens (Worgul et al. 2007). Cependant, les études menées jusqu'à présent ne permettent pas de conclure quant à un risque de cataracte significativement plus élevé en raison de problèmes méthodologiques liés à l'analyse statistique des données.

Effets cognitifs et neurologiques

Il est désormais bien connu que des facteurs environnementaux et génétiques, des troubles psychiatriques, tels que la schizophrénie et la dépression, et l'utilisation de certains médicaments peuvent jouer un rôle sur l'apparition de troubles neurologiques, cognitifs et du vieillissement, tels que la maladie d'Alzheimer et les démences séniles.

L'étude des effets d'expositions à des rayonnements ionisants sur le développement neurologique et les fonctions cognitives a suscité au cours des dernières années un intérêt considérable. Cependant, la recherche dans ce domaine est encore rare.

Après l'accident de Tchernobyl, des études sur les liquidateurs ukrainiens exposés à une dose moyenne d'environ 100 mGy ont démontré une incidence accrue de dysfonctionnement cognitif, sans pour autant que la relation entre la nature des effets et la dose de rayonnement n'ait pu être établie de manière certaine (Loganovsky et al. 2008; Bazyka et al. 2018).

Une étude récente menée dans le cadre du projet européen CEREBRAD (*Cognitive and Cerebrovascular Effects Induced by Low Dose Ionizing Radiation*) auprès de 326 liquidateurs ukrainiens a montré une prévalence plus élevée de déficit cognitif et psychologique chez les travailleurs ayant reçu des doses supérieures à 100 mGy, en particulier chez ceux ayant reçu des doses supérieures à 500 mGy. Dans l'ensemble, cette étude suggère que le déficit cognitif chez l'homme, 25 à 30 ans après l'irradiation, pourrait être influencé par la dose et l'âge au moment de l'exposition.

Une augmentation des taux de pathologies neurologiques a également été observée dans un délai de 7 à 21 ans après l'exposition aux rayonnements ionisants dans une cohorte d'environ 40 000 personnes évacuées de la zone de Tchernobyl, en particulier 12 à 21 ans après l'exposition (Buzunov and Kapustynska 2018). Bien que les doses résultant d'une exposition externe et de la présence de radionucléides à vie longue soient relativement faibles, cette étude a montré une augmentation statistiquement significative de la survenue de pathologies neurologiques chez les individus présentant des doses thyroïdiennes élevées d'iode 131, comprises entre 300 et 750 mGy. Toutefois, des études supplémentaires sont nécessaires afin de confirmer une éventuelle association entre la dose thyroïdienne et le développement d'un déficit cognitif chez les personnes exposées aux rayonnements.

2.3. IMPACT SANITAIRE NON RADIOLOGIQUE D'UN ACCIDENT NUCLÉAIRE, NOTAMMENT DÛ À L'ÉVACUATION

Les problèmes de santé suite à un accident nucléaire ne se limitent pas aux conséquences de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Suite à l'accident de Fukushima Daiichi, le problème majeur au cours des premiers mois a été l'impact sanitaire de l'évacuation de la population locale, en particulier parmi les personnes les plus vulnérables telles que les personnes âgées. En effet, divers problèmes sont apparus à moyen et long terme suite à ce changement de mode de vie à grande échelle : défaillances des infrastructures et des services médicaux, isolement social, perte de motivation dans la vie, conflits entre générations, perturbation du régime alimentaire, entraînant des diagnostics et une prise en charge des maladies plus tardifs, l'aggravation de maladies chroniques comme le diabète et des problèmes psychologiques. L'apparition ou l'aggravation de ces problèmes sont aujourd'hui attribués à un manque de soutien social et à des changements environnementaux plutôt qu'à la perception individuelle du risque lié à l'exposition aux rayonnements ionisants. 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 (ICRP International Conference on Recovery After Nuclear Accidents. 2020).

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.

3. BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

- Ainsbury EA, et al. *Radiation-induced lens opacities: Epidemiological, clinical and experimental evidence, methodological issues, research gaps and strategy*. Environ Int 2021; 146:106213. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106213>
- Bazyka DA, et al. *Multiple myeloma among Chernobyl accident clean-up workers - state and perspectives of analytical study*. Probl Radiat Med Radiobiol 2013; 18:169–72. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25191721/>
- Bazyka D, et al. *Epidemiology of Late Health Effects in Ukrainian Chornobyl Cleanup Workers*. Health Phys 2018; 115:161-169. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000868>
- Bogdanova TI, et al. *Papillary Thyroid Carcinoma in Ukraine After Chernobyl and in Japan After Fukushima: Different Histopathological Scenarios*. Thyroid 2020. <https://doi.org/10.1089/thy.2020.0308>
- Buzunov OA, Kapustynska VO. *Epidemiological studies of cerebrovascular disease of the population evacuated from the 306km zone of the ChNPP at the age of 18–60 years. Analysis of the influence of internal ionizing radiation on the thyroid gland 131I*. Probl Radiac Med Radiobiol 2018; 23:96-106. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-96-106>
- CEREBRAD. *Cognitive and Cerebrovascular Effects Induced by Low Dose Ionizing Radiation*. www.cerebrad-fp7.eu.
- Cléro E, 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. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106230>
- Hatch M, et al. *Somatic health effects of Chernobyl: 30 years on*. Eur J Epidemiol 2017; 32(12):1047-1054. <https://doi.org/10.1007/s10654-017-0303-6>
- IAEA. *The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 4. Radiological consequences*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2015. <https://www.iaea.org/publications/10962/the-fukushima-daiichi-accident>
- IARC Expert Group on Thyroid Health Monitoring after Nuclear Accidents. *Thyroid health monitoring after nuclear accidents*. IARC Technical Publications No 46. Lyon: IARC (International Agency for Research on Cancer), WHO; 2018. <http://tmnuc.iarc.fr/en/>
- ICRP. *International Conference on Recovery After Nuclear Accidents Radiological Protection Lessons from Fukushima and Beyond*. 1-4 December, 2020. <https://www.icrprecovery.org>
- Ivanov VK, et al. *The risk of radiation-induced cerebrovascular disease in Chernobyl emergency workers*. Health Phys 2006; 90:199–207. <https://doi.org/10.1097/01.hp.0000175835.31663.ea>
- Ivanov VK, et al. *Risk of thyroid cancer among Chernobyl emergency workers of Russia*. Radiat Environ Biophys 2008; 47:463–7. <https://doi.org/10.1007/s00411-008-0177-9>
- Jourdain JR, et al. *Is exposure to ionising radiation associated with childhood cardiac arrhythmia in the Russian territories contaminated by the Chernobyl fallout? A cross-sectional population-based study*. BMJ Open 2018; 8(3):e019031. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019031>
- Kashcheev VV, 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. <https://doi.org/10.1007/s00411-014-0572-3>

- Kashcheev VV, et al. *Radiation-epidemiological study of cerebrovascular diseases in the cohort of Russian recovery operation workers of the Chernobyl accident*. Health Phys 2016; 111:192–197. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000000523>
- Kesminiene A, et al. *Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators*. Radiat Res 2008; 170:721–35. <https://doi.org/10.1667/rr1231.1>
- Kesminiene A, et al. *Risk of thyroid cancer among Chernobyl liquidators*. Radiat Res 2012; 178:425–36. <https://doi.org/10.1667/rr2975.1>
- Kitamura H, et al. *Epidemiological Study of Health Effects in Fukushima Nuclear Emergency Workers-Study Design and Progress Report*. Radiat Prot Dosimetry 2018; 182(1):40-48. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy136>
- Krasnikova LI, et al. *Radiation and nonradiation factors impact on development of cerebrovascular diseases in the Chernobyl clean-up workers. The epidemiological study results*. Probl Radiat Med Radiobiol 2013; 18:89–101. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25191714/>
- 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 Radiat Med Radiobiol 2014; 19:67–79. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25536549/>
- Loganovsky K, et al. *The mental health of clean-up workers 18 years after the Chernobyl accident*. Psychol Med 2008 ; 38(4) :481-488. <https://doi.org/10.1017/S0033291707002371>
- Ohira T, 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. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrz104>
- Oughton D, et al, on behalf of the SHAMISEN Consortium. *Recommendations and procedures for preparedness and health surveillance of populations affected by a radiation accident*. 2017. <https://www.isglobal.org/en/-/shamisen>
- Ozasa K, 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):229-243. <https://doi.org/10.1667/rr2629.1>
- Pasqual E, et al. *Cognitive effects of low dose of ionizing radiation - Lessons learned and research gaps from epidemiological and biological studies*. Environ Int 2021; 147:106295. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106295>
- Rahu K, et al. *Site-specific cancer risk in the Baltic cohort of Chernobyl cleanup workers, 1986–2007*. Eur J Cancer 2013; 49:2926–33. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2013.04.014>
- Richardson DB, 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)*. The BMJ 2015; 351:h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
- Rogel A, et al. *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. <https://www.santepubliquefrance.fr/docs/epidemiologie-du-cancer-de-la-thyroide-30-ans-apres-l-accident-de-tchernobyl-frequence-facteurs-de-risque-et-impact-des-pratiques-diagnostiques>
- Romanenko AY, 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. <https://doi.org/10.1667/rr1404.1>
- Tapio S, et al. *Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases*. Environ Int 2021; 146:106235. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106235>

- Togawa K, 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.
- UNSCEAR. *Sources, effects and risks of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report (Volume II) to the General Assembly with scientific annexes. Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident*. New York: United Nations; 2000. <https://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>
- UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II, Annex D. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident*. United Nations, New York 2011. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html
- UNSCEAR. *Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. I, Scientific Annex A*. United Nations, New York 2014. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html
- UNSCEAR. *Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work*. New York: United Nations; 2018. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/Chernobyl_WP2017.html
- UNSCEAR. *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*. 2021. Sous presse.
- WHO. *A framework for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies*. World Health Organization; 2020. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240015456>
- Worgul BV, et al. *Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures*. *Radiat Res*. 2007; 167:233–43. <https://doi.org/10.1667/rr0298.1>
- Yasui S. *A recommended epidemiological study design for examining the adverse health effects among emergency workers who experienced the TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident in 2011*. *J Occup Environ Hyg* 2016; 13(5): D77-88. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1125484>
- Zablotska LB, et al. *Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers*. *Environ Health Perspect* 2013; 121:59–65. <https://doi.org/10.1289/ehp.1204996>