

Les victimes invisibles de Utilisation de l'énergie nucléaire

Rayonnements sur les lieux de travail et contamination environnementale

**Inge Schmitz-Feuerhake, Wolfgang Hoffmann,
Oda Becker et Karin Wurzbacher**

BASK Commission atomique et de radioprotection du Bund

Septembre 2022

Cher lecteur,

Quand on évoque les risques et les conséquences de l'énergie nucléaire, on pense généralement à Tchernobyl, Fukushima, Nagasaki et Hiroshima, aux installations de stockage de déchets nucléaires endommagées et au problème non résolu des déchets nucléaires. Les grandes catastrophes de l'ère nucléaire sont gravées dans notre mémoire collective. Largement ignorés du grand public et minimisés par le lobby nucléaire et les responsables politiques, les dangers liés au fonctionnement régulier des centrales nucléaires sont pourtant bien réels. Le point de départ même de la chaîne nucléaire, indispensable à la production d'énergie nucléaire, est celui d'une catastrophe insidieuse.

De l'extraction de l'uranium à l'exploitation des centrales nucléaires, en passant par leur démantèlement et le stockage des déchets radioactifs, l'énergie nucléaire génère des émissions radioactives tout au long de sa chaîne de production. Invisibles, inodores et insensibles, les substances radioactives représentent un danger imprévisible. Cancers, anomalies génétiques, maladies cardiovasculaires et troubles métaboliques figurent parmi les risques sanitaires connus liés à une faible exposition aux rayonnements.

Les conséquences sur la santé apparaissent généralement avec un certain décalage, parfois seulement à la génération suivante. De ce fait, le lien entre la maladie et sa cause est resté longtemps méconnu. Les personnes touchées, exposées à des niveaux élevés de rayonnements ionisants en raison de leur profession ou de leur lieu de résidence, continuent de lutter en vain pour obtenir la reconnaissance de leur préjudice et une indemnisation.

C'est grâce à des scientifiques indépendants que nous avons aujourd'hui la certitude des risques sanitaires liés aux émissions radioactives. Avec un dévouement sans faille, ces scientifiques, notamment les membres de la Commission nucléaire et radiologique du BUND (Amis de la Terre Allemagne), ont surmonté l'opposition du lobby nucléaire et mis en lumière ces liens. Il est impératif que les victimes soient reconnues juridiquement et indemnisées par l'industrie nucléaire. Parallèlement, les émissions radioactives doivent être évitées autant que possible et les seuils d'exposition abaissés en conséquence.

Cette publication contribue de manière significative à la sensibilisation aux conséquences des émissions radioactives. À travers un témoignage personnel et une synthèse de nombreuses études scientifiques, les auteurs attirent l'attention sur un sujet trop souvent négligé dans les débats sur l'énergie nucléaire et mettent en lumière le sort des victimes de l'industrie nucléaire.

Quiconque parle aujourd'hui d'énergie nucléaire devrait également connaître cette partie de la vérité.



Olaf Bandt

Président de la Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND)

Contenu

Liste des figures et des tableaux	4
Résumé.....	5
1. Introduction	7
2. Des lieux de travail lumineux.....	8
2.1 Les travailleurs temporaires en Allemagne	8
2.2 Résultats récents concernant les dommages causés par les radiations chez les employés de l'industrie nucléaire	12
2.3 Les employés du secteur minier de l'uranium et leurs expériences en Allemagne.....	12
2.4 Étude des mineurs d'uranium allemands	15
2.5 Conclusions.....	17
3. Contamination environnementale.....	18
3.1 Cas groupés de leucémie dans les centrales nucléaires allemandes	18
3.2 Étude menée dans quatre pays sur la leucémie infantile précoce dans les centrales nucléaires	23
3.3 Autres risques sanitaires à proximité des installations nucléaires allemandes	25
3.4 Paysages contaminés par l'extraction d'uranium en Allemagne	35
3.5 Autres résultats en Grande-Bretagne	36
3.6 Autres résultats en France	38
3.7 Fonctionnement normal aux États-Unis d'Amérique	39
3.8 Fonctionnement normal au Canada	40
3.9 Opérations normales en Union soviétique/Russie.....	41
3.10 Fonctionnement normal au Japon	42
3.11 Conclusions	42
4. Protection contre les rayonnements selon des normes obsolètes.....	43
5. Références	49
6. Glossaire	59

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 Carte montrant la localisation de 16 cas de leucémie aiguë chez des enfants de moins de 15 ans dans un rayon de 5 km autour de la centrale nucléaire de Krümmel (KKK)	20
Figure 2 Risque de leucémie (taux d'incidence standardisé [TIS]) chez les jeunes enfants vivant à proximité des centrales nucléaires en Allemagne (D), en Grande-Bretagne (GB), en Suisse (CH) et en France (F) en fonction de la distance à la centrale nucléaire	25
Figure 3 Évolution du taux de mortalité, de la mortalité infantile et de la mortalité par cancer chez l'enfant dans le district de Bentheim après la mise en service de la centrale nucléaire de Lingen en 1968	28
Figure 4 Taux d'incidence standardisé (TIS) des malformations congénitales à proximité de la centrale nucléaire de Grafenrheinfeld, 1984-1991,	32
Figure 5 Taux de malformations congénitales à proximité des centrales nucléaires de Philippsburg et de Biblis entre 2006 et 2008 en fonction de la distance	33
Tableau 1 : Communes de Basse-Saxe présentant une incidence statistiquement élevée de leucémie aiguë chez l'enfant (1984-1993)	19
Tableau 2 Risque relatif de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans vivant à proximité de centrales nucléaires... Tableau 3 Risques accrus pour la santé dans les installations nucléaires en Allemagne, à l'exclusion des études d'Elbmarsch et de Kikk	26

action de grâces

Nous remercions Christina Hacker, le Dr Alfred Körblein et Jan Warode pour la relecture du manuscrit et pour leurs nombreuses suggestions précieuses.

contact

Oda Becker et Inge Schmitz-Feuerhake

Président de la Commission atomique et de radioprotection du BASK (BUND)

Angela Wolff

Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature
(BUND), Kaiserin-Augusta-Allee 5, 10553 Berlin

E-mail: angela.wolff@bund.net

Téléphone : +49 30 275 86-562

Résumé

La question de l'opportunité d'exploiter des centrales nucléaires pour la production d'énergie est de nouveau débattue en Allemagne. Les partisans estiment que le risque d'accidents majeurs liés aux réacteurs de nouvelle génération est négligeable et que le traitement sûr des déchets radioactifs ne pose aucun problème. Les effets des faibles doses de rayonnement ne sont pas craints. Par conséquent, les risques sanitaires liés au fonctionnement normal des installations nucléaires sont ignorés. Ce rapport présente les conséquences sanitaires des rayonnements radioactifs sur les lieux de travail et pour la population vivant à proximité des installations nucléaires en fonctionnement normal.

Des centaines de milliers de travailleurs, principalement des hommes, étaient et sont employés dans le secteur de la technologie nucléaire, depuis l'extraction du minerai d'uranium dans les mines jusqu'au démantèlement des centrales nucléaires.

Centrales nucléaires. Le chapitre 2 traite du sort des mineurs de SDAG Wismut, en ex-RDA, qui fut jadis la troisième région minière d'uranium au monde. Des milliers d'entre eux tombèrent gravement malades et moururent prématurément des suites de leur travail. Les personnes affectées par ces conséquences à long terme avaient, et ont toujours, très peu de chances d'obtenir une indemnisation. En Allemagne, comme ailleurs, les salariés qui tombent malades ont peu de chances de voir leur maladie professionnelle liée aux radiations reconnue, pour des raisons historiques et structurelles. Les employés d'entreprises extérieures travaillant sur les sites nucléaires, dont le nombre a toujours été très élevé par rapport à celui des employés de l'entreprise, continuent de courir un risque particulier. La sortie progressive du nucléaire en Allemagne ne signifie pas, pour l'instant, que la fin de l'exposition aux radiations pour les travailleurs soit prévisible. Lors des opérations de démantèlement, le risque d'inhalation de poussières radioactives constitue un problème majeur.

Les études les plus vastes sur les effets des radiations ont été menées dans le cadre du projet INWORKS (Étude internationale sur les travailleurs du nucléaire), qui a suivi 308 297 employés de l'industrie nucléaire en France, en Grande-Bretagne et aux États-Unis (données publiées en 2015). Des résultats similaires ont été observés dans les trois pays : les données exhaustives montrent que même de faibles doses de rayonnements ionisants présentent un risque de cancer.¹ Plus l'exposition aux radiations était élevée, plus le nombre de décès par cancer augmentait.

Dans un communiqué relatif à la nouvelle loi de 2017 sur la radioprotection, la Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND) a plaidé pour une réduction d'un facteur dix des limites de dose pour les travailleurs exposés aux rayonnements, en se fondant sur l'état actuel des recherches en épidémiologie des rayonnements. Le communiqué souligne également que, outre le cancer et la leucémie, de nombreuses autres maladies, telles que les tumeurs cérébrales bénignes et les maladies cardiovasculaires, peuvent être provoquées par de faibles doses de rayonnements. Par ailleurs, la BUND a critiqué le mépris des risques génétiques liés aux rayonnements et le déni de tout risque pour les embryons.

Des critiques ont été formulées à l'encontre de l'exposition des fœtus dans l'utérus à des doses de radiation inférieures à 100 mSv.

Le chapitre 3 traite des conséquences sanitaires de l'exploitation des centrales nucléaires et autres installations nucléaires pour la population locale, tant en Allemagne qu'à l'étranger.

¹ Contrairement aux hypothèses précédentes, il a été démontré qu'à dose égale, une exposition chronique à de faibles doses de rayonnement (comme c'est généralement le cas sur les lieux de travail) comporte au moins le même risque de mortalité par cancer, voire un risque plus élevé, qu'une exposition à court terme au rayonnement (comme celle causée par les bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki).

À l'échelle internationale, de nombreuses études scientifiques ont été menées sur les cas de leucémie à proximité des centrales nucléaires. Ces études s'appuient souvent sur des observations faites par les riverains. La leucémie est une conséquence connue de l'exposition aux radiations. Cette maladie est généralement rare, et particulièrement rare chez l'enfant et l'adolescent.

Des scientifiques pro-nucléaires avaient avancé la théorie de l'existence de nombreux foyers locaux de leucémie à travers le monde, sans cause identifiable. Cet argument, fréquemment utilisé, s'est avéré par la suite infondé. Le débat en Allemagne a atteint son paroxysme avec les résultats de l'étude KiKK (Cancers infantiles à proximité des centrales nucléaires) en 2007. Cette étude cas-témoins, portant sur toutes les centrales nucléaires en activité en Allemagne entre 1980 et 2003, a révélé une augmentation de 60 % du taux de cancer et une augmentation significativement plus élevée de 118 % du taux de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans vivant à moins de 5 km des centrales nucléaires. De plus, dans un rayon de 15 km, le risque de développer un cancer infantile précoce et une leucémie augmente avec la proximité de la centrale nucléaire. Officiellement, il a été et reste affirmé que les radiations ne peuvent être la cause, la dose étant trop faible. Des études menées dans un rayon de 5 km autour des centrales nucléaires en Grande-Bretagne, en Suisse et en France montrent des résultats similaires à ceux observés chez les nourrissons en Allemagne.

Même en dehors de la période couverte par l'étude KiKK, et dans d'autres installations nucléaires en Allemagne, des effets néfastes sur la santé ont été observés dans les zones environnantes. De plus, des malformations congénitales sont survenues chez les nouveau-nés et une augmentation de la mortalité périnatale a été constatée.

D'autres exemples provenant d'autres pays incluent le foyer de leucémie de l'usine de retraitement de combustible nucléaire britannique de Sellafield (découvert en 1984), de l'usine de retraitement française de La Hague, ainsi que des cas constatés aux États-Unis, au Canada, en Russie et au Japon.

Le chapitre 4 examine le cadre politique d'évaluation des effets des rayonnements. L'Allemagne est membre de la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM), qui promeut l'énergie nucléaire, et est donc liée par traité. Toutefois, le droit de l'UE autorise également les États membres à adopter des limites plus strictes pour des raisons de santé. L'Allemagne, pays qui abandonne progressivement l'énergie nucléaire, ne saisit pas cette opportunité. Au contraire, elle procède à un relâchement rétrograde de ses normes de radioprotection.

Les revendications formulées par BUND en 2017 concernant l'amélioration de la radioprotection des travailleurs et du grand public restent plus que jamais d'actualité. Il est impératif de les mettre en lumière et de défendre leur application.

Lorsqu'on examine le risque inhérent à un accident grave dans une centrale nucléaire, il ne faut pas oublier que le fonctionnement normal d'une telle centrale présente déjà un risque pour la population et les employés. Ce risque persiste lors du démantèlement des installations nucléaires ainsi que lors du transport et du stockage des déchets radioactifs. Ces risques doivent également être pris en compte dans l'analyse risques-avantages relative aux prolongations de licences d'exploitation actuellement envisagées ou à une nouvelle inversion du plan de sortie progressive.

1. Introduction

Dans le débat actuel sur la sécurité énergétique, le recours à l'énergie nucléaire est perçu, dans certains milieux économiques et politiques, comme une option incontournable pour la production d'énergie. Ses partisans citent notamment le Comité des Nations Unies pour la protection radiologique (UNSCEAR) et la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), selon lesquels les accidents de Tchernobyl et de Fukushima n'ont pas entraîné de dommages sanitaires significatifs pour les populations touchées. Les défenseurs du maintien de l'énergie nucléaire estiment que le risque d'accidents majeurs liés aux réacteurs de nouvelle génération est négligeable et que le traitement sûr des déchets nucléaires ne pose aucun problème.

Cette position s'inscrit dans une longue tradition du débat nucléaire. Les émissions nocives et leurs conséquences ont toujours été officiellement niées ou minimisées, et la radioprotection des employés a largement été laissée à la charge des exploitants respectifs.

En Allemagne, la coalition rouge-verte a négocié en 2001 la sortie progressive de l'énergie nucléaire d'ici 2021. En septembre 2010, le gouvernement de centre-droit d'Angela Merkel a dénoncé cet accord et décidé d'une prolongation significative des autorisations d'exploitation. Six mois plus tard seulement, suite à la catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011, cette même coalition a décidé d'avancer à nouveau l'échéance. (Conformément à la loi sur l'énergie atomique, l'arrêt définitif des trois derniers réacteurs est prévu pour le 31 décembre 2022. Toutefois, une prolongation des autorisations d'exploitation est actuellement à l'étude en raison de la pénurie de gaz provoquée par la Russie.) La chancelière Merkel a cependant pris soin de souligner que les centrales nucléaires allemandes figuraient parmi les plus sûres au monde. Le fondement de cette affirmation reste flou et ne correspond pas aux conclusions des experts indépendants.

L'utilisation dite « pacifique » de l'énergie nucléaire a été proclamée par le président américain Eisenhower lors de la Conférence de Genève de 1955 sur l'énergie atomique et recommandée aux pays industrialisés. Ces derniers ont largement associé cette utilisation à l'accès potentiel à la bombe atomique, ce qui signifie que le « fonctionnement normal » des centrales nucléaires ne peut être dissocié de cette application en raison de la possibilité de produire des matières fissiles à usage militaire. Néanmoins, au-delà de l'importante contamination environnementale causée par les essais nucléaires, que les partisans relèguent au passé, et des accidents majeurs bien connus survenus dans les installations nucléaires, qu'ils estiment évitables à l'avenir grâce aux nouvelles technologies, cet article se concentrera sur les dommages souvent négligés causés par la maladie et la mort. Ces dommages, résultant de l'extraction et du traitement du minerai d'uranium comme combustible nucléaire, pendant l'exploitation et le démantèlement des réacteurs nucléaires, et jusqu'à l'élimination des déchets nucléaires, se sont produits et continueront de se produire parmi les populations concernées (chapitre 2).

En outre, les expériences – principalement allemandes – des victimes de rejets radioactifs apparemment inévitables dans l'environnement lors du fonctionnement normal des centrales nucléaires et autres installations nucléaires sont présentées pour les groupes de population touchés (chapitre 3).

Un autre aspect réside dans la minimisation officielle des effets des rayonnements, dans l'intérêt de l'industrie nucléaire, ce qui conduit à une sous-estimation du risque pour tous les autres utilisateurs de rayonnements ionisants et, par conséquent, à la création, en grande partie involontaire, de victimes inutiles des rayonnements. Ce phénomène est expliqué au chapitre 4, à partir d'une analyse critique des données sur les risques radiologiques fournies par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), qui constituent le fondement de la législation allemande en matière de radioprotection.

La Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND) soutient le mouvement antinucléaire allemand depuis sa création. Les auteurs de cet article sont membres de la Commission nucléaire et radiologique (BASK) de la BUND. Ils dédient ce recueil d'arguments contre le maintien de l'utilisation de cette technologie mortelle à toutes les victimes que leur militantisme n'a pu secourir.

2. Des lieux de travail rayonnants

2.1 Les travailleurs temporaires en Allemagne

David Kralik Un technicien hambourgeois a contracté une leucémie myéloïde chronique (LMC) en 1983, à l'âge de 33 ans. Entre juin 1976 et avril 1977, il avait travaillé régulièrement comme intérimaire, effectuant des travaux de réparation lors des essais à la centrale nucléaire de Brunsbüttel. Exposé à plusieurs reprises à des radionucléides, il devait prendre des douches jusqu'à ce que son dosimètre cesse de fonctionner. Il portait des dosimètres à film et des dosimètres optiques pendant son travail. Lorsqu'il a déclaré sa maladie professionnelle, les relevés de dosimétrie originaux et son passeport radiologique étaient introuvables. Après de nombreux échanges, le bureau officiel de radiométrie de Hambourg a fourni une copie certifiant une dose totale inférieure à 0,2 rem, soit moins de 2 mSv (la limite de dose pour les personnes exposées professionnellement était alors de 5 rem, soit 50 mSv par an). Il était fort probable que David Kralik ait également absorbé de la radioactivité. Cependant, celle-ci n'est pas détectée par les dosimètres standard. Aucune vérification n'a donc été effectuée pour confirmer une éventuelle incorporation.

La leucémie myéloïde chronique (LMC) est connue depuis longtemps comme une conséquence typique de l'exposition aux radiations. Chez les personnes non exposées, la maladie est extrêmement rare dans la tranche d'âge des 30-34 ans. Selon le registre des cancers de Hambourg, un seul homme de cette tranche d'âge a contracté une LMC à Hambourg entre 1972 et 1974 (les données d'incidence pour la fin des années 1970 et les années 1980 ne sont pas disponibles pour Hambourg). Avec une population masculine moyenne correspondante de 78 118 habitants, cela correspond à une incidence de 0,43 cas pour 100 000 habitants par an (Office statistique de l'État de Hambourg, 1976). La probabilité que David Kralik développe une LMC spontanément sur une période de 5 ans était donc d'environ $5 \times 0,43 \times 10^{-5} = 0,0215$ pour mille. L'association d'assurance responsabilité civile des employeurs (BG) pour la mécanique de précision et l'électrotechnique a néanmoins refusé de reconnaître cette affection comme maladie professionnelle. David Kralik a porté l'affaire devant le tribunal social de Lübeck et a été débouté. Le tribunal s'est appuyé sur l'avis d'expert du professeur Streffer d'Essen, qui a maintenu une dose de 0,0215 pour mille.

une dose de 4 mSv (0,4 rem) a été considérée comme possible et a conclu qu'il n'y avait pas de probabilité suffisante d'une cause radioactive.

Après sa chimiothérapie, David Kralik s'est retrouvé dans l'incapacité de travailler et a rencontré des difficultés financières.² Sa petite amie l'a quitté. Il a participé à un projet de recherche au Centre de recherche sur le cancer d'Heidelberg, portant sur le traitement de la leucémie chez l'adulte. Malheureusement, ses efforts furent vains ; il est décédé à l'âge de 36 ans.

Le professeur Streffer d'Essen est toujours un expert très sollicité par les associations d'assurance responsabilité civile des employeurs dans le cadre de procédures concernant les maladies professionnelles causées par les rayonnements ionisants.

Nekati Demirci, Un travailleur immigré turc a contracté un cancer du poumon en 1988, à l'âge de 42 ans. De mai 1983 à juin 1986, il avait travaillé comme intérimaire dans différentes installations nucléaires de la société KWU (Kraftwerk Union), principalement au nettoyage de bâtiments, de laboratoires et de leur contenu (fûts et autres conteneurs de matières radioactives) contaminés par la radioactivité. Selon son certificat de radioprotection, il avait reçu une dose corporelle totale de 760 mSv (76 rem) en janvier 1987. En 1985, il avait dû cesser de travailler en raison d'une contamination excessive. En avril 1988, il a été licencié pour refus de travailler, suite à des soupçons selon lesquels la détérioration de son état de santé était due à une exposition aux radiations.

Dans le cadre d'une action en justice intentée contre son employeur, diverses mesures de l'exposition personnelle de Nekati Demirci aux radionucléides ont été effectuées au laboratoire de radioactivité de l'Université de Brême fin 1988. Ce laboratoire était équipé d'un compteur de radioactivité corporelle totale. Après que Nekati Demirci se soit allongé, entièrement vêtu, à l'intérieur de l'appareil, un niveau de radioactivité de 20 000 Bq a été enregistré.³ On a mesuré du césium-137 (un produit de fission typique). Il s'est avéré que cette contamination était présente sur sa ceinture et non dans son corps, ce qui remet en question la fiabilité du contrôle des employés à KWU.

Suite à l'opération du cancer, la clinique thoracique Heidelberg-Rohrbach a fourni un échantillon de tissu pulmonaire prélevé chez le patient. Cet échantillon contenait de l'américium-241 (un élément transurannique issu de la désintégration du plutonium-241, isotope de réacteur nucléaire) ainsi que des isotopes de plutonium à longue durée de vie. La concentration de ces isotopes était environ 160 fois supérieure au niveau normal dû aux retombées radioactives des essais nucléaires atmosphériques. Malgré cela, l'employeur n'a versé aucune indemnisation et le patient n'a pas été reconnu comme souffrant d'une maladie professionnelle. Les arguments des experts Kuni et Schmitz-Feuerhake n'ont pas été retenus par le tribunal. Le physicien Alexander Kaul, de l'Institut d'hygiène radiologique de l'Office fédéral de la santé, a témoigné que le cancer de Demirci n'était pas radio-induit et que la dose annuelle admissible n'avait pas été dépassée. Il était un fumeur invétéré. Cependant, même les fumeurs ne développent généralement pas de cancer du poumon à un âge aussi jeune. De plus, fumer n'est pas interdit aux employés, et un poumon endommagé est plus sensible aux radiations.

²Il s'est impliqué dans une affaire de fraude avec un ami et a été condamné.

³Becquerel (Bq) Unité d'intensité de rayonnement 1 Bq = 1 désintégration par seconde

L'affaire a suscité un vif intérêt public, notamment en raison du soutien indéfectible apporté à Demirci par Eduard Bernhard, de l'Association fédérale des initiatives citoyennes pour la protection de l'environnement (BBU). Demirci est décédé à Istanbul à l'âge de 48 ans. La BBU a tenté, sans succès, d'obtenir l'exhumation de son corps afin de déterminer son niveau de radioactivité.

Dans son livre « Ganz unten » (publié pour la première fois en 1985), le journaliste Günter Wallraff aborde également la situation des travailleurs migrants dans l'industrie nucléaire. Sous l'identité d'un Turc nommé « Ali », il est trop imprudent pour s'aventurer lui-même sur les lieux de travail radioactifs et préfère interviewer des travailleurs temporaires turcs ayant œuvré à la centrale nucléaire de Würgassen (Rhénanie-du-Nord-Westphalie). Ces travailleurs étrangers temporaires sont affectés de préférence aux réparations ou aux révisions (maintenance courante) lorsque leur séjour ne peut être autorisé que pour de courtes périodes, avant que la dose annuelle admissible de 50 mSv ne soit atteinte. Ils sont ensuite licenciés et, ignorant ou faisant fi des risques, cherchent un autre emploi. Il a également été rapporté à plusieurs reprises que les dosimètres qu'ils étaient tenus de porter étaient mis de côté pour éviter de perdre leur emploi relativement bien rémunéré. D'autres travailleurs retournent dans leur pays d'origine, si bien qu'aucun bilan précis du nombre de personnes et de leur exposition aux radiations n'a jamais pu être établi. D'après un entretien avec le contremaître responsable de la centrale nucléaire de Würgassen, le sous-traitant disposait d'environ 2500 travailleurs temporaires.

Wolfgang Hoffmann (1999) a établi, à partir de données de l'Office fédéral de radioprotection (BfS), que 75 % des employés des centrales nucléaires allemandes entre 1980 et 1997 étaient des intérimaires et recevaient, en moyenne, des doses de rayonnement environ 70 % supérieures à celles des employés permanents. Selon une réponse du gouvernement fédéral datant de 2011 à une enquête parlementaire menée par le parti Die Linke, la dose annuelle moyenne reçue par les intérimaires était systématiquement et significativement plus élevée que celle reçue par le personnel permanent depuis 1992, d'environ 80 % (Décision du Bundestag n° 17/6031 du 1er août 2011 ; voir également Strahlentelex 2013).

Ce n'est qu'en 1995 que les conditions de travail des intérimaires se sont améliorées. Toutefois, cette amélioration s'est limitée à l'enregistrement des personnes et à l'archivage des doses individuelles, grâce à la création d'un registre central de radioprotection à l'Office fédéral de radioprotection (BfS). L'évaluation des effets des rayonnements est restée inchangée et repose encore aujourd'hui sur les témoignages de survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki en 1945. La pratique de non-reconnaissance par les organismes d'assurance responsabilité civile des employeurs, qui ne concerne pas uniquement les intérimaires, persiste (Schmitz-Feuerhake et al., 2021a).

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR), qui est également l'organisme de normalisation de la législation allemande en matière de radioprotection, a identifié dans les années 1970 trois effets susceptibles d'être observés chez l'homme à faibles doses : le cancer radio-induit, les dommages génétiques chez la descendance après irradiation d'un parent, *et in utero*. Les dommages causés lors de la phase préimplantatoire à l'embryon et au fœtus peuvent se manifester par la mort fœtale, des malformations squelettiques et organiques, et le décès du nourrisson. *in utero* La CIPR a établi une dose minimale nécessaire pour les effets produits (anciennement 50 mSv, actuellement 100 mSv). Concernant les deux premiers effets des rayonnements, la CIPR a défini le principe de « dommage stochastique ». Cela signifie qu'il est admis qu'un seul photon de rayonnement peut induire une mutation cellulaire.

cela peut se produire. Dans le cas d'une cellule corporelle – appelée cellule « somatique » –⁴Mutation – cela peut entraîner le développement d'une croissance incontrôlée (cancer), ou dans le cas d'une cellule germinale, des dommages à la descendance ultérieure.

Il n'existe donc pas de dose sans risque ni de seuil de dose inoffensive pour le cancer et les dommages génétiques. En réalité, des lésions radio-induites peuvent survenir même à très faible dose ; seule la probabilité de leur apparition est proportionnellement plus faible qu'à des doses plus élevées. Les limites de dose ne peuvent donc pas éliminer les dommages, mais seulement les limiter. Alexander Kaul (président de l'Office fédéral de radioprotection de 1989 à 1999) et d'autres experts reconnus ont longtemps qualifié ce risque d'« hypothétique », en ce sens qu'il n'existait probablement pas. Ils soutenaient qu'il serait impossible de le prouver, car les effets observés dans les limites de dose admissibles – y compris en milieu professionnel – étaient si faibles qu'ils ne pouvaient être détectés statistiquement. Or, cette affirmation s'est révélée erronée, comme l'a démontré, par exemple, l'étude INWORKS de 2015 (voir ci-dessous).

Selon l'Office fédéral de radioprotection (BfS), environ 17 000 personnes étaient enregistrées comme employés du secteur nucléaire allemand en 2020. La sortie progressive du nucléaire en Allemagne ne signifie pas, pour l'instant, que la fin de l'exposition des travailleurs aux rayonnements soit prévisible. Le risque d'ingestion de poussières radioactives pose un problème dosimétrique particulier (voir chapitre 3.1), qui sera exacerbé par le démantèlement en cours des installations nucléaires. Lors de la décontamination de ces installations, les employés sont exposés à une radioactivité non maîtrisée.

Le professeur Rainer Frentzel-Beyme, agissant en tant qu'expert médical, a été désigné de manière aléatoire pour étudier le cas de trois travailleurs temporaires employés par NUKEM à Hanau, en Allemagne, qui participaient au démantèlement d'une installation de production d'éléments combustibles MOX. Ces éléments sont composés d'un oxyde mixte contenant non seulement de l'uranium, mais aussi du plutonium, un élément particulièrement dangereux. Les trois travailleurs ont développé un lymphome non hodgkinien après leur travail, à l'âge de 46, 49 et 52 ans (Frentzel-Beyme et al., 2020). Ce cancer est généralement considéré comme une maladie typique du vieillissement après 70 ans et est officiellement classé en Allemagne comme présentant un faible risque d'irradiation. Cependant, il est fréquent chez les travailleurs du nucléaire (Richardson et al., 2009 ; Schmitz-Feuerhake et al., 2021b). Les données dosimétriques confirment que les trois employés atteints ont été exposés à une atmosphère contenant du plutonium (Wolff et al., 2018). L'organisme compétent BG ETEM (organisme allemand d'assurance sociale contre les accidents du travail pour les industries de l'énergie, du textile, de l'électricité et des médias)⁵Toutefois, elle nie tout lien. En mai 2019, le BG ETEM a publié un communiqué de presse, accompagné d'un lien vidéo, intitulé « Démantèlement des centrales nucléaires : planifier la sécurité au travail au plus tôt », sous forme d'interview. Thomas Ludwig, responsable du département de radioprotection du BG ETEM, a répondu aux questions sur le sujet et n'a relevé aucune lacune dans les procédures précédentes ni aucun manque de précautions (BG ETEM 2021).

⁴Corps Soma (grec)

⁵Énergie, textiles, génie électrique, produits médiatiques

2.2 Résultats récents concernant les dommages causés par les radiations chez les employés de l'industrie nucléaire

Depuis les années 1990, de vastes études épidémiologiques ont observé une augmentation significative des taux de cancer chez les travailleurs exposés professionnellement aux rayonnements, même dans les limites légales de dose : des maladies dont le lien avec les rayonnements était jusqu'alors inconnu sont également apparues plus fréquemment que prévu. Les enfants de ces travailleurs présentaient une incidence plus élevée de malformations congénitales (Wiesel et al., 2016 ; Bund, 2017).

Les études les plus importantes réalisées à ce jour, en termes de nombre de participants, ont été menées dans le cadre du projet INWORKS (Étude internationale sur les travailleurs du nucléaire), portant sur 308 297 employés du secteur nucléaire en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis. Neuf instituts de recherche internationaux ont participé à l'étude sur la mortalité due aux tumeurs solides malignes (Richardson et al., 2015). La dose cumulée moyenne reçue par l'intestin a été calculée à 20,9 mGy (médiane : 4,1 mGy).⁶Ce constat a été établi. Contrairement aux hypothèses précédentes, il a été démontré que le risque de mortalité par dose d'irradiation chronique à faible dose (fréquente sur les lieux de travail) n'est pas inférieur à celui observé après une exposition de courte durée (comme à Hiroshima et Nagasaki). De nombreuses études menées en milieu professionnel sur les effets à long terme sur les organes ont révélé des risques d'irradiation significativement plus élevés que ceux observés chez les survivants des bombardements atomiques japonais (Mämpel et al., 2015 ; Frentzel-Beyme et al., 2020 ; Kuni, 2021). Toutefois, ces derniers constituent toujours le groupe de référence (BfS, 2022a ; Ulanowski et al., 2020). Cela signifie que, pour qu'une maladie professionnelle soit reconnue, la dose doit être de l'ordre de plusieurs Sv (correspondant à plusieurs milliers de mSv), dépassant ainsi largement la limite de 400 mSv fixée pour les personnes exposées professionnellement en Allemagne.

Dans une déclaration relative à la nouvelle loi de 2017 sur la radioprotection, la Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND) a plaidé pour une réduction d'un facteur dix des limites de dose pour les travailleurs exposés aux rayonnements, en se fondant sur de nouvelles données en épidémiologie des rayonnements (BUND 2017). La BUND a fait valoir que de nombreuses autres maladies, telles que les tumeurs cérébrales bénignes et les maladies cardiovasculaires, peuvent également être provoquées par de faibles doses de rayonnements. Par ailleurs, la BUND a critiqué le manque de prise en compte du risque de transmission génétique des rayonnements à la descendance et l'hypothèse d'une dose utérine inoffensive de 100 mSv pour les femmes enceintes.⁷

2.3 Employés dans l'extraction d'uranium et expériences en Allemagne

L'exploitation des centrales nucléaires nécessite d'importantes quantités de matières fissiles. De ce fait, les mineurs qui extraient le minerai d'uranium nécessaire sous terre sont perçus par le public comme une catégorie de travailleurs particulièrement éprouvée. Outre la pénibilité du travail, les mineurs d'uranium sont également exposés à des radiations inévitables. Aujourd'hui, les principaux gisements se situent dans les pays en développement. Même dans les pays industrialisés les plus avancés, la conscience des risques, souvent considérables, encourus est largement ignorée.

⁶1 mGy (milligray) correspond à 1 mSv (millisievert) pour les rayons X et les rayonnements gamma ; la limite de dose pour la population générale est de 1 mSv par an ; pour les personnes exposées professionnellement, elle est de 100 mSv en 5 ans.

⁷Seule la faction du Parti de gauche au Bundestag a politiquement approuvé cette critique (Bundestag allemand 2017).

Exploitation inhumaine et dommages causés à la santé au travail et à l'environnement par l'extraction de l'uranium (Atlas de l'uranium 2022).

En Allemagne, l'Office fédéral de radioprotection (BfS) ne recense aucun exploitant d'extraction d'uranium dans son registre de radioprotection. Cependant, un héritage de la RDA demeure, car l'armée soviétique avait ordonné l'exploitation minière d'uranium en Allemagne de l'Est en 1946. Ceci a conduit au développement du troisième plus grand gisement d'uranium au monde en Saxe et en Thuringe, exploité plus tard par la société germano-soviétique SDAG Wismut. Après la chute de la RDA, le site est devenu propriété de la République fédérale d'Allemagne. L'exploitation minière a cessé en 1990 en raison de l'épuisement des gisements d'uranium et du manque de rentabilité. Les travaux de dépollution ont été confiés au ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie, et les fonds nécessaires ont été alloués par le budget fédéral.

Jusqu'alors, SDAG Wismut employait environ 600 000 mineurs et autres personnels. En 1990, près de 14 500 cas de silicose et 5 500 cas de cancer du poumon étaient reconnus comme maladies professionnelles en RDA (Koppisch & Otten, 2005). Toutefois, la disparition de SDAG Wismut n'a pas mis fin à ces maladies. La prise en charge des conséquences des maladies professionnelles a été transférée aux organismes d'assurance accidents du travail. Selon les informations communiquées par le gouvernement fédéral allemand le 27 juin 2019, en réponse à une enquête parlementaire menée par des députés et le groupe parlementaire des Verts concernant l'extraction d'uranium à Wismut et les maladies qui y sont liées, environ 4 200 cas ont été reconnus comme maladies professionnelles (BK 2402 « Maladies dues aux rayonnements ionisants ») entre 1991 et 2017, tandis qu'environ 7 100 ont été rejetés (Bundestag, 2019).

Les maladies secondaires typiques liées au travail dans les mines d'uranium comprennent le cancer du poumon, attribué à l'inhalation de radon dans les mines, et la fibrose pulmonaire, causée par l'effet combiné du radon et des poussières de minerai. En Allemagne, le cancer du poumon n'est reconnu comme maladie professionnelle sans autre expertise que si la dose pulmonaire, due à l'exposition au radon, dépasse 20 Sv. Jusqu'en 2021, l'Assurance sociale allemande contre les accidents du travail (BG) s'appuyait sur un avis d'expert établi en 1992 par le professeur Wolfgang Jacobi, physicien et membre de longue date de la DGUV, pour évaluer la relation dose-effet.⁸— ainsi qu'un membre de la CIPR (Jacobi I, 1992). L'auteur et ses collègues Henrichs et Barclay ont, à tort, inclus dans leur modèle, entre autres, une forte diminution du risque de cancer du poumon avec le temps après l'exposition. De ce fait, les mineurs tombés malades après la réunification allemande n'avaient pratiquement aucune chance d'obtenir une indemnisation (Schmitz-Feuerhake et Pflugbeil, 2008). En réalité, cependant, les périodes de latence du cancer du poumon radio-induit peuvent atteindre plusieurs décennies.

Concernant les cancers autres que les poumons, Jacobi a également émis un avis d'expert (Jacobi II, 1995). Selon lui, des doses aux organes extrêmement élevées sont nécessaires pour qu'une maladie soit reconnue comme maladie professionnelle, alors même que plusieurs cas de ce type sont bien documentés chez les mineurs d'uranium. Pour la fibrose pulmonaire, une dose pulmonaire d'au moins 12 Sv est requise ; l'origine de ce seuil élevé n'est pas scientifiquement justifiée (Schmitz-Feuerhake et Pflugbeil, 2010).

⁸La SSK est la Commission de radioprotection. Elle conseille le ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature, de la Sécurité nucléaire et de la Protection des consommateurs (BMUV) sur toutes les questions relatives à la protection contre les rayonnements ionisants et non ionisants.

Pour déterminer la présence de la maladie professionnelle BK 2402, la loi allemande sur les maladies professionnelles (BKV) exige la connaissance de la dose reçue par l'organe affecté dans chaque cas. Or, ces données n'étaient pas disponibles pour les employés de WISMUT. Avant 1971, il n'existait pas de dosimétrie sur site, donc aucune mesure de l'exposition aux rayonnements sur le lieu de travail n'était effectuée (Eigenwillig 2000). Afin de disposer d'une base pour l'évaluation des dommages, un projet de recherche a évalué rétrospectivement les conditions de travail et estimé les doses de rayonnement pour diverses activités chez WISMUT. Il en résulte une « Matrice d'exposition professionnelle (MEP) ». Cette matrice est conçue pour être utilisée lorsque certaines informations relatives à l'activité professionnelle et à l'exposition aux rayonnements sont disponibles. La MEP fournit une valeur d'exposition aux rayonnements qui s'applique à la moyenne du groupe d'employés concerné. En fonction de facteurs liés au travail et aux individus, l'exposition professionnelle aux rayonnements d'un employé peut s'écarter considérablement de la valeur de la MEP. Dans l'introduction du rapport final (Lehmann et al. 1998), les auteurs précisent ce qui suit :

Comme expliqué dans les sections relatives à la détermination de l'exposition externe aux rayonnements gamma et de l'exposition interne aux rayonnements due à l'inhalation de radon/produits de désintégration du radon et de radionucléides à longue durée de vie présents dans les particules, aucune dose individuelle exploitable n'est disponible pour les employés des mines souterraines et à ciel ouvert et des usines de traitement jusqu'en 1990. Les expositions pour la période pour laquelle les mesures font défaut doivent être estimées à l'aide de modèles. Les résultats de mesures de rayonnement existants ne sont disponibles que sous forme de mesures individuelles ou agrégées. De plus, les perturbations opérationnelles (par exemple, au niveau de la ventilation) n'ont pas été enregistrées et n'ont donc pas été prises en compte.**Par conséquent, une enquête sur les domaines de confiance est omise.**»⁹

Néanmoins, le résultat de cette procédure est considéré comme une valeur exacte pour chaque individu concerné et, malgré des marges d'erreur inconnues, il est utilisé par les organismes d'assurance responsabilité civile des employeurs comme dose de référence pour établir la probabilité de causalité. Il ne s'agit donc en aucun cas d'une reproduction individuelle de la situation radiologique, mais plutôt de valeurs moyennes déterminées pour de très vastes zones d'exploitation minière. Eigenwillig a montré que l'exposition aux rayonnements d'un travailleur de WISMUT peut différer de la valeur moyenne d'un facteur 10, voire plus, dans certains cas. Il a souligné que les mineurs consommaient également de l'eau radioactive de la mine jusque dans les années 1950 (Eigenwillig 2004 ; 2007). Cette voie d'exposition, non prise en compte par la dosimétrie officielle, a certainement entraîné une irradiation significative d'organes autres que les poumons. Or, les sous-estimations avérées et les erreurs d'interprétation n'ont pas été corrigées (Eigenwillig 2022).

Werner Martin¹⁰ On lui a diagnostiqué un cancer du poumon en 2006, à l'âge de 57 ans. De 1973 à 1991, à partir de l'âge de 24 ans, il a travaillé sous terre pour WISMUT, soit pendant 18 ans. Cependant, il n'était pas mineur, mais charpentier de mine, un fait pris en compte dans l'évaluation de l'exposition figurant dans le rapport Lehmann mentionné précédemment. L'exposition déterminée

⁹Souligné par les auteurs

¹⁰Nom modifié

Après conversion, la dose pulmonaire s'élève à 4,4 Sv. L'assurance sociale allemande contre les accidents du travail (BG) a déterminé une probabilité de 37 % de maladie radio-induite à l'aide du modèle de Jacobi I et a refusé la reconnaissance de cette affection comme maladie professionnelle (l'ordonnance allemande sur les maladies professionnelles (BKV) exigeant une probabilité supérieure à 50 %). Werner Martin a alors formé un recours, mais est décédé la même année. Sa veuve a intenté une action en pension de réversion devant le tribunal social, qui a débouté sa demande en 2008, en se référant au calcul de la BG, tout comme son appel devant la Cour sociale supérieure en 2013. Suite à ce nouveau recours, appuyé par des expertises de Pflugbeil et Schmitz-Feuerhake, la Cour sociale supérieure de Rhénanie-du-Nord-Westphalie s'est interrogée sur la validité actuelle du modèle de Jacobi I.

La veuve a soumis un rapport d'expertise à l'Office fédéral de radioprotection (BfS). Selon ce rapport, lors d'une audience publique en 2018, les juges étaient enclins à faire droit à sa demande. Ils ont vivement critiqué l'affirmation de l'association d'assurance responsabilité civile des employeurs (BG) selon laquelle le rapport d'expertise Jacobi I avait toujours été mis à jour pour refléter les dernières découvertes. Cependant, le représentant de la BG, défenderesse, a refusé de reconnaître ce rapport, invoquant l'écart considérable dans les arriérés de paiement. Le BfS avait indiqué qu'un nouveau programme (ProZES) serait bientôt disponible, permettant, sur la base des dernières découvertes, de calculer la probabilité de cancer causé par les rayonnements ionisants, et donc également pour les mineurs d'uranium, en fonction de la dose reçue par chaque organe (voir ci-dessous). La plaignante a été incitée à accepter un sursis à exécution jusqu'à la mise en service du nouveau programme. Elle a accepté. En 2019, treize ans après son mari, elle est décédée. Ce n'est qu'en 2021 que le BfS a rendu public le nouveau calcul relatif à la cause de l'irradiation. Cela aurait probablement permis à la veuve de percevoir une pension de survivant.

Le cas d'un autre employé de WISMUT est également connu. Il a développé un cancer du poumon tardivement – 25 ans après la fin de son travail à la mine (il y a travaillé pendant 8,6 ans au total), à l'âge de 51 ans. À ce moment-là, son risque de cancer du poumon, selon l'échelle de Jacobi I, n'avait diminué qu'à 40 % de sa valeur maximale. Malgré un début précoce à 16 ans et un âge jeune au moment de l'apparition de la maladie, l'assurance sociale allemande contre les accidents du travail (BG) a calculé la probabilité d'une exposition aux radiations comme cause du cancer chez ce travailleur de WISMUT à seulement 13 %. Ce faible taux est également lié au fait que cet individu travaillait comme métallurgiste et non comme mineur de charbon, ce qui, selon le rapport Lehmann, entraîne des réductions au titre de l'évaluation conjointe des accidents et des services médicaux d'urgence (JEM). Là encore, la BG a évoqué le programme ProZES, pourtant attendu, bien avant sa mise en place. En 2021, ce programme a conclu à une probabilité insuffisante d'une exposition aux radiations comme cause du cancer chez cet individu. Cette conclusion est basée sur le fait que ProZES pour le cancer du poumon causé par le radon utilise des données provenant de l'étude des mineurs d'uranium allemands (Ulanowski et al. 2020).

2.4 L'étude des mineurs d'uranium allemands

L'Office fédéral de radioprotection (BfS) souligne qu'il mène l'une des plus vastes études de cohorte au monde sur l'exposition professionnelle au radon chez les mineurs, impliquant 59 000 employés de WISMUT. Les résultats montrent que les mineurs d'uranium présentent des taux élevés de cancer du poumon.

- une affection connue depuis une centaine d'années (« maladie pulmonaire de Schneeberg ») et déjà confirmée par de nombreuses études internationales menées auprès de mineurs d'uranium. La détermination des relations dose-réponse dans l'étude allemande sur les mineurs d'uranium repose sur la matrice d'exposition professionnelle (MEP) de Lehmann. Des études collaboratives internationales sont menées pour déterminer les risques liés aux rayonnements.

Cependant, en ce qui concerne les maladies circulatoires chez les travailleurs du nucléaire, la cohorte allemande est classée à tort comme ayant une dose individuelle connue (Little et al. 2012 ; Rage et al. 2020).

La première analyse a porté sur la mortalité des employés de WISMUT entre 1946 et 1998 (Grosche et al., 2006). Selon le JEM, l'exposition moyenne au radon pour les mineurs de fond était de 332 WLM.¹¹ Cela correspond à une dose pulmonaire d'environ 33 Sv, et la durée moyenne d'emploi était de 11,3 ans. (À titre de comparaison : la limite d'exposition professionnelle aux rayonnements pulmonaires est de 0,15 Sv par an.) L'analyse dose-réponse a révélé un taux de cancer du poumon deux fois plus élevé chez les personnes exposées que chez les personnes non exposées (dose 0). Fait intéressant, la valeur témoin déterminée par extrapolation était supérieure au taux de mortalité par cancer du poumon dans la population de la RDA durant la période correspondante (Walsh et al., 2010). Cela signifie que les mineurs seraient intrinsèquement plus susceptibles au cancer que la population générale en raison de l'effet « travailleur en bonne santé ».¹² On s'attendrait à exactement le contraire, car seuls des hommes très robustes et en excellente santé auraient été aptes à ce travail exténuant. Ceci confirme les soupçons d'erreurs de dosimétrie.

Ce résultat épidémiologiquement contradictoire n'est pas abordé dans l'étude sur la mortalité par cancers autres que le cancer du poumon (Kreuzer et al., 2008). Cette étude a montré des augmentations statistiquement significatives, mais numériquement relativement faibles, pour le cancer de l'estomac (15 %) et le cancer du foie (26 %). Pour ce dernier, une consommation accrue d'alcool est suspectée d'être un facteur, mais aucune autre augmentation de la mortalité par cancer n'a été observée. Contrairement à d'autres études, l'étude allemande n'a initialement constaté aucune augmentation des maladies cardiovasculaires.

Walsh et al. (2011) concluent que le taux de mortalité par cancer du poumon plus élevé observé chez les employés non irradiés de WISMUT, comparativement à la population générale, est probablement dû à une consommation accrue de tabac. (Il est toutefois permis de douter que les travailleurs de WISMUT, qu'ils travaillent sous terre ou pendant leurs loisirs après un effort physique intense, aient fumé autant en 2 000 heures par an.) Ils n'évoquent pas la possibilité que les doses individuelles estimées soient inexactes.

Un autre problème avec l'étude sur les mineurs d'uranium allemands est qu'il s'agit d'une étude de mortalité. Une étude sur les maladies professionnelles ne s'intéresse pas à la probabilité de mourir de la maladie suite à une exposition aux radiations, mais plutôt à la probabilité de développer la maladie suite à cette exposition, c'est-à-dire la probabilité de...**maladie**Risque (incidence). Autrefois, on considérait que presque chaque cas de cancer bronchique était fatal. Grâce à l'amélioration du dépistage précoce et des traitements, ce n'est plus le cas. En 2013, on a enregistré en Allemagne 22 % de cas de cancers du poumon et de la trachée de plus par an que de décès (ZKD 2017). Cependant, ce constat ne permet pas d'effectuer une simple correction quantitative pour déterminer l'incidence après une exposition aux radiations, car le ratio mentionné est une moyenne calculée sur l'ensemble des groupes d'âge. Par ailleurs, on peut se demander comment un risque radiologique lié au radon dans les mines peut donner des résultats précis alors que les mineurs décèdent bien plus fréquemment de maladies pulmonaires obstructives que d'un cancer du poumon, comme ce fut le cas pour les employés de WISMUT.

¹¹WLM = Mois de niveau de travail : Unité d'exposition au radon gazeux dans l'air

¹²L'« effet travailleur en bonne santé » s'observe chez des individus sélectionnés pour leur santé – tels que les travailleurs ou les soldats – qui (sans exposition) présentent un taux de mortalité et un taux de cancer inférieurs à ceux de la population générale.

Malgré les limites fréquemment soulevées par les critiques, le BG s'est référé à l'étude des travailleurs allemands de l'uranium dans de nombreux cas WISMUT pour justifier un rejet au titre de l'invalidité professionnelle.

Au fil des années, les critères d'inclusion des mineurs dans l'étude ont été modifiés. En 2021, des résultats révisés ont été présentés, basés sur un sous-groupe de seulement 35 204 mineurs de fond ayant travaillé entre 1960 et 2013 (Kreuzer et al., 2021). Cette fois, la JEM est correctement qualifiée de dose « estimée », selon Lehmann. Comparés au taux de mortalité de la population masculine est-allemande, les chiffres suivants concernant la surmortalité par rapport à la population générale, et donc probablement liée au travail, ont été obtenus à partir de 18 510 décès :

Cancer du poumon (+ trachée)	1708	(9,2%)
Maladies respiratoires	891	(4,8%)
Cancers (hors cancer du poumon) ;	167	(0,9%)
maladies cérébrovasculaires somme	899	(4,9%)
	3665	(20%)

Le programme ProZES calcule la probabilité de cancer du poumon liée à la seule exposition au radon (ce qui n'est pas le cas dans les mines d'uranium), en se basant exclusivement sur les résultats d'une étude menée auprès de mineurs d'uranium allemands, et plus précisément sur un sous-groupe différent présentant des expositions et des débits de dose « faibles » (Kreuzer et al., 2015). La fourchette de valeurs s'étend jusqu'à 334 WLM, ce qui correspond à une dose pulmonaire de 33,4 Sv. Ainsi, le programme ProZES utilise à nouveau la mortalité comme base de calcul et ne tient pas compte des facteurs de confusion. Cependant, des révisions sont prévues, qui intégreront alors des études internationales (Ulanowski et al., 2020).

2.5 Conclusions

En sciences médicales, de nombreuses publications traitent des effets des rayonnements, des données épidémiologiques relatives aux faibles doses et de l'influence de la dose et du débit de dose, tant dans la réalité que dans les modèles mathématiques. Toutefois, les efforts concrets visant à améliorer la prévention et, en particulier, l'indemnisation financière des personnes exposées aux multiples préjudices subis restent insuffisants.

Selon le principe de l'endommagement stochastique, le nombre de maladies dépend de la dose collective (somme des doses individuelles). La législation allemande sur les maladies professionnelles ne reconnaît que certains cancers comme étant causés par les rayonnements. Comme ces cancers peuvent également survenir spontanément, le critère des 50 % mentionné précédemment s'applique, indiquant une « prépondérance de probabilité » d'une origine professionnelle. Cette situation a pour conséquence qu'une très grande proportion de cancers professionnels chez les salariés ne sont pas reconnus par la loi. En effet, les doses individuelles reçues par les personnes exposées en Allemagne sont généralement bien inférieures à la dose minimale requise pour la reconnaissance d'une maladie professionnelle radio-induite.

Kung. La plupart des maladies professionnelles surviennent dans les groupes à faibles doses, car c'est là que se trouve la grande majorité des employés. Ce problème fondamental est traité de manière quelque peu différente selon les pays industrialisés.

En Allemagne, pays qui abandonne progressivement l'énergie nucléaire, il faut s'attendre à ce que le « fonctionnement normal » des installations nucléaires fasse beaucoup plus de victimes.

3. Contamination environnementale

3.1 Cas groupés de leucémie dans les centrales nucléaires allemandes

L'utilisation dite pacifique de l'énergie nucléaire implique la manipulation de substances radioactives à très haute activité (mesurée en becquerels), de sorte que même les plus petites fuites dans les installations nucléaires peuvent avoir des conséquences sur la santé.

En 1995, des scientifiques de l'Université de Mayence ont présenté une étude sur les causes de la leucémie infantile en Basse-Saxe (Kaletsch et al., 1995), dont les résultats ont également été publiés à l'échelle internationale (Kaatsch et al., 1996). Leurs conclusions reposaient sur les données du Registre allemand des cancers de l'enfant (GCCR), actif à Mayence depuis 1980. Cette étude avait été motivée par la découverte de deux foyers importants de leucémie infantile dans les communes de Sittensen et d'Elbmarsch, en Basse-Saxe.

La leucémie est une conséquence connue de l'exposition aux radiations. Cette maladie est généralement rare, et particulièrement rare chez l'enfant et l'adolescent. Une caractéristique distinctive de la leucémie infantile est que, contrairement à la plupart des autres cancers radio-induits, elle apparaît souvent seulement quelques années après la radiothérapie.

Les marais de l'Elbe se situent à proximité immédiate de la centrale nucléaire de Krümmel, mise en service en 1984. De nombreuses études scientifiques, tant allemandes qu'internationales, ont documenté des regroupements de cas de leucémie à proximité d'installations nucléaires. Ces études sont souvent issues d'observations réalisées par des écologistes. À l'inverse, des chercheurs pronucléaires ont émis l'hypothèse de l'existence de nombreux regroupements locaux de leucémie observés dans le monde entier, sans cause identifiable.

Les résultats de l'étude menée en Basse-Saxe ont été présentés au client, le ministre des Affaires sociales de Basse-Saxe, dans le rapport correspondant, incluant le tableau 1. Les auteurs ont constaté des taux de leucémie significativement élevés dans seulement onze communes mentionnées dans le tableau 1, sur un total de 429 communes en Basse-Saxe, soit 2,6 %. Les taux les plus élevés, respectivement 7,7 et 7,4 fois supérieurs à la normale, ont été observés dans les communes d'Elbmarsch et de Sittensen.

Tableau 1 :Communes de Basse-Saxe présentant une incidence statistiquement accrue de leucémie aiguë chez les enfants entre 1984 et 1993, d'après l'étude de Basse-Saxe (Kaletsch et al., 1995)

Samtgemeinde	moyenne nombre annuel de cas ¹ Enfants	attendu	observé Nombre de cas	MONSIEUR ²	valeur p ³
Elbmarsch	1 341	0,6	54	7.7	0,0003
Sittensen	1 588	0,7	5	7.4	0,0007
Neu Wulmstorf	2 327	1.0	5	5.0	0,004
Dassel	1 748	0,7	4	5.5	0,007
Mauvais Pyrmont	2 468	1.0	4	3.9	0,021
position	1 433	0,6	3	4.8	0,025
Braunlage	702	0,3	2	6.7	0,036
Northeim	4 369	1.8	5	2.7	0,038
Wietmarschen	1 854	0,8	3	3.8	0,045
Langenhagen	6 077	2.6	6	2.3	0,048
Duingen	829	0,4	2	5.2	0,049

¹standardisé selon l'âge

²Ratio d'incidence standardisé : incidence observée divisée par l'incidence attendue

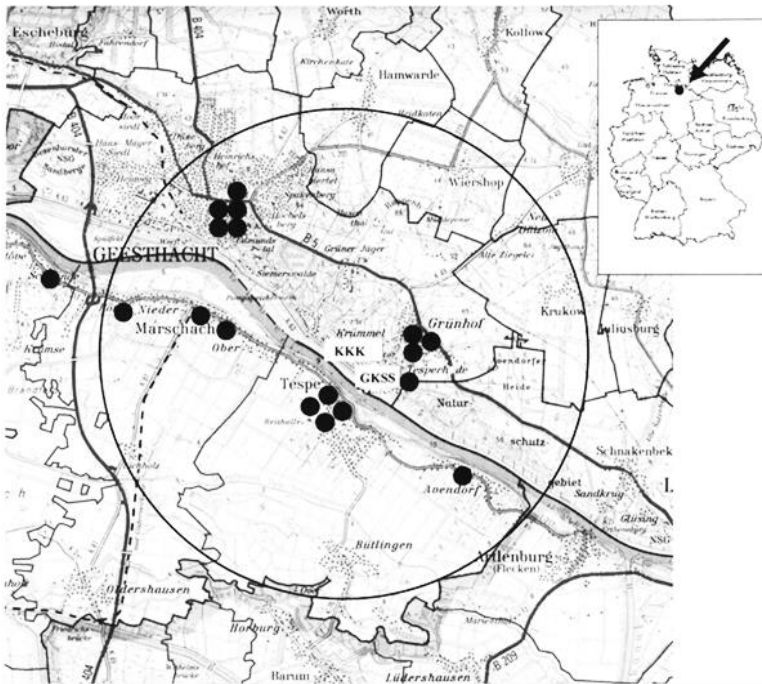
³basé sur la distribution de Poisson

⁴Parmi ces patients, un a déménagé avant d'être diagnostiqué. Les regroupements en gris sont situés à proximité de centrales nucléaires.

Un point commun des cas de Sittensen était que des radiographies fréquentes et inappropriées avaient été prises dans un cabinet orthopédique avant la maladie et avaient été identifiées plus tard comme la cause (Schmitz-Feuerhake et al. 2002 ; 2007).

Greiser et Hoffmann, dans une critique de l'étude de Basse-Saxe, ont souligné qu'un autre aspect suspecté de l'exposition aux rayonnements n'avait pas été correctement pris en compte : à savoir, l'exposition des parents aux rayonnements comme facteur de risque en termes d'effet génétique et/ou tératogène (voir la leucémie à l'usine de retraitement du combustible nucléaire de Sellafield, chapitre 3.5). L'étude de Basse-Saxe indique dans le chapitre « Exposition des parents aux rayonnements avant ou pendant la grossesse » : « Il est à noter que dans les études sur l'exposition maternelle aux rayonnements (exposition professionnelle et non professionnelle avant ou pendant la grossesse), les rapports de cotes comparant les enfants malades aux groupes témoins correspondants sont...

L'une des conclusions surprenantes de l'étude menée en Basse-Saxe est que sept des onze communes regroupées dans le tableau 1 étaient situées à proximité de centrales nucléaires.¹³ La commune de Wietmarschen se situe à proximité immédiate de la centrale nucléaire de Lingen. Bad Pyrmont, Duingen, Dassel, Neu Wulmstorf et Stelle sont chacune à moins de 20 km des centrales nucléaires de Grohnde, Würgassen, Stade et Krümmel (KKK).



Ont également été enregistrés : 1 cas en 2004 « légèrement en dehors du district », 1 cas chez un jeune (21 ans, 1991), 1 cas d'anémie aplasique chez un enfant en 1989 (maladie sanguine radio-induite). (BI contre la leucémie Elbmarsch 2006)

¹⁴Société pour l'utilisation de l'énergie nucléaire dans la construction navale et le transport maritime

Le foyer d'Elbmarsch est unique en ce sens que les cinq premiers des seize cas de leucémie survenus après la mise en service de la centrale nucléaire d'Elbmarsch (KKK) en 1984 sont apparus presque subitement en 1990-1991 (Initiative citoyenne contre la leucémie d'Elbmarsch, 2006). Ceci a immédiatement suscité des soupçons quant à une fuite accidentelle survenue quelques années auparavant. En 1992, Günther Jansen (SPD), alors ministre des Affaires sociales du Schleswig-Holstein (mandat de courte durée), a nommé une commission d'enquête sur la leucémie. Cette commission était composée en majorité de scientifiques critiques du nucléaire et d'un membre votant de l'Initiative citoyenne contre la leucémie d'Elbmarsch. En 2004, la commission a conclu à un lien avéré avec des émissions radioactives non autorisées (Wassermann et al., 2004). Selon les recherches de la commission, un accident nucléaire s'est produit à la centrale nucléaire d'Elbmarsch le 12 septembre 1986, mais cet accident n'a été signalé ni par les autorités ni par les exploitants. Cette datation repose sur des données de surveillance environnementale (Schmitz-Feuerhake et al., 2005) et sur la détection d'une contamination par des émetteurs alpha sur le site de KKK précisément ce jour-là. L'autorité de sûreté nucléaire de Kiel a avancé l'hypothèse d'une accumulation de radon naturel (produit de désintégration gazeux de l'uranium). Or, cette hypothèse est géographiquement et physiquement impossible et n'a pu être vérifiée par des mesures. (La commission susmentionnée n'était pas habilitée à donner des directives à l'autorité de sûreté nucléaire du Schleswig-Holstein.)

Contrairement à ce qui avait été affirmé, il n'y avait pas non plus de conditions météorologiques d'inversion ce jour-là. Le groupe de travail ARGE PhAM¹⁵ Des prélèvements effectués dans les environs ont révélé une contamination par du combustible nucléaire, permettant de reconstituer des expériences menées avec des matières fissiles contenant du thorium provenant du GKSS (Wassermann et al., 2004). Des isotopes de plutonium ont été détectés dans des échantillons de poussières prélevés sur les toits des marais de l'Elbe (Schmitz-Feuerhake et al., 2003). L'autorité de sûreté nucléaire a affirmé que tous ces dérivés nucléaires étaient des vestiges d'anciens essais d'armes nucléaires atmosphériques menés dans le monde ou qu'ils étaient dus à l'accident de Tchernobyl de 1986 (comme l'élément transurannique amérium-241). L'autorité de sûreté nucléaire prévoyait de comparer les mesures effectuées sur les poussières prélevées sur les toits des marais de l'Elbe avec des échantillons provenant d'une zone témoin éloignée. L'objectif était de démontrer que la contamination détectée dans les marais de l'Elbe était conforme à la normale. Certains des échantillons de comparaison ont présenté une teneur en plutonium et une distribution isotopique du plutonium identiques à celles des échantillons prélevés dans les marais de l'Elbe. Cependant, cela n'est pas possible étant donné les différentes origines de la radioactivité et ses différents toits (dans la poussière avec du mortier, des copeaux, des fientes de pigeons, etc.) (Dieckmann et al. 2000 ; Schmitz-Feuerhake 2006).

La dosimétrie biologique des membres des familles touchées a confirmé une exposition accrue aux rayonnements au sein de la population. Des échantillons de sang prélevés chez 21 adultes et 5 enfants ont révélé des taux élevés de chromosomes dicentriques, qui constituent un indicateur fiable de l'exposition aux rayonnements ionisants (Dannheim 1996 ; Schmitz-Feuerhake et al. 1997 ; Hoffmann & Schmitz-Feuerhake 1999).

¹⁵Groupe de travail sur l'analyse physique et les technologies de mesure, Prof. Dr. R. Brandt, Dipl.-Ing. HW Gabriel (directeur général), Dr. D. Schalch, Prof. Dr. Dr. hc A. Scharmann, Giessen

Il est probable que la KKK (Kieler Kraftwerke AG) ait également contribué à la contamination environnementale observée. Ce n'est que tardivement, grâce à un examen partiel des rapports mensuels de la KKK, que l'on a découvert que la cuve du réacteur fuyait et perdait de l'eau de refroidissement en fonctionnement depuis début 1984. (Dans un réacteur à eau bouillante, les barres de contrôle sont insérées dans le cœur du réacteur par le bas.) En 1986, 950 mètres cubes d'eau chaude du réacteur se sont échappés (Schmitz-Feuerhake 2001). Cette eau est hautement radioactive car elle entoure les éléments combustibles et a dû contaminer le bâtiment du réacteur ou s'en échapper sous forme de vapeur chaude.

Ces faits ont été ignorés par les responsables. L'autorité de régulation a affirmé que les militants antinucléaires étaient incapables de fournir des évaluations objectives. Les rapports finaux respectifs des gouvernements des États ont conclu qu'aucune preuve n'avait été trouvée pour expliquer l'épidémie de leucémie.

En 1992 (étude sur les centrales nucléaires I pour l'Allemagne de l'Ouest) et en 1997 (étude sur les centrales nucléaires II pour l'Allemagne réunifiée), des études écologiques ont été publiées. Après analyse du registre allemand des cancers infantiles de Mayence, ces études ont donné des résultats statistiquement non significatifs à proximité des centrales nucléaires. Les responsables politiques ont alors déclaré qu'il était désormais définitivement établi que les centrales nucléaires ne causaient pas de maladies. D'autres études ont été jugées superflues. Cependant, l'étude sur les centrales nucléaires I indiquait que les nourrissons vivant à proximité immédiate des centrales présentaient une incidence plus élevée de leucémie. Ce résultat a été considéré comme une coïncidence dans l'évaluation globale. Grâce à la persévérance d'Alfred Körblein, dont les travaux portaient exclusivement sur l'emplacement des centrales nucléaires, l'étude a finalement été discréditée.**en fonctionnement** notamment les centrales nucléaires, qui ont montré une augmentation significative du taux de cancers et de leucémies chez les jeunes enfants vivant à proximité (Körblein & Hoffmann 1999), et grâce à la pression constante de l'IPPNW¹⁶ L'Office fédéral de radioprotection (BfS) a quant à lui chargé l'institut de Mayence de réaliser une étude épidémiologique concernant toutes les centrales nucléaires de la République fédérale d'Allemagne.

Dans ce soi-disant KiKK¹⁷ Cette étude cas-témoins écologique compare des enfants sains (« témoins ») et des enfants malades (« cas ») vivant à proximité des 16 centrales nucléaires allemandes, soit un total de 22 réacteurs. L'étude a inclus 1 592 enfants atteints de cancer et 4 735 enfants non atteints. La période d'étude s'étend de 1980 à 2003. La question de recherche et le protocole de l'étude ont été définis par un groupe d'experts interdisciplinaire. Les résultats de l'étude KiKK ont été publiés en décembre 2007 (Kaatsch et al., 2007 ; Spix et al., 2007). Ils portaient sur 77 enfants de moins de 5 ans ayant reçu un diagnostic de cancer et vivant dans un rayon de 5 km autour des centrales. L'étude a révélé une augmentation de 60 % du taux de cancer et une augmentation significative de 118 % du taux de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans vivant dans ce rayon. Le risque de cancers et de leucémies chez les jeunes enfants est lié à la distance : dans un rayon de 15 km, ce risque augmente avec la proximité de la centrale nucléaire. Cet effet significatif persiste même en excluant les données de la centrale nucléaire de Krümmel (Jöckel et al., 2008).

¹⁶(IPPNW = Médecins internationaux pour la prévention de la guerre nucléaire) ; Section allemande des Médecins internationaux pour la prévention de la guerre nucléaire, Médecins en responsabilité sociale e.V.

¹⁷Cancers infantiles à proximité des centrales nucléaires

Les auteurs de l'étude, ainsi que la Commission allemande de protection radiologique (SSK), ont par la suite affirmé que les radiations ne pouvaient être la cause de l'accident, la dose étant plus de 1 000 fois trop faible. Or, cette dose ne peut être mesurée directement ; elle est déterminée par un modèle de calcul intégrant de nombreux paramètres relatifs à la dispersion météorologique de la radioactivité, son comportement dans l'environnement et les voies d'absorption par l'organisme. Les incertitudes de ces modèles de dispersion, et par conséquent celles des expositions externes spatialement et temporellement réparties, ainsi que celles des modèles métaboliques utilisés pour déterminer la distribution de la radioactivité dans l'organisme, demeurent inconnues (Stevenson, 2001). De plus, seules les émissions moyennes de la centrale nucléaire sont prises en compte, et non les valeurs de pointe observées lors des changements d'éléments combustibles.

Malgré toutes les preuves, par exemple dans le groupe d'incidents d'Elbmarsch, concernant les similitudes avec les caractéristiques typiques des effets des radiations telles que les périodes de latence observées après l'accident, la sensibilité particulière des très jeunes enfants, les risques plus élevés pour les garçons par rapport aux filles, ainsi que la composition des maladies survenues, l'évaluation officielle a une fois de plus conclu que le phénomène restait inexpliqué et que des causes inconnues, voire le hasard, ne pouvaient être exclus.

En 2008, le German Medical Journal a publié une autre étude d'incidence, réalisée par les auteurs de l'étude KiKK et intitulée « Leucémie chez les enfants de moins de 5 ans à proximité des centrales nucléaires allemandes » (Kaatsch et al., 2008), afin d'étayer l'évaluation officielle. Cette étude écologique a conclu à une augmentation non significative de l'incidence de la leucémie infantile de 41 % ($SIR = 1,41$) dans un rayon de 0 à 5 km autour des centrales nucléaires. Cependant, cette étude n'est pas comparable à l'étude KiKK, qui était une étude cas-témoins, car certaines caractéristiques, telles que la taille de la zone d'étude (communes dont le centre se situe dans un rayon de 5 km autour des centrales nucléaires), diffèrent. Cette publication est très inhabituelle car elle relativise rétrospectivement les résultats de l'étude cas-témoins, plus concluante, publiée précédemment par le même groupe, en utilisant une méthodologie écologique moins concluante. Néanmoins, cette étude se prête à la comparaison avec des recherches ultérieures menées dans trois autres pays industrialisés européens (voir chapitre 3.2).

3.2 Étude menée dans quatre pays sur la leucémie infantile précoce dans les centrales nucléaires

Suite à la publication de l'étude KiKK, des enquêtes épidémiologiques sur la survenue de leucémies chez les jeunes enfants (moins de 5 ans) à proximité des centrales nucléaires ont été menées en Grande-Bretagne, en Suisse et en France, y compris des études réalisées dans un rayon de 5 km (Stather 2011 ; Spycher et al. 2011 ; Sermage-Faure et al. 2012). Toutes ces études ont mis en évidence une augmentation de l'incidence, mais celle-ci n'était pas statistiquement significative. Körblein et Fairlie ont ensuite réalisé une méta-analyse en collaboration avec l'étude allemande sur la distance menée par Kaatsch et al. (2008) (Körblein & Fairlie 2012). En raison du nombre plus élevé de cas, une augmentation significative du risque de 44 % a été observée à proximité immédiate des centrales par rapport à une distance supérieure à 5 km. Les données correspondantes sont présentées dans le tableau 2.

Le SIR (taux d'incidence standardisé) du tableau 2 correspond au rapport entre le nombre de cas observés (O) et le nombre de cas attendus (E). Le risque relatif (RR) est le rapport entre le SIR dans un rayon de 5 km et le SIR dans le reste de la zone d'étude. Les résultats obtenus dans les quatre pays présentent une concordance remarquable. La somme des données des quatre pays révèle une augmentation statistiquement significative du SIR de 1,37 (IC à 95 % : 1,09–1,71) et un risque relatif de RR = 1,44 (p = 0,0034).

Tableau 2: *Risque relatif de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans vivant à proximité de centrales nucléaires (lignes grises) : O (nombre de cas observés), E (nombre de cas attendus), SIR = O/E*

pays	Zone	O	E	MONSIEUR	95 % IA*	RR	valeur p**
Allemagne (D) 1980-2003	0-5 km	34	24.1	1.41	(0,98-1,97)	1,45	0,0578
	5-30 km	417	427.1	0,98			
Grande-Bretagne (GB) 1969-2004	0-5 km	20	15.4	1.30	(0,79-2,01)	1,39	0,1965
	5-25 km	394	421.4	0,94			
Suisse (CH) 1985-2009	0-5 km	11	7.9	1,40	(0,70-2,50)	1,46	0,3335
	5-15 km	54	56.4	0,96			
France (F) 2002-2007	0-5 km	14	10.2	1,37	(0,75-2,30)	1,48	0,2251
	5-20 km	117	126.2	0,93			
D+GB+CH+F	0-5 km	79	57,6	1,37	(1,09-1,71)	1,44	0,0034
	> 5 km	982	1031	0,95			

* Intervalle de confiance de l'IA

** Valeur p, calculée à l'aide de la distribution binomiale

La figure 2 représente les données des SIR obtenus dans les quatre pays en fonction de la distance à la centrale nucléaire. Les lignes continues correspondent aux résultats des régressions utilisant un modèle linéaire (ligne noire fine) et un modèle linéaire-quadratique (ligne grise épaisse). Ce dernier modèle permet un meilleur ajustement aux données qu'une relation linéaire avec l'inverse de la distance. Tous les SIR du tableau 2, à plus de 5 km de la centrale, sont inférieurs à 1,00, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les taux de leucémie sont plus faibles en milieu rural qu'en milieu urbain.

L'étude française suggérait une incidence accrue de leucémie et préconisait des recherches sur les facteurs de risque potentiels à proximité des centrales nucléaires, ainsi qu'une analyse exhaustive des données disponibles issues des nombreuses études locales menées dans différents pays. Körblein et Fairlie ont entrepris cette dernière tâche et ont confirmé l'existence d'un risque accru de leucémie aux abords des centrales nucléaires.

Dans l'étude KiKK, une étude cas-témoins, aucun facteur de risque autre que la distance à la centrale nucléaire n'a été identifié. Les auteurs ont exclu une infection conformément à l'hypothèse de Kinlen (voir chapitre 3.5) (Spix et al., 2007). Par conséquent, la conclusion est que le phénomène est lié à la présence de la centrale nucléaire.

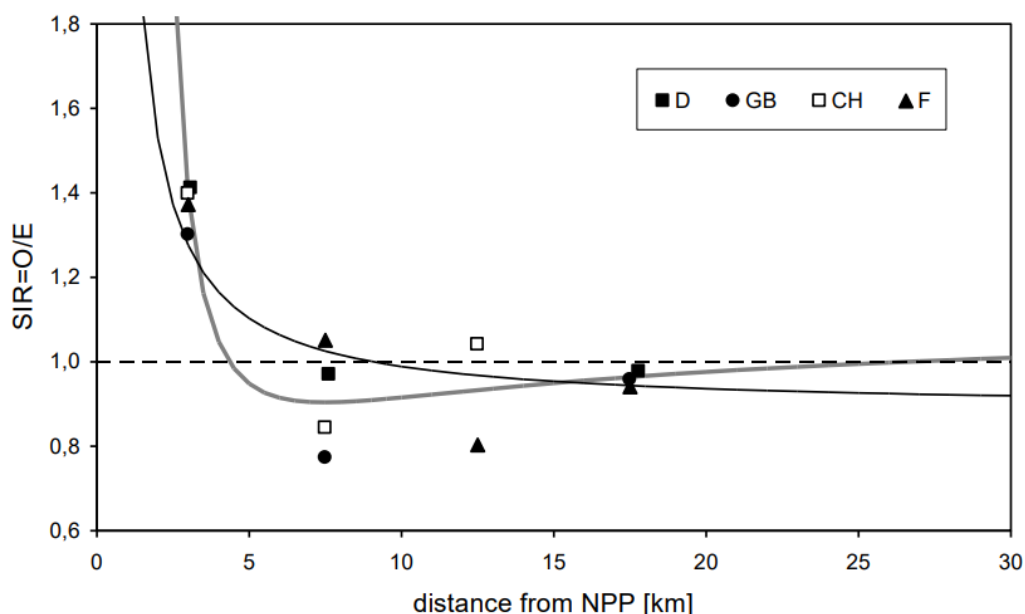


Figure 2 Risque de leucémie (taux d'incidence standardisé SIR) chez les jeunes enfants vivant à proximité des centrales nucléaires en Allemagne (D), en Grande-Bretagne (GB), en Suisse (CH) et en France (F) en fonction de la distance à la centrale nucléaire (d'après Koerblein & Fairlie 2012)

3.3 Autres risques sanitaires à proximité des installations nucléaires allemandes

Cependant, même en dehors de la période couverte par l'étude KiKK, et dans d'autres installations nucléaires d'Allemagne de l'Ouest, des problèmes de santé ont été constatés à proximité, ainsi que dans des installations nucléaires d'Allemagne de l'Est. Ces problèmes touchaient principalement les enfants (tableau 3). Le foyer d'Elbmarsch a été repéré et signalé par un pédiatre local, mais les autorités compétentes se sont d'abord montrées réticentes à enquêter sur le phénomène. Le directeur du service de santé publique de Lüneburg a fait exception : il a mené l'enquête dans la limite de ses moyens, non sans avoir reçu plusieurs avertissements de sa hiérarchie. Les enquêtes ultérieures, décrites ci-dessous, reposent également sur les observations de médecins locaux ou de citoyens vigilants.

Tableau 3 Risques accrus pour la santé dans les centrales nucléaires en Allemagne, à l'exception des études d'Elbmarsch et de KiKK

#	Installations et emplacement	Examiné Maladies	Examiné Groupe d'âge	Résultats
1	Centrale nucléaire de Lingen/Ems, adjacente au quartier de Bentheim, 1969/1970 (Stein 1988)	A) Leucémie B) Mortalité infantile lichkeit	0-14 0-1	A) 8 cas en 1970 ; SMR 3,5 ; $p < 0,01$ B) a augmenté avec un pic en 1969
2	Bavière 1976-1981 3 centrales nucléaires ; 1 réacteur expérimental ; 2 réacteurs de recherche (Grosche et al. 1987a ; b)	Incidence de la leucémie	0-14 15-39	Augmentations autour des réacteurs de recherche de Garching et de Neuherberg (voir texte).
3	Centrale nucléaire de Würgassen/NRW 1971-1987 (Demuth 1989 ; Hoffmann 1996)	A) Leucémie B) Tous les patients atteints de cancer kungen	0-14 0-19	Le nombre de cas de leucémie dans un rayon de 15 à 20 km est 3 à 4 fois plus élevé.
4	installations nucléaires est-allemandes 1961-1988 6 centrales nucléaires ; 1 réacteur de recherche (Möhner & Stabenow 1993)	A) Incidence de tous les Cancer B) Leucémie	0-14	A) Augmentation d'un facteur 1,48 (total des installations) dans un rayon de 10 km. B) Doublement près de Rossendorf.
5	Traitement du minerai d'uranium Ellweiler (Rhénanie-Palatinat) 1970-1989 (Hoffmann 1993 ; Hoffmann et al. 1993)	leucémie	A) 0-14 B) 0-20	Augmentation dans un rayon de 5 km A) SIR 1,8 ; $p=0,034$ (5 cas) B) SIR 2,3 ; $p=0,009$ (7 cas)
6	Centrales nucléaires en Allemagne et en Suisse entre 1975 et 2005 (Kusmierz et al. 2010)	perte de femelles progéniture	nouveau-nés	Mesurable par le rapport hommes/femmes ; ici, une augmentation significative du rapport hommes/femmes.
7	Centrale nucléaire de Grafenrheinfeld et autres centrales nucléaires bavaroises 1968-1991 (Kafka 1985 ; Körblein 2008)	Malformations	nouveau-nés	Accident de la centrale nucléaire de Gundremmingen (unité A) en 1977 ; mesures de radioactivité près de Grafenrheinfeld
8	Centrales nucléaires de Philippsburg et Biblis 2006-2008 (Queisser-Luft et al. 2010 ; Körblein 2010)	Malformations	nouveau-nés	Augmente dans un rayon de 10 km
9	Installation de recherche nucléaire de Jülich, projet de réacteur à lit de boulets 1967-1988 ; Fuites (Kuni 1998)	leucémie	A) 0-14 B) 0-20	1990-1992 dans les municipalités voisines Niederzier A) $RR^*=26,3$ B) $RR = 33,4$ Huchem-Stammeln A) $RR=17,4$ B) $RR=19,9$
10	Réacteur à haute température THTR Hamm-Uentrop/NRW (Seithe 2012 ; Registre du cancer NRW 2013)	cancer de la thyroïde leucémie	tous	Fuites en 1986 ; augmentation Nombre de cas de cancer durant la période 2008-2010

*) RR risque relatif : rapport entre le nombre de cas observés et le nombre de cas attendus

Les études 1 à 4 du tableau 3 ont déjà été commentées et évaluées épidémiologiquement dans un article de synthèse de Hoffmann sur les clusters de leucémie en Allemagne.

(1996). La première étude portait sur le réacteur à eau bouillante de 268 MW de Lingen, sur l'Ems, approuvé en 1968 et exploité jusqu'en 1977. Il devint rapidement la cible de manifestations antinucléaires (Kater 1978) en raison de ses émissions radioactives parmi les plus élevées des centrales nucléaires allemandes. En réaction, le ministère des Affaires sociales de Basse-Saxe publia les résultats d'une enquête menée en 1980 dans tous les districts de Basse-Saxe sur la mortalité globale par cancer et la mortalité due aux maladies malignes du système hématopoïétique, notamment la leucémie. Une comparaison générale entre les districts avec et sans centrale nucléaire pour la période 1968-1977 ne révéla aucune différence significative. Cependant, la principale critique formulée à l'encontre de cette étude portait sur une classification erronée des régions étudiées : les districts étaient considérés comme « exposés » uniquement en fonction de leur distance à la centrale nucléaire, sans tenir compte de la date de déclenchement de la criticité initiale de celle-ci (Stein 1988). Par exemple, la centrale nucléaire de Würgassen (arrondissements de Northeim et Holzminden)¹⁸ et Brunsbüttel (districts de Cuxhaven, Stade, Harburg) ne sont entrés en service qu'en 1972, la centrale nucléaire d'Unterweser encore plus tard, en 1978.**après** la période d'enquête.

Stein (1988) s'est intéressé à la centrale nucléaire de Lingen, mais a choisi des paramètres plus pertinents en utilisant les données officielles sur la mortalité infantile par cancer, la mortalité infantile et la mortinatalité pour une étude géographique, et en les comparant en fonction de la durée et de la proximité de la centrale. Dans l'un des deux districts les plus proches du réacteur (Bentheim), un seul enfant de moins de 15 ans est décédé d'une leucémie en 1968 et 1969. En 1970, huit cas ont été enregistrés (voir tableau 2). Trois des enfants décédés avaient moins d'un an (taux de mortalité standardisé : 0,4).¹⁹ $p=7$, $p<0,01$). Le SMR pour le cancer infantile dans l'ensemble du deuxième district (Emsland) n'a pas augmenté de manière significative : au cours de la période 1968-1969, le SMR était de 1,26 (IC à 95 % 0,69 ; 2,14), au cours de la période 1970-1973, le SMR était de 1,10 (IC à 95 % 0,60 ; 1,64).

Un effet similaire a été observé pour la mortalité infantile. Dans le district de Bentheim, les taux étaient inférieurs à la moyenne ouest-allemande avant 1970, mais nettement supérieurs entre 1970 et 1979. Dans le district d'Emsland, les taux étaient généralement supérieurs à ceux de l'Allemagne de l'Ouest avant 1968 et ne se sont stabilisés qu'à partir de 1978. Les taux de mortinatalité ont atteint un pic dans les deux districts en 1969, avant de diminuer significativement les années suivantes et de retomber à des niveaux comparables à ceux de l'Allemagne de l'Ouest entre 1978 et 1979.

Hoffmann (1996) a illustré les données du district de Bentheim dans la figure 3.

Malheureusement, l'analyse de Stein concernant la distance précise entre les cas et la source d'émission n'était pas concluante, car elle se limitait à l'échelle du district. Les cas auraient pu se produire jusqu'à 100 km de distance. L'auteur discute ses résultats en ce qui concerne la distribution temporelle des émissions. Celles-ci étaient les plus élevées durant toute la période d'exploitation, en 1969/1970.

L'étude numéro 2 (tableau 3) a été menée dans le cadre des débats relatifs aux effets potentiels à Lingen. Le ministère bavarois du Développement régional et des Affaires environnementales avait commandé cette étude en 1981.

¹⁸La ville de Würgassen est située en Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

¹⁹Taux de mortalité standardisé (SMR) : rapport des taux de mortalité standardisés selon l'âge du groupe d'étude et du groupe témoin

Une étude d'incidence géographique a été commandée afin d'examiner tous les cas de leucémie en Bavière (Grosche et al., 1987a). En l'absence de registre du cancer, il a fallu recenser au préalable tous les cas, enfants et adultes confondus. Pour des raisons de protection des données, seuls le lieu et l'année de naissance, le sexe et le lieu de résidence ont été enregistrés, ainsi que la date du diagnostic initial de leucémie, la classification cytologique/histologique, le nombre de rechutes et le stade actuel de la maladie. Toutefois, les résultats étaient incomplets, comme l'a révélé une comparaison avec une étude de mortalité antérieure (Hoffmann, 1996). Un recueil de données quasi complet n'a été obtenu que pour les leucémies aiguës chez les personnes de moins de 40 ans.

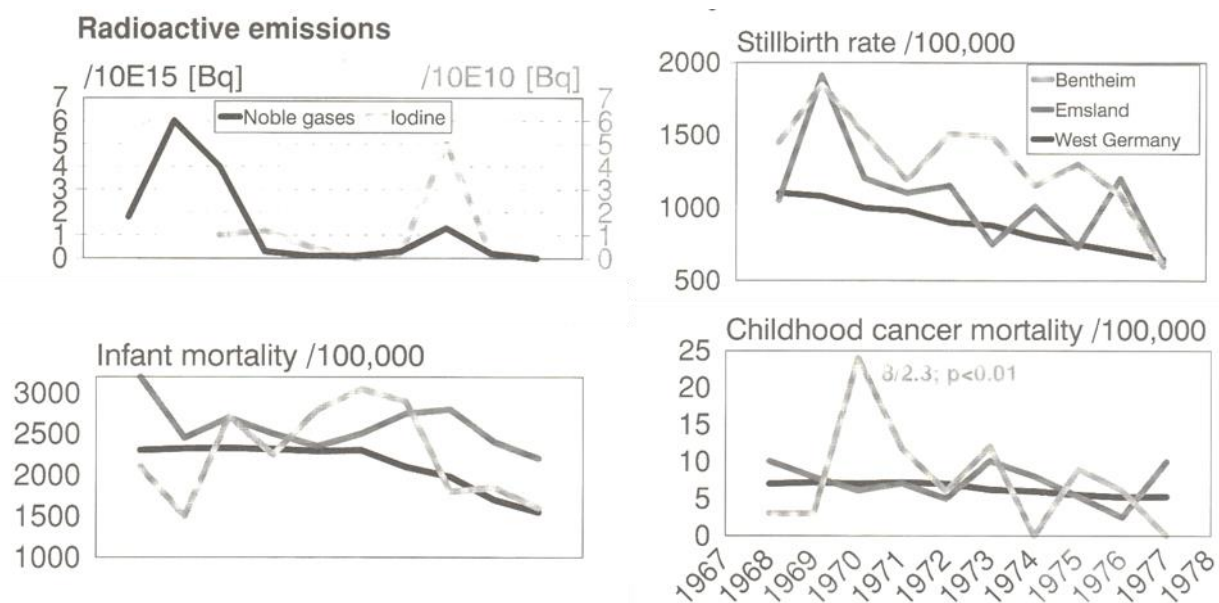


Figure 3 Évolution du taux de mortalité (en haut à droite), de la mortalité infantile (en bas à gauche) et de la mortalité par cancer chez l'enfant (en bas à droite) dans le district de Bentheim après la mise en service de la centrale nucléaire de Lingener en 1968 (d'après Hoffmann 1996)

L'incidence de l'exposition aux rayonnements nucléaires à proximité des six réacteurs nucléaires alors en exploitation en Bavière (Kahl (Main), Gundremmingen, Isar I, le réacteur expérimental de Niederaichbach et les réacteurs de recherche de Garching et Neuherberg près de Munich) a ensuite été étudiée. Des zones témoins ont été sélectionnées en fonction de l'utilisation comparable des sols industriels et agricoles. Trois zones géographiques autour des centrales ont été définies comme zones d'« exposition » : 1) la commune où se situe le réacteur, 2) toutes les communes dont au moins un tiers de la superficie se trouve dans un rayon de 5 km autour du réacteur, et 3) toutes les communes dont au moins un tiers de la superficie se trouve dans un rayon de 10 km autour du réacteur (à l'exclusion des communes incluses au point 2). Les taux d'incidence standardisés (TIS) ont été calculés séparément pour les deux sexes et pour les groupes d'âge 0-14 ans et 15-39 ans.

En conséquence, les valeurs SIR pour l'ensemble des réacteurs de puissance et de recherche n'ont pas présenté de différences significatives entre les zones d'étude et de contrôle. Des augmentations ont été observées.

Cependant, des taux élevés ont été observés à proximité des deux réacteurs de recherche. Dans un rayon de 5 km autour du réacteur de Garching, le taux d'incidence standardisé (TIS) de la leucémie aiguë chez les garçons de moins de 15 ans était de 7,83 ($p < 0,05$). Dans un rayon de 10 km autour du réacteur de Neuherberg, un taux d'incidence de la leucémie aiguë chez les garçons de moins de 15 ans, légèrement supérieur à la limite de la significativité statistique, a été observé (TIS 1,56 ; $p < 0,06$), sur la base de 23 cas. Ces deux observations ne sont pas indépendantes, car les zones concernées se chevauchent largement. L'augmentation de près de huit fois du nombre de cas chez les garçons était attribuable à la proximité immédiate du réacteur de Garching. Cette installation de 4 MW était en service depuis 1957. Malgré son inventaire radioactif relativement faible, sa contribution à la contamination environnementale mesurable était, selon les données officielles, la plus élevée parmi les installations durant la période 1974-1980 (Grosche et al., 1987b).

Le réacteur à eau bouillante de Würgassen (étude n° 3, tableau 3) est situé à environ 30 km au nord de Kassel, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, près des frontières de la Basse-Saxe et de la Hesse. D'une capacité de 640 MW, il a fonctionné de 1971 à 1996 et a donc été inclus dans l'étude allemande KiKK (période d'étude : 1980-2003). La prise en charge antérieure des cas de leucémie sur ce site est également digne d'intérêt pour notre sujet. Début 1987, un groupe de citoyens a signalé une augmentation des cas de leucémie chez les enfants et les adolescents de la région. Le pédiatre local, le Dr Demuth, a alors entrepris de recenser systématiquement ces cas et a pu par la suite comparer ses données, concernant des patients jusqu'à l'âge de 14 ans, avec les registres du Registre allemand des cancers de l'enfant (GCCR) de Mayence. Ceci a permis d'établir des valeurs de référence pour l'ensemble de l'Allemagne de l'Ouest. Demuth a constaté une augmentation des taux de leucémie dans un rayon de 20 km autour du réacteur, et ce, pour les deux groupes d'âge. Il a autopublié ses résultats en février 1988. Suite à certaines critiques concernant ses conclusions statistiques, il a rédigé un rapport révisé (Demuth 1989) et présenté ses résultats lors d'un symposium scientifique (Demuth 1990). Afin de faciliter la comparaison avec d'autres études, Hoffmann a réanalysé ses données en considérant des zones plus restreintes autour du réacteur (0-10, 10-15, 15-20, 20-25 km) et en appliquant cumulativement les groupes d'âge (0-14 ans, 0-19 ans). Dans la zone située entre 15 et 20 km du réacteur, il a obtenu des augmentations significatives, d'un facteur 3,05 ($p = 0,036$) chez les enfants et d'un facteur 3,90 chez les patients de moins de 20 ans (Hoffmann 1996). Demuth a attribué l'incidence accrue de la maladie à une distance relativement grande de la source à la cheminée d'échappement très haute (70 m) et aux conditions de vent à cet endroit.

En 1993, G. Prindull, directeur de l'hôpital universitaire pour enfants de Göttingen, en collaboration avec Demuth et un autre collègue, a publié les résultats d'une méta-analyse de tous les cancers infantiles survenus dans un rayon de 25 km autour de la centrale nucléaire de Würgassen entre 1980 et 1988. Deux types de groupes témoins ont été sélectionnés : a) les données du GCCR (Centre de recherche sur les réacteurs de Graz-Köflach) et b) une région autour de Großalmerode, présentant des conditions identiques à celles de la zone d'étude, notamment en ce qui concerne les hôpitaux et les centres de traitement. Les cas de leucémie n'ayant été considérés qu'en association avec d'autres hémopathies malignes, telles que les lymphomes de Hodgkin et les lymphomes non hodgkiniens (42 cas observés), l'augmentation constatée par Demuth dans un rayon de 15 à 20 km n'a pas été observée. Le lymphome de Hodgkin est ici considéré comme un lymphome non hodgkinien.

Les lymphomes non hodgkiniens radio-induits et induits par les radiations présentent, en moyenne, des périodes de latence (entre l'exposition et l'apparition) beaucoup plus longues que les leucémies lymphoblastiques aiguës (la forme la plus courante de leucémie chez l'enfant). Prindull et al. indiquent qu'une tendance à l'augmentation du risque ne peut être totalement exclue, car tous les SIR par rapport au groupe témoin b étaient supérieurs à 1, de même que tous les SIR du taux global de cancer par rapport au groupe témoin a, ce qui signifie qu'ils indiquent une augmentation, même si celle-ci n'était pas statistiquement significative. Une réanalyse réalisée par Hoffmann, à nouveau subdivisée par anneaux de distance, ce qui a été rendu possible grâce aux données de la région de comparaison, a révélé des augmentations des taux d'incidence du cancer en général et des cancers du système hématopoïétique avec la diminution de la distance par rapport à la source de la radiation (Hoffmann 1996). Les cas de Würgassen ont certainement contribué au résultat susmentionné de l'étude KiKK.

En RDA (étude n° 4, tableau 3), six centrales nucléaires étaient en service avant la réunification (cinq réacteurs à Greifswald de 1973 à 1990 et un réacteur à Rheinsberg de 1966 à 1990), ainsi qu'un réacteur de recherche à Rossendorf (près de Dresde) de 1956 à 1989. La déclaration de tous les cas de cancer était obligatoire en RDA à partir de 1953. Möhner et Stabenow, anciens employés du registre des cancers de la RDA, supposent que l'enregistrement était quasi exhaustif et ont mené par la suite une étude sur l'incidence du cancer en général, et plus particulièrement de la leucémie infantile, à proximité des centrales de la RDA (Möhner et Stabenow, 1993). Ils ont sélectionné des zones de rayon de 0 à 5 km, de 5 à 10 km et de 10 à 15 km pour leur étude. Une région près de Stendal, où une autre centrale nucléaire était prévue mais n'a jamais été construite, a servi de zone témoin. La zone d'étude comprenait environ 30 000 enfants (de moins de 15 ans) issus de 70 communes, sur la période 1961-1988. La zone témoin incluait 18 communes, avec une population infantile moyenne de 13 400 enfants. Compte tenu du faible nombre de cas, les deux zones centrales ont été analysées conjointement. Entre 1979 et 1988, 23 cas de cancer y ont été observés, dont huit leucémies. Dans cette zone (0-10 km), une augmentation significative du taux global de cancer a été constatée, avec un risque relatif (RR) de 1,48 (intervalle : 1,00-2,08). Aucun cas de leucémie n'a été enregistré dans la zone proche de Greifswald (5 établissements), ce qui explique l'absence d'augmentation significative du taux global de cancer, avec un RR de 1,77 (intervalle : 0,88-3,20). À Rossendorf, l'augmentation était de RR 2,11 (intervalle : 0,92-4,17).

L'étude n° 5 (tableau 3) a été menée par Hoffmann dans le cadre de sa thèse de doctorat (Hoffmann, 1993a). La commune d'Ellweiler se situe dans le district de Birkenfeld (Rhénanie-Palatinat), près de la frontière sarre, dans une zone au sous-sol uranifère. Depuis la fin des années 1950, du minerai d'uranium y était traité pour produire du combustible nucléaire. Les terrils de l'usine de traitement d'uranium « Gewerkschaft Brunhilde » ont été mis au jour à ciel ouvert. Une augmentation de l'incidence des leucémies chez les enfants et les adolescents a été suspectée et liée à l'usine. L'originalité de cette étude, outre la confirmation épidémiologique de l'augmentation des cas dans un rayon de 5 km autour de l'usine, réside dans la possibilité de détecter l'exposition aux rayonnements par dosimétrie biologique aléatoire basée sur les aberrations chromosomiques. Les voies probables d'exposition à la radioactivité ont été identifiées comme étant le radon gazeux dans la zone environnante et le radium dans l'eau potable à la suite de la lixiviation des terrils dans le ruisseau Steinaubach, qui coule entre les terrils à travers la zone et était utilisé en aval pour l'extraction d'eau potable (Hoffmann et al. 1993b).

L'étude n° 6 (tableau 3) porte sur un effet génétique consécutif à une irradiation parentale. Les recherches scientifiques ont démontré que les rayonnements ionisants peuvent induire des mutations létales sur les chromosomes, notamment les chromosomes sexuels, principalement sur le chromosome X. Le chromosome X masculin est transmis uniquement aux filles. Une mutation létale dominante sur le chromosome X entraîne la mort de l'embryon femelle. Les mutations létales récessives sur le chromosome X sont nettement plus fréquentes que les mutations dominantes (Vogel, 1969). Elles aussi n'affectent que les filles. Le sex-ratio à la naissance (garçons/filles) s'avère donc être un paramètre sensible à l'irradiation à faible dose (Scherb et al., 2015).

Les malformations congénitales chez les nouveau-nés (étude n° 7, tableau 3) correspondent à des effets pouvant résulter de mutations dues à l'irradiation du fœtus (in utero) ou des cellules germinales des parents. En 1985, le physicien Peter Kafka, chercheur à l'Institut Max Planck de physique et d'astrophysique de Munich, a analysé les données du ministère bavarois du Développement régional et des Affaires environnementales pour la période 1968-1980. Il a conclu à des taux significativement élevés de malformations congénitales dans le sud de la Bavière, dans la zone d'échappement de la centrale nucléaire de Gundremmingen (bloc A, en service depuis 1966). Le réacteur a été totalement détruit en 1977 suite à un accident. Les habitants des environs de la centrale nucléaire de Grafenrheinfeld (près de Schweinfurt), en service depuis 1981, ont fréquemment constaté des augmentations de la radioactivité.²⁰ Suite à la constatation d'un regroupement de malformations congénitales dans les environs, l'association « Action citoyenne pour la protection de l'environnement et de la vie / Initiative citoyenne contre les installations nucléaires » (BA-BI) a intenté, sans succès, une action en justice contre l'exploitation de la centrale en 1996. Elle s'appuyait sur un rapport de 1991 de l'Office fédéral de radioprotection (BfS) (van Santen et al., 1995) faisant état d'une prévalence accrue de malformations congénitales à proximité de Grafenrheinfeld, sans toutefois établir de lien avec la centrale nucléaire. Körblein a analysé les données en fonction de la distance aux quatre centrales bavaroises de Gundremmingen, Isar, Grafenrheinfeld et Garching entre 1984 et 1991 (Körblein, 2008). Dans un rayon de 10 km, une augmentation constante de l'incidence des malformations congénitales a été observée avec la proximité de la centrale. L'augmentation de 2,75 fois des malformations organiques isolées dans un rayon de 5 km autour de la centrale nucléaire était particulièrement frappante. Grafenrheinfeld (Figure 4).

L'étude numéro 8 du tableau 3 fait référence à une étude commandée par le BfS, qui, conformément à l'étude KiKK, visait à étudier le taux de malformations congénitales chez les nouveau-nés à proximité des centrales nucléaires allemandes, appelées KuKK.²¹ L'étude de Queisser-Luft et al. (2010) a été menée à proximité des centrales nucléaires de Philippsburg et de Biblis, en raison de l'absence d'un registre exhaustif des malformations congénitales en Allemagne. Un registre local des naissances, inspiré du « modèle de Mayence », y a été mis en place à titre expérimental à l'hôpital universitaire pour enfants de Mayence (Rhénanie-Palatinat) de 1990 à 2019. Les auteurs ont défini une zone d'étude de 10 km de rayon. Compte tenu de la très courte durée de l'étude (15 mois, du 11 novembre 2006 au 29 février 2019), les résultats ne sont pas concluants.

²⁰ Ils ont effectué des mesures continues à l'aide d'un compteur Geiger pendant une période donnée.

²¹ Les enfants et l'énergie nucléaire

En janvier 2008, les auteurs n'ont recensé que 108 cas de malformations congénitales dans la zone étudiée. Ils ont conclu qu'il n'y avait pas d'augmentation du taux de malformations congénitales dans un rayon de 10 km et que le risque de malformations congénitales n'augmentait pas avec la proximité des centrales nucléaires.

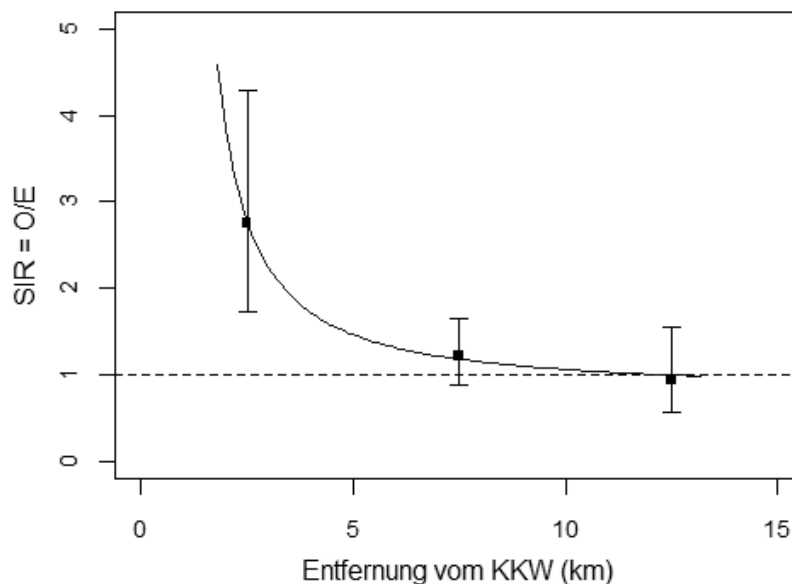


Figure 4: Taux d'incidence standardisé (TIS) des malformations congénitales à proximité de la centrale nucléaire de Grafenrheinfeld, 1984-1991, et courbe de régression. Les barres d'erreur représentent un écart-type (données de Körblein, 2008).

Körblein a suggéré que ce résultat était principalement dû à un taux de malformations exceptionnellement bas dans la zone rurale entourant les deux installations, et a souligné les différences significatives de taux de malformations au sein de la zone d'étude (Körblein 2010). Dans son analyse, il a tenu compte de l'absence de concentrations d'activité élevées attendues en raison des hautes cheminées d'échappement à proximité immédiate des installations. La figure 5 illustre la meilleure adéquation de son modèle aux données de l'étude KuKK. On peut donc supposer qu'en élargissant les zones d'étude et, surtout, la durée de l'étude, une corrélation claire entre le taux de malformations et la contamination environnementale pourrait être mise en évidence.

Malheureusement, les autorités allemandes de radioprotection manifestent une réticence persistante à aborder la question des malformations radio-induites (BUND 2019a ; b).

L'étude n° 9 (tableau 3) concerne l'ancien centre de recherche nucléaire de Jülich (KFA, aujourd'hui Forschungszentrum Jülich, FZJ) en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. De 1967 à 1988, le réacteur expérimental AVR y a été exploité. Son cœur était constitué de sphères de combustible empilées (uranium hautement enrichi enrobé de graphite) refroidies à l'hélium (réacteur à lit de boulets). Ce réacteur était conçu pour être particulièrement sûr lors des variations de puissance et pour fonctionner avec une efficacité optimale grâce à des températures de fonctionnement plus élevées. Cependant, de multiples dysfonctionnements et fuites du générateur de vapeur ont entraîné la contamination du réacteur ainsi que du sol et des eaux sous-jacentes. Un groupe d'experts indépendants n'a été constitué que bien plus tard.

Chargée d'évaluer le projet (Küppers et al., 2014), leur étude finale met en évidence des lacunes conceptuelles et des risques opérationnels importants négligés ; toutefois, l'allégation selon laquelle le projet aurait causé des dommages sanitaires à la population est réfutée en raison d'une dose prétendument trop faible.

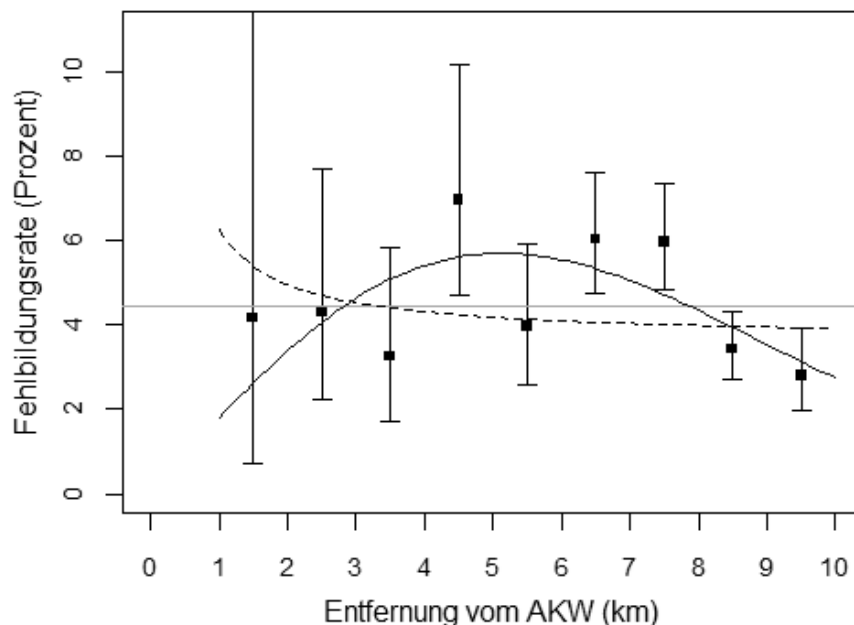


Figure 5: Taux de malformations congénitales à proximité des centrales nucléaires de Philippsburg et Biblis entre 2006 et 2008 en fonction de la distance, d'après une régression linéaire utilisant une fonction de Rayleigh (Körblein 2010). La ligne horizontale représente la valeur moyenne dans la zone d'étude, la ligne pointillée le résultat d'une régression linéaire inversement proportionnelle à la distance (le taux diminue avec la distance).

Des experts estiment ces calculs incomplets (Moormann & Streich, 2014). Un habitant de Niederzier, commune de seulement 6 800 habitants, a incité le spécialiste en médecine nucléaire Horst Kuni à mener des recherches après la survenue, entre 1990 et 1992, de trois cas de leucémie aiguë chez des enfants et d'un cas chez un adolescent de 15 ans. Niederzier se situe à environ 5 km au sud-est du Centre de recherche de Jülich. Kuni a étendu la zone d'étude à la région située entre 5 et 10 km (Huchem-Stammeln). Pour l'ensemble de ces zones et pour les deux groupes d'âge confondus, le taux de leucémie a été multiplié par 20 environ durant la période considérée (Kuni, 1998).

L'enquête n° 10 (tableau 3) concerne le réacteur à haute température au thorium (THTR) de 300 MW de Hamm-Uentrop, mis en service en 1971 comme centrale pilote fonctionnant selon le principe du lit de boulets. Les éléments combustibles sphériques, contenant du thorium et de l'uranium, avaient un diamètre de 6 cm et une enveloppe extérieure en graphite. Lors des essais d'avril 1986, des difficultés sont apparues lors du transport des sphères de combustible radioactives dans les canalisations, en raison de la rupture de certaines d'entre elles. Le 4 mai 1986, il a été décidé d'évacuer les sphères bloquées vers l'extérieur, sous la protection du nuage radioactif de Tchernobyl. Un appel anonyme a informé les autorités de cette situation.

L'Institut écologique de Darmstadt a confirmé ce processus suite à la présence manifeste de protactinium-233 (Pa-233) dans la radioactivité ambiante et a fait part de ses soupçons dans un communiqué de presse. Le Pa-233 est produit à partir du thorium par bombardement de neutrons, comme ceux produits dans un réacteur nucléaire. Il ne pouvait provenir du réacteur de Tchernobyl, car celui-ci ne contenait pas de thorium. Ces agissements n'ont été révélés au public qu'en 2015 par un ancien employé (Strahlentelex 2016). La déclaration officielle a ensuite affirmé que l'exposition de la population aux radiations avait été faible. Le réacteur avait été mis hors service en 1989.

En 2012, Samantha, une élève de 11 ans, a reçu un prix du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW) dans le cadre du concours « Jugend forscht » (Jeunes chercheurs) pour son projet intitulé « La centrale nucléaire de Hamm-Uentrop, aujourd'hui démantelée, a-t-elle eu un impact sur son environnement ? » (Seithe 2012). Avec l'aide de son professeur, elle a prélevé des échantillons de sol et les a analysés afin de déterminer leur radioactivité à l'aide d'un compteur Geiger. Au microscope, elle a observé des sphères d'aspect métallique ressemblant au combustible nucléaire du réacteur THTR (Thorium Thru Reactor). Samantha a également étudié l'espérance de vie de la population locale en collectant les données de mortalité de tous les cimetières des environs (3 105 personnes). Ses recherches ont montré qu'après 1980, l'espérance de vie à proximité du réacteur (moins de 15 km) était de 72,7 ans, soit 2,6 ans de moins que dans cinq localités plus éloignées d'une centrale nucléaire (75,3 ans). Cette découverte a suscité un vif intérêt public. La station de surveillance de la radioactivité de Düsseldorf (Rhénanie-du-Nord-Westphalie) n'a détecté aucune trace de thorium dans les sphères, mais n'a fourni aucune preuve à ce sujet dans ses protocoles de mesure. L'Office régional pour la nature, l'environnement et la protection des consommateurs l'avait initialement identifié comme de l'oxyde de fer. L'explication officielle, en 2013, était qu'il s'agissait de résidus de chaux issue de la production d'engrais.

Le ministère de l'Environnement de Rhénanie-du-Nord-Westphalie a chargé le registre régional du cancer de mener une enquête sur l'incidence du cancer à proximité du réacteur THTR (Thyno-Torrent Reactor). Les résultats de cette enquête ont été publiés en novembre 2013 (Registre épidémiologique du cancer 2013). La période d'étude couvrait la courte période 2008-2010. Le rapport concluait à l'absence d'augmentation de l'incidence du cancer à proximité du THTR, à une exception près : le cancer de la thyroïde chez les femmes, qui affichait une hausse de 64 %. Toutefois, il a été jugé peu probable que cette augmentation soit due aux radiations, car une augmentation chez les hommes aurait également été observée. Cette explication néglige deux points importants : 1) la thyroïde des femmes est nettement plus sensible aux radiations que celle des hommes (voir ci-dessous) ; 2) les taux d'incidence chez les femmes sont considérablement plus élevés que chez les hommes ; en 2017/2018, le ratio femmes/hommes standardisé selon l'âge était de 2,44:1 (ZKD 2021). Par conséquent, non seulement le risque relatif est plus élevé, mais les taux absolus de maladie après radiothérapie sont également plus élevés chez les femmes que chez les hommes.

Le registre des cancers de Rhénanie-du-Nord-Westphalie a recensé 70 cas chez les femmes et 22 chez les hommes dans la zone du réacteur située près de Hamm. À titre de comparaison, dans le district de Recklinghausen, plus éloigné du réacteur, on s'attendait à 42,7 cas chez les femmes et 22,6 cas chez les hommes, ce qui signifie qu'il n'y a effectivement pas eu d'augmentation du nombre de cas chez les hommes. Chez les femmes, une augmentation statistiquement significative de 64 % (SIR = 1,64) a été constatée.

Le cancer de la thyroïde est le seul effet des radiations qui, selon l'UNSCEAR et l'OMS, soit survenu dans la population suite à une exposition durant l'enfance ou l'adolescence lors de l'accident de Tchernobyl. D'autres experts ont démontré un risque accru même après une exposition à l'âge adulte (Mürbeth et al., 2004). Dans le cas de Tchernobyl, ce risque est attribué aux isotopes radioactifs de l'iode émis. Les périodes de latence peuvent être très longues ; selon Ron et al. (1987 ; 2012), le risque de cancer de la thyroïde induit par les radiations ne commence à diminuer que lentement 30 ans après l'exposition. Selon leur étude de 2012, le risque relatif excédentaire est de 1,5 %.²²Le risque relatif par dose (ERR/Sv) est environ deux fois plus élevé chez les femmes que chez les hommes. Weiss indique que l'incidence chez les hommes âgés de 10 ans au moment de l'accident de Tchernobyl était plus de quatre fois inférieure à celle observée chez les femmes (Weiss 2018). Fait intéressant, une étude belge a par la suite mis en évidence une augmentation du taux de cancers de la thyroïde à proximité de deux des quatre centrales nucléaires belges (Demoury et al. 2017).

D'après un rapport du registre des cancers de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, un taux élevé de leucémie a également été observé dans la région, bien que cela n'ait pas été mentionné par les auteurs : 31 cas ont été recensés chez les femmes, contre 23,0 attendus, et 27 cas chez les hommes, contre 24,9 attendus. Il n'y a pas lieu de considérer les données séparément pour les deux sexes dans ce contexte. Au total, cela se traduit par un SIR de 1,21, soit une augmentation de 21 %, survenue 22 à 25 ans après l'incident survenu lors du rapport THTR de 1986, compte tenu de la période d'étude (2008-2010) (le nombre de cas de leucémie au cours des 21 premières années suivant la publication du rapport THTR est inconnu). Contrairement au cancer de la thyroïde, les périodes de latence des leucémies radio-induites sont nettement plus courtes ; il faut donc supposer que l'augmentation observée ne représente qu'une fraction de l'effet global.

Le registre des cancers de Rhénanie-du-Nord-Westphalie fait ainsi état d'effets typiques des radiations à proximité du centre de recherche sur les cancers de la thyroïde de Hamm-Uentrop. Selon un communiqué de presse, la question de l'incidence accrue du cancer de la thyroïde devrait faire l'objet d'une enquête approfondie (ministère de l'Environnement de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, novembre 2013).

3.4 Paysages contaminés par l'extraction d'uranium en Allemagne

L'exploitation de l'uranium en Thuringe et en Saxe a laissé un héritage de 3 700 hectares, comprenant 48 terrils contaminés par la radioactivité et environ 300 millions de mètres cubes de matériaux de recouvrement. Le traitement de l'uranium en yellowcake...²³Elle a laissé derrière elle 160 millions de mètres cubes de boues radioactives (Atlas de l'uranium 2022). Des milliards ont été dépensés pour remblayer et recouvrir les zones, mais jusqu'à présent, le niveau élevé et permanent de radioactivité naturelle dans de vastes zones n'a pas été éliminé.

D'après une étude du Dr Stabenow du Registre conjoint des cancers des Nouveaux Länder (GKR), l'incidence du cancer était significativement plus élevée dans la population des communes situées sur le site WISMUT (Stabenow, 2007). La période étudiée s'étendait de 1996 à 2005. Le Dr Stabenow attribue cette augmentation exclusivement au cancer du poumon chez les hommes.

²²Le risque relatif « excédentaire » (RR) est défini comme $ERR = RR - 1$ (il est également proportionnel à la dose dans le cas d'un effet proportionnel à la dose).

²³Contient environ 70 à 90 % en poids d'uranium oxydé (U)₃O₈

Revenons aux employés de WISMUT. D'une part, ce résultat est rassurant pour le reste de la population. D'autre part, il faut également tenir compte du fait que le nombre d'effets stochastiques induits par les radiations, tels que les cancers et les dommages génétiques, dépend de l'exposition totale aux radiations générée par la radioactivité ambiante additionnelle. Selon les mesures et les calculs du Groupe environnemental de l'Église de Ronneburg (Thuringe), les générations futures seront encore affectées malgré les efforts de dépollution entrepris jusqu'à présent (Lange 2009 ; 2021).

3.5 Autres constats en Grande-Bretagne

La contamination environnementale due aux installations nucléaires britanniques est particulièrement connue en lien avec la centrale de Windscale, rebaptisée par la suite Sellafield. Située dans le nord-ouest de l'Angleterre, sur la côte de Cumbria, cette centrale rejette ses eaux usées dans la mer d'Irlande. En 1951, le premier des quatre réacteurs modérés au graphite y est entré en service, destiné à la production de plutonium à usage militaire. Ce premier réacteur a pris feu en 1957, libérant d'importantes quantités de radioactivité dans l'environnement. Cet incident n'a cependant été rendu public qu'en 1983. La première usine de retraitement du combustible nucléaire usé de Windscale, utilisée pour récupérer le plutonium, a fonctionné de 1952 à 1964. Durant cette période, d'autres installations ont été construites sur le site pour retraiter le combustible usé des réacteurs de puissance, tant nationaux qu'étrangers, en vue de l'utilisation dite pacifique de l'énergie nucléaire.

Entre 1980 et 2000, de nombreuses mesures environnementales approfondies de la radioactivité dans les sols et les aliments ont été réalisées, incluant des mesures du plutonium dans les dents de lait (O'Donnell et al., 1997). Ces mesures ont révélé des niveaux de contamination élevés jusqu'à une distance d'environ 180 km, diminuant avec l'éloignement de la source. Officiellement, toutes ces contaminations ont été classées comme radiologiquement insignifiantes. Sous le gouvernement de coalition rouge-vert du chancelier Schröder, A. Benischke et C. Küppers, de l'Öko-Institut Darmstadt, mandatés par l'Office fédéral de radioprotection (BfS), ont conclu en 2000 que les limites d'exposition allemandes pour la population – appliquées à Sellafield – y étaient dépassées d'un facteur 20 (Rapport de Mayence, 2001). Ce rapport, non publié, a néanmoins conduit à la résiliation des contrats allemands avec Sellafield.

Les déchets liquides de l'usine se déversent dans la mer d'Irlande, puis dans la mer du Nord, l'océan Arctique et les eaux adjacentes. La côte est de l'Irlande, au nord de Dublin, est particulièrement touchée. Après la découverte de plutonium dans les poissons pêchés dans cette zone et face aux soupçons selon lesquels Sellafield aurait contribué à l'augmentation des taux de cancer au sein de la population affectée, le gouvernement irlandais a commandé des projets de recherche en 1998 afin d'étudier la contamination, ses conséquences épidémiologiques et les biomarqueurs de radioactivité dans la région concernée. Ce projet a notamment été mené par l'Université de Brême. Lorsqu'il est devenu évident qu'une contamination radioactive mesurable était effectivement présente, le programme a été interrompu.

En 2001, les Irlandais ont intenté sans succès un procès contre le gouvernement britannique devant le Tribunal international du droit de la mer à Hambourg, contestant la mise en service d'une nouvelle usine à Sellafield.

Production d'éléments combustibles MOX (contenant du plutonium) en raison d'une contamination redoutée (Strahlentelex 2001).

La plus grande polémique au sein de la communauté scientifique concernant les risques potentiels liés au fonctionnement normal des centrales nucléaires a été provoquée en 1984 par l'apparition d'un foyer de leucémie dans la ville voisine de Seascale, près de Sellafield. Parmi les enfants nés à partir de 1950, on a dénombré cinq décès dus à la leucémie – soit une augmentation de 9,3 fois – et sept autres cas de cancer. Martin Gardner, professeur de statistiques médicales, a interprété cette découverte comme un facteur génétique, car il s'est avéré que les pères des patients avaient tous travaillé à la centrale (Gardner et al., 1990). Bien qu'une telle anomalie génétique ait été observée à la fois lors de recherches expérimentales et par radiographie diagnostique, plusieurs scientifiques ont tenté de réfuter tout lien génétique au cours des années suivantes.

Gardner est décédé en 1993 et n'a donc pas pu voir la confirmation de cet effet par Roman et ses collègues dans une étude portant sur 39 557 enfants de travailleurs nucléaires britanniques (1999), ni par Dickinson et Parker dans une étude portant sur 9 800 enfants de travailleurs de Sellafield (2002). La première étude a mis en évidence une augmentation de 5,8 fois de l'incidence du cancer chez les pères ayant reçu des doses supérieures à 100 mSv avant la conception de leurs enfants. Le taux de leucémie et de lymphome chez les travailleurs de Sellafield, toutes classes de doses confondues, était presque deux fois plus élevé que prévu (1,9 fois plus élevé). Gardner n'a pas non plus pu assister au procès intenté par deux familles touchées contre les exploitants (Schmidt et Ziggel, 1994). En rejetant le lien de causalité en octobre 1993, le juge s'est principalement appuyé sur l'avis d'expert de Sir Richard Doll. Ce dernier était devenu célèbre et avait été anobli pour avoir été le premier à prouver épidémiologiquement que le tabagisme provoque le cancer du poumon. Par la suite, il est devenu l'un des plus fervents détracteurs des dommages causés par les faibles doses de radiation. Après sa mort en 2005, on a découvert qu'il avait un contrat de consultant très lucratif avec Monsanto. Il avait certifié que l'Agent Orange (dioxine), un polluant environnemental, n'était pas cancérigène, contrairement aux affirmations de plusieurs vétérans de la guerre du Vietnam (Metzger 2006 ; Tweedale 2007). Concernant la question de l'interdiction de la fluoration de l'eau potable, soupçonnée de provoquer des cancers des os, il a été prouvé que lui et son collègue Leo Kinlen avaient dissimulé des données pertinentes aux États-Unis en 1977, dans l'intérêt des partisans de cette pratique (IAOMIT 2007).

Le professeur Kinlen a acquis une reconnaissance internationale significative après l'apparition du foyer de leucémie à Sellafield et a également joué un rôle clé dans les arguments de Doll lors du procès. Il a proposé que les foyers de leucémie surviennent par « mélange de populations » (MP), c'est-à-dire par un déficit immunitaire lorsque des individus extérieurs entrent en contact avec une communauté sédentaire et l'infectent avec des agents pathogènes qui n'y étaient pas présents auparavant (Kinlen 1988 ; 2012). Dans son article de 2012, il a présenté 17 études qu'il avait identifiées et qui, selon lui, présentaient un « véritable » MP, à savoir un phénomène précédemment isolé. **rural** Zones ayant connu un afflux d'étrangers. Son impact est quantitativement faible, avec un risque relatif (RR) moyen de 1,57 pour le groupe d'âge 0-4 ans et de 1,72 pour le groupe d'âge 0-14 ans. Les zones de regroupement ont montré un taux de mortalité nettement supérieur au double (plus précisément, avec un $RR > 2,19$).

Cinq études ont été menées, dont trois dans des régions soupçonnées de contamination radioactive environnementale (Sellafield et La Hague en France, et la région de Fallon aux États-Unis). Il a lui-même identifié un groupe avec un risque relatif (RR) de 3,64 chez des enfants des îles écossaises des Orcades et des Shetland pendant la Seconde Guerre mondiale, alors que des troupes coloniales allemandes y étaient stationnées en raison de l'imminente occupation allemande de la Norvège (Kinlen & Balkwill, 2001). Il a également identifié un autre groupe avec un RR de 10,0 à partir d'une étude menée à Hong Kong entre 1984 et 1990, période de forte croissance démographique (Alexander et al., 1997). Cependant, ces groupes ont été recherchés au sein de la population générale et ne correspondent donc pas au principe de la « véritable » PM.

L'épidémiologiste britannique Freda Alexander, première auteure de l'étude de Hong Kong, l'a par la suite exclue de ses recherches. Elle privilégiait initialement l'hypothèse d'une origine infectieuse de la leucémie chez les PM. Cependant, après avoir étudié la formation de clusters dans la leucémie infantile dans le cadre du vaste projet européen EUROCLUS, elle a conclu qu'en général, seul un faible effet était observé, déclarant : « La première et très importante conclusion est que les clusters individuels tels que ceux de Sellafield et de Krümmel sont des phénomènes rares et méritent une attention particulière » (Alexander et al., 1998).

Parmi les phénomènes rares figure le regroupement de cas de leucémie infantile dans un rayon de 25 km autour de la centrale nucléaire de Dounreay, en Écosse, mis en lumière en 1986 (Black et al., 1992). Trois réacteurs nucléaires et une usine de retraitement du combustible nucléaire usé y ont fonctionné à partir de 1958. Afin de déterminer si ces maladies étaient davantage dues à une exposition maternelle ou au temps passé dans la région, l'étude citée a constitué une cohorte de naissance (les enfants atteints étant nés sur place) et une cohorte scolaire (les enfants atteints ayant fréquenté l'école sur place). Entre 1969 et 1988, huit cas ont été recensés, soit une augmentation de l'incidence de 2,3 dans la cohorte de naissance et de 6,7 dans la cohorte scolaire. Ce n'est que deux décennies plus tard qu'il a été officiellement admis que le littoral et ses environs avaient été contaminés par la radioactivité suite à diverses fuites entre 1963 et 1984 (The Guardian, 2011).

Aucun agent pathogène n'a encore été identifié dans les travaux de Kinlen. Néanmoins, en 2017, la Commission scientifique allemande pour l'étude du cancer (SSK) a proposé, lors de l'examen des causes de la leucémie infantile, d'approfondir l'hypothèse d'une origine virale. La SSK a réfuté la possibilité de cancers radio-induits comme cause héréditaire, bien que les effets susmentionnés aient également été observés chez des travailleurs nucléaires britanniques après des radiographies diagnostiques. Il convient également de noter que Morris et Buckler (1991) ont constaté une incidence 16 fois plus élevée de rétinoblastome, une tumeur oculaire maligne très rare, à Sellafield chez les enfants de mères ayant passé une partie importante de leur enfance et/ou de leur adolescence à Seascale.

3.6 Autres résultats en France

L'usine française de retraitement du combustible nucléaire usé de La Hague a été mise en service en 1966. Elle est située sur la presqu'île du Cotentin en Normandie, à environ 20 km à l'ouest de Cherbourg, et rejette ses eaux usées radioactives dans la mer du Nord via la Manche.

Il s'agit d'un vaste complexe industriel couvrant 300 hectares. À certaines périodes, les centrales nucléaires allemandes étaient les principaux fournisseurs de barres de combustible destinées à être retraitées sur ce site.

Suite aux observations faites à Sellafield, Jean-François Viel, professeur de sciences de la santé à l'université de Besançon, a entrepris d'étudier le taux de leucémie chez les enfants et les adolescents de la région de La Hague. Avec son collègue Dominique Pobel, il a examiné 27 cas de leucémie chez des personnes de moins de 25 ans, entre 1978 et 1993, dans un rayon de 35 km autour de l'usine (Pobel & Viel, 1997). Ils ont constaté des taux élevés associés à la fréquentation, par les mères et les enfants, des plages contaminées de la région et à la consommation de poisson sur place. Le risque relatif le plus élevé ($RR = 4,49$) a été observé dans le groupe qui fréquentait le plus souvent ces plages (plus d'une fois par semaine).

Contre toute attente, cette découverte, qu'il a relatée dans un ouvrage (Viel 1998), lui a valu une vague d'insultes et de menaces. Son université, cependant, a attesté de son intégrité scientifique. D'autres auteurs français ont rapidement expliqué l'augmentation observée des taux de leucémie par le brassage génétique, selon la théorie de Kinlen (Boutou et al. 2002).

3.7 Opérations normales aux États-Unis d'Amérique

Aux États-Unis, après la Seconde Guerre mondiale, d'importantes émissions radioactives ont été constatées lors des essais nucléaires de Three Mile Island (TMI), notamment ceux liés au développement et à la construction de la bombe atomique, aux explosions atomiques du site d'essais du Nevada et à la fusion du réacteur en 1979, près de Harrisburg, en Pennsylvanie. La contamination environnementale à grande échelle due aux installations militaires de Los Alamos (développement de la première bombe atomique), de Hanford (production de plutonium), de Rocky Flats (construction de la bombe atomique) et de Savannah River (retraitement du combustible nucléaire et production d'armes) a été officiellement reconnue, mais les conséquences sanitaires ont été jugées indétectables ou négligeables. Les conséquences des essais nucléaires américains ont été évaluées de la même manière. Après l'accident de TMI, il a été affirmé que l'enceinte de confinement avait retenu la quasi-totalité des radionucléides libérés par le réacteur. Le Comité des Nations Unies pour la protection radiologique (UNSCEAR)²⁴ Dans son rapport de 1993 sur les sources et les effets des rayonnements, il affirmait que l'exposition aux rayonnements de la population environnante était inférieure à 1 mSv, soit l'équivalent d'une radiographie (UNSCEAR 1993 § 152, p. 23). Cette évaluation provenait exclusivement d'une commission convoquée par le président américain (Kemeny 1979).

Cependant, des citoyens ont documenté des lésions radio-induites aiguës, telles que la chute des cheveux et des brûlures cutanées, ainsi que des malformations chez les veaux nouveau-nés (Wing 2003). Le secrétaire à la Santé de Pennsylvanie de l'époque, le professeur d'université Gordon K. MacLeod, a publié une étude faisant état d'une augmentation drastique des cas d'hypothyroïdie chez les nouveau-nés et d'un doublement de la mortalité infantile dans un rayon de 16 kilomètres (1981). Dans les années qui suivirent, les citoyens se battirent pour la reconnaissance des lésions radio-induites et plusieurs poursuites furent intentées contre les exploitants. Cela donna lieu à des absurdités juridiques, comme un décret resté en vigueur pendant plusieurs années stipulant que les citoyens ne pouvaient proposer comme témoins experts que des scientifiques ayant déjà travaillé dans le domaine.

²⁴Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants

Cela était conforme à l'opinion scientifique dominante (Wing 2003). Un fonds gouvernemental fut finalement créé pour étudier les effets de l'accident. Wing et ses collègues menèrent une étude sur l'incidence du cancer dans un rayon de 10 km autour de la centrale, entre 1975 et 1985, et constatèrent une augmentation significative des leucémies, des cancers du poumon et du taux global de cancer, même sur une période relativement courte de seulement six ans après l'accident. Le généticien russe Shevchenko et son équipe, en analysant les aberrations chromosomiques dans le sang de sujets testés, déterminèrent que la dose reçue dans la direction des gaz d'échappement de la centrale était d'environ 1 Sv (Wing et al. 1997). Malgré cela, les demandes d'indemnisation des citoyens furent rejetées. Après 1993, les rapports de l'UNSCEAR ne traitèrent plus de l'accident de Three Mile Island. Une augmentation du taux de cancers de la thyroïde fut observée sur une période de 30 ans après l'accident (Levin et al. 2013).

Les soupçons de la population concernant l'augmentation des taux de leucémie aux abords d'une centrale nucléaire civile ont fait l'objet d'une enquête dans le cas du réacteur à eau bouillante de Pilgrim (690 MW) situé dans le Massachusetts, sur la côte nord-est des États-Unis (Morris et Knorr, 1996). Morris et Knorr ont examiné 105 cas de leucémie lymphoblastique aiguë, principalement chez des adultes (de plus de 13 ans), survenus entre 1978 et 1986 dans 22 villes situées dans un rayon de 36 km autour de la centrale. Une comparaison des cas recensés dans un rayon de 6,4 km avec ceux du reste de la zone a révélé un taux de leucémie 3,88 fois supérieur. De même, une comparaison des cas d'exposition prolongée aux gaz d'échappement avec ceux d'exposition courte a montré un taux de leucémie 3,46 fois supérieur. Les auteurs constatent une relation dose-effet, mais soulignent les faibles émissions déclarées.

Mangano et ses collègues ont étudié la baisse de la mortalité infantile, des malformations congénitales et des cancers infantiles suite à la fermeture de centrales nucléaires aux États-Unis jusqu'en 1987 (Mangano et al., 2002). Huit des centrales étudiées étaient distantes de plus de 113 km et aucune autre activité nucléaire n'y a été menée pendant la période d'étude. La concentration de strontium-90, produit de fission, dans le lait des régions concernées a chuté brutalement après la fermeture des centrales, de même que la mortalité infantile dans un rayon de 64 km autour du panache d'émissions. La comparaison des taux des deux années précédant la fermeture avec ceux des deux années suivant la fermeture de chaque centrale a révélé une diminution de 11 % (après ajustement pour la baisse globale de 6,4 % de la mortalité infantile aux États-Unis). Les malformations congénitales ont diminué de 17 %. Le taux de cancer chez les enfants de moins de 5 ans a significativement diminué dans les zones proches des réacteurs pour lesquels des données étaient disponibles (Mangano et al., 2002).

3.8 Opérations normales au Canada

Au Canada, une ligne de réacteurs spéciale appelée CANDU (Canada DeutériumUranium) s'est développé. Dans ce processus, au lieu de l'eau normale (H₂O) la soi-disant eau lourde (D₂O) utilisé comme liquide de refroidissement et modérateur²⁵L'avantage est que l'uranium naturel peut être utilisé comme combustible sans qu'il soit nécessaire de le réapprovisionner.

²⁵Le deutérium D est un isotope de l'hydrogène possédant un neutron supplémentaire dans son noyau.

Il peut être utilisé à des fins de sécurité. La capture de neutrons par le deutérium dans ce réacteur produit une quantité particulièrement élevée de tritium, l'isotope radioactif de l'hydrogène, connu pour son efficacité biologique importante car il s'incorpore aux biomolécules.

En 1988, l'expert indépendant David McArthur a signalé une forte concentration d'enfants atteints du syndrome de Down à proximité du réacteur de Pickering, en Ontario, qu'il a attribuée aux émissions de tritium de ce dernier. Cette découverte a suscité un vif intérêt national et international. Un rapport de la Commission canadienne de l'énergie atomique a confirmé ces résultats (Johnson et Rouleau, 1991). Entre 1973 et 1988, 24 cas de syndrome de Down ont été recensés dans les villes voisines de Pickering et d'Ajax, soit une augmentation de 1,9 fois par rapport à la moyenne ontarienne. De plus, les populations des différentes zones d'émission présentaient une augmentation de quatre fois des malformations congénitales du système nerveux central par rapport à la zone la plus exposée. La Commission de l'énergie atomique n'a pas établi de lien possible avec l'exposition au tritium.

Wanigaratne et al. (2013) n'ont trouvé aucune association entre l'exposition au tritium et l'incidence du cancer dans la population de la centrale nucléaire de Pickering entre 1985 et 2005. Cependant, Vakil et Harvey (2014) ont souligné que le groupe le plus vulnérable, les enfants de moins de 5 ans, avait été omis de l'étude et que les périodes d'observation nécessaires, au cours desquelles les maladies seraient censées se développer après l'exposition, n'avaient pas été prises en compte.

3.9 Opérations normales en Union soviétique/Russie

En Union soviétique, une contamination environnementale généralisée s'est également produite en raison du combustible nucléaire et des produits de fission issus du développement et des essais d'armes nucléaires. Après la chute du rideau de fer, une brève période de coopération internationale s'est instaurée dans le domaine de la recherche sur les effets d'une exposition chronique aux rayonnements (notamment ceux des radionucléides) par rapport à une exposition de courte durée, comme celle observée à Hiroshima et Nagasaki (Napier 2014). Maïak est une centrale nucléaire située dans le sud de l'Oural, dans la région de Tcheliabinsk. Il s'agissait de la première installation nationale dotée de réacteurs nucléaires destinés à la production de matières fissiles pour les armes nucléaires. Un accident survenu sur le site en 1957 a entraîné le rejet de matières radioactives, telles que du strontium-90 et du plutonium, dans la rivière Tcha. La population riveraine a souffert de nombreux problèmes de santé (Krestinina et al. 2007). Maïak ne produit plus de matières fissiles de qualité militaire depuis 1987. Depuis lors, ses principales activités sont la production de radionucléides et le retraitement du combustible nucléaire.

Selon les auteurs, le plus grand complexe nucléaire au monde est situé en Sibérie, près de Seversk, et est en activité depuis 1953. Initialement une installation militaire, il a ensuite été agrandi pour un usage civil, avec des usines de production et de retraitement d'éléments combustibles pour réacteurs nucléaires (Kalinkin et al., 2014). Plusieurs accidents et un procès perdu par les victimes d'un incident survenu en 1993 et leurs proches contre les exploitants ont été signalés, notamment par Greenpeace. Kalinkin et al. ont examiné la mortalité par cancer dans la population de Seversk entre 1970 et 2005 et ont constaté une augmentation de 3,2 fois au cours de cette période.

3.10 Opérations normales au Japon

S'inspirant des premières recherches menées par l'Institut de Mayence en Allemagne, Iwasaki et ses collègues ont réalisé une étude sur la mortalité par leucémie et lymphome à proximité des centrales nucléaires au Japon entre 1973 et 1987 (Iwasaki et al., 1995). Ils ont conclu qu'aucune anomalie n'avait été observée sur les sites étudiés. Hoffmann et ses collègues ont analysé conjointement ces données (Hoffmann et al., 1996). Ils ont dénombré 307 décès par leucémie, tous âges confondus, contre 251 cas attendus d'après le taux national japonais, soit une augmentation de 22 %.

3.11 Conclusions

Concernant les problèmes de santé observés à plusieurs reprises à proximité des centrales nucléaires, tant au niveau national qu'international, et qui pourraient être induits par de faibles doses de rayonnement, tout lien avec la radioactivité est systématiquement rejeté, sous prétexte que les émissions des centrales sont trop faibles. Cet argument est ni plausible ni scientifiquement vérifiable. Par exemple, la Commission allemande de radioprotection (SSK) a indiqué, dans son évaluation de l'étude KiKK, qu'une dose moyenne d'au moins 10 mSv serait nécessaire pour expliquer le doublement observé du taux de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans dans un rayon de 5 km autour des centrales nucléaires (SSK 2008). Or, selon la SSK, l'exposition aux rayonnements de la personne de référence due aux rejets de substances radioactives des centrales nucléaires – malgré son haut degré de prudence – est si faible que l'augmentation du risque relatif de leucémie observée dans ce rayon de 5 km lors de l'étude KiKK ne peut s'expliquer par ce facteur (SSK 2008).

Comme indiqué précédemment, en cas d'ingestion de radionucléides, le résultat de ce calcul, fondé sur diverses hypothèses modélisées, ne peut être vérifié expérimentalement chez un sujet témoin. Des incertitudes de plusieurs ordres de grandeur sont inhérentes, par exemple, au modèle pulmonaire de la CIPR utilisé pour déterminer les doses aux organes par inhalation.²⁶

Le modèle pulmonaire de la CIPR (1994), qui compte 482 pages, a suscité des recherches approfondies sur les paramètres d'entrée. M.A. Roy, de l'Agence nationale de radioprotection (1998), a déterminé, en faisant varier les paramètres dans leurs intervalles d'incertitude supposés, que l'intervalle de confiance du résultat peut atteindre deux ordres de grandeur, voire plus, selon le nucléide (rapport entre la plus petite et la plus grande valeur dans l'intervalle de probabilité de 90 %). Des scientifiques travaillant ou ayant travaillé pour des agences nationales de radioprotection en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis soulignent la complexité considérable des propriétés physiques, chimiques et physiologiques à simuler (Paquet et al., 2016). Ils précisent également que les résultats obtenus pour le sujet de référence ne doivent être utilisés qu'à des fins de radioprotection ; pour les études épidémiologiques, les incertitudes sur les paramètres sont trop importantes.

²⁶Ce modèle décrit le transfert des radionucléides inhalés à travers les différents compartiments pulmonaires, d'où ils sont ensuite distribués aux autres organes. De ce fait, la dose requise pour chaque organe en fonction du nucléide concerné — dans le cas d'une leucémie, la dose à la moelle osseuse — est calculée à partir d'une quantité connue de radioactivité inhalée. Par conséquent, le métabolisme humain, par exemple chez l'adulte, est représenté par un seul chiffre (approximativement différencié selon les propriétés physico-chimiques de la substance inhalée). Cette approche paraît d'emblée discutable.

et de tenir compte des différences individuelles. Ceci contredit la déclaration de la SSK.

Si la limite de dose pour la population avait été systématiquement et significativement inférieure à la normale, les conséquences sanitaires seraient probablement indétectables statistiquement, compte tenu de la taille relativement réduite des groupes observés. Cependant, l'expérience montre que les rejets/fuites mineurs sont inévitables. De plus, seules les émissions moyennes sont prises en compte ; des rejets plus importants sur de courtes périodes ne peuvent être exclus. Par ailleurs, le calcul de la dose due à ces rejets implique un certain nombre de moyennes et de simplifications, comme l'illustre le modèle pulmonaire, ce qui signifie que la dose réellement reçue par les individus, en particulier les nourrissons et les enfants, peut être plus élevée.

Bien que les résultats de l'étude KiKK et d'autres études comparables ne puissent être expliqués par la méthodologie actuelle d'évaluation des effets des rayonnements ionisants sur le corps humain, il n'en découle pas nécessairement que l'on puisse exclure les faibles doses de rayonnements ionisants comme cause de leucémie et de cancer. Cela suggère plutôt que la méthodologie présente des lacunes et que notre connaissance des effets des rayonnements demeure incomplète.

Un fait demeure certain : l'exploitation d'installations nucléaires et la manipulation de matières radioactives, même dans le respect des limites de dose fixées par la réglementation sur la radioprotection, comportent des risques. Même en deçà de ces limites, il existe un risque de développer des cancers mortels plus tard dans la vie et de nuire à la descendance. Ce risque augmente avec la dose. De plus, il apparaît de plus en plus clairement que d'autres maladies sont également liées aux rayonnements ionisants.

La prise en compte des dommages sanitaires et des décès prématurés causés par le « fonctionnement normal » des installations nucléaires doit donc être intégrée à l'évaluation des risques et des avantages de l'énergie nucléaire.

4. Protection contre les rayonnements selon des normes obsolètes

Les enquêtes mentionnées au chapitre 3 ont été déclenchées par des observations et des soupçons plus ou moins aléatoires. Le fonctionnement normal des centrales nucléaires, avec ses nombreux incidents mineurs, contribue à l'augmentation, observée depuis longtemps, des cas de cancer chez les enfants et les adultes en Allemagne et dans d'autres pays industrialisés, ainsi qu'au taux particulièrement élevé de malformations congénitales en Allemagne (BUND 2017 ; 2019). Une évaluation précise des effets des radiations est impossible en raison de la nature aléatoire de l'apparition des cancers et des dommages génétiques. Cette difficulté serait encore accrue par le fait que certains des dommages observés pourraient être causés par d'autres facteurs, tels que les toxines environnementales et les radiographies diagnostiques.

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), basée à Vienne, est une agence des Nations Unies. Son rôle est de surveiller les installations militaires et de promouvoir l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire. Elle dispose de ressources considérables pour évaluer les données scientifiques relatives à ses effets. Il est bien connu des détracteurs du nucléaire qu'un traité de 1959 entre l'AIEA et l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), également une agence des Nations Unies, oblige cette dernière à coordonner son évaluation des effets des radiations. Ceci a notamment conduit à une sous-estimation et à une minimisation importantes des conséquences de Tchernobyl par l'OMS, une pratique qui perdure encore aujourd'hui. La justification généralement avancée est, une fois de plus, l'affirmation que la dose (calculée) reçue par la population est trop faible pour provoquer des dommages sanitaires tangibles.

Malgré de nombreuses découvertes scientifiques récentes, notamment dans le domaine professionnel, en matière de radioactivité environnementale et suite à des diagnostics médicaux (BUND 2017), le Comité des Nations Unies pour la protection radiologique (UNSCEAR) s'efforce d'établir un seuil de dose inoffensif. Dans un rectificatif de 2016 au rapport de 2008, le comité a publié la déclaration suivante : *« Pour la plupart des types de tumeurs chez les animaux de laboratoire et chez l'homme, une augmentation significative du risque n'est détectable qu'à des doses supérieures à 100 mGy. »* (UNSCEAR 2011). Cette déclaration suggère qu'il n'existe pratiquement aucun risque de cancer perceptible en dessous de 100 mSv. Or, 100 mSv sur 5 ans correspond précisément à la limite de dose pour les personnes exposées professionnellement. La radiologie médicale – un seul scanner pouvant facilement entraîner une dose de 100 mSv à un organe – ne poserait alors aucun problème, d'autant plus que l'UNSCEAR et la CIPR estiment qu'un risque de mutation génétique lié aux radiations est improbable.

L'évaluation des cancers radio-induits, menée en Allemagne par le SSK et le BfS – mais uniquement chez l'adulte (SSK 2018 ; BfS 2022b) – n'a pas été partagée par le prestigieux institut de recherche d'Hiroshima. Ses scientifiques soulignent, dans des études récentes menées auprès de survivants japonais, que les cancers surviennent beaucoup plus fréquemment, même pour des doses comprises entre 0 et 100 mSv, et que leur incidence n'est pas inférieure à celle attendue en fonction du risque proportionnel à la dose (Pierce et Preston 2000 ; Grant et al. 2017).

En ce qui concerne le risque génétique, le rapport 2001 de l'UNSCEAR intitulé « Effets héréditaires des radiations » indique au paragraphe 542 (p. 84) ce qui suit : *Aucune maladie génétique (héréditaire) induite par les radiations n'a été démontrée jusqu'à présent dans les populations humaines exposées aux rayonnements ionisants.* Dans la publication n° 103 de 2007 de la CIPR, section 3.2.2 (Risque d'effets héréditaires) à la page 53, également citée par la loi allemande sur la radioprotection, il est indiqué : *« (74) Il n'existe toujours aucune preuve directe que l'exposition des parents aux radiations entraîne un excès de maladies héréditaires chez la descendance. Du moins, si l'on se réfère aux résultats de la recherche expérimentale, les deux institutions aboutissent à des valeurs de risque mineures au sens d'un processus stochastique. »*

Dans ses recommandations de 2007, la CIPR a affirmé pour la première fois l'existence d'un seuil de dose sans danger de 100 mSv pour l'exposition in utero. Cette conclusion a été établie par un groupe de travail spécialement constitué et présidé par le professeur Streffer d'Essen (CIPR).

En 2003, la CIPR a également commenté les nombreuses observations concernant les maladies non cancéreuses chez les personnes exposées professionnellement et les survivants des bombardements atomiques japonais. Elle suppose provisoirement que ces maladies ne devraient pas survenir en dessous de 500 mSv. Cette hypothèse est peu plausible, car la dose moyenne chez les survivants des bombardements atomiques n'est que de 200 mSv (Ozasa et al., 2013), et les doses aussi élevées que 500 mSv sont extrêmement rares dans les groupes professionnels concernés.

Il est toutefois reconnu que lors de l'irradiation *in utero* Le cancer peut être induit chez les enfants nés plus tard. Les travaux de la médecin et épidémiologiste anglaise Alice Stewart (1906-2002) ont joué un rôle majeur dans les débats historiques sur ce sujet. Dans les années 1950, elle a lancé un projet visant à étudier les causes des cancers infantiles : l'Oxford Survey of Childhood Cancer (OSCC). En 1956, elle a publié les premiers résultats montrant que les radiographies diagnostiques pratiquées pendant la grossesse – principalement en cas de présentation anormale ou de suspicion de grossesse gémellaire – déclenchaient des leucémies chez leurs enfants nés plus tard (Stewart et al., 1956). Ses recherches ont révélé qu'une seule radiographie à la dose alors en vigueur – environ 5 mSv – doublait le risque de leucémie, l'augmentant de 100 %, et que d'autres cancers infantiles pouvaient également être causés par de faibles doses de radiations. *in utero* peut être induit.

L'OSCC était un projet national mené en Grande-Bretagne. Les questions de recherche portaient sur de nombreux facteurs de risque potentiels, ce qui signifie que le projet ne se concentrait pas spécifiquement sur les radiations. Initié en 1956 par Alice Stewart à l'Université d'Oxford sous la forme d'une étude cas-témoins, il s'est poursuivi à partir de 1975 au Département de médecine sociale de l'Université de Birmingham. La première publication recensait environ 600 cas de leucémie infantile et 700 décès d'enfants dus à d'autres cancers. La population étudiée a été élargie au cours des décennies suivantes, faisant de cette étude l'une des plus importantes au monde dans son domaine.

Dans la publication n° 60 de la CIPR (1991), des études sur le carcinome épidermoïde de la cavité buccale sont citées dans la littérature, mais pas dans le texte lui-même. La section 92 évoque la possibilité de développement d'un cancer suite à une exposition *in utero*, mais qualifie les données de contradictoires et incertaines. Le risque absolu est estimé être au maximum équivalent à celui résultant de l'irradiation de la population générale.

Ce n'est qu'en 1997, soit quarante ans plus tard, que des personnalités éminentes du milieu, comme Sir Richard Doll mentionné précédemment, ont finalement reconnu les conclusions de l'étude OSCC, après de nombreuses répétitions par d'autres scientifiques (Doll & Wakeford, 1997). L'UNSCEAR et la CIPR font référence à des effets à une dose de 10 à 20 mSv. Le fait que les radiographies des femmes enceintes ne soient indiquées que dans des cas exceptionnels relève de la pratique médicale courante. Cette pratique repose en effet sur les premières observations épidémiologiques concernant l'induction du cancer. *in utero*.

Le document ICRP 90 de 2003 analyse en détail les résultats concernant le carcinome épidermoïde de la cavité buccale et les compare à ceux de nombreuses autres études. Ces résultats sont jugés cohérents avec ceux d'autres études. **médical** L'exposition est décrite. Globalement, le risque est jugé faible, avec un risque relatif (RR) de 1,49 par examen, et la dose de doublement est estimée à 30 mSv. Les intervalles de confiance ne sont pas précisés. La recommandation n° 90 de la CIPR préconise une attention particulière à la radioprotection durant les premières semaines de grossesse.

Contrairement à cette précaution établie en matière de radioprotection, depuis la modification de l'ordonnance allemande sur la radioprotection en 2001, les femmes enceintes sont également autorisées à travailler dans des zones contrôlées radioactives (où la dose annuelle est supérieure à 6 mSv par an et la dose maximale pour les employés est de 20 mSv).²⁷ La dose administrée à une femme enceinte est limitée à 1 mSv, mais seulement à partir du moment où la grossesse est déclarée.

À cela s'ajoute le risque, souvent nié, de malformations congénitales liées à la radiothérapie. *in utero* Récemment, une augmentation des taux de malformations congénitales a été observée chez les enfants de femmes exposées professionnellement aux rayonnements, notamment en Allemagne (BUND 2019a). Le registre local des naissances, dit « modèle de Mayence », a permis d'étudier ces malformations chez les enfants de femmes exposées professionnellement aux rayonnements. Dès 2011, une augmentation des taux de malformations congénitales chez les enfants de femmes travaillant dans le secteur médical avait été constatée. Ces recherches ont été poursuivies (Wiesel et al. 2016). Sur 27 naissances, huit nouveau-nés présentaient des malformations congénitales majeures, soit une augmentation de 3,8 fois par rapport au taux de référence. Ce dernier est déjà extrêmement élevé en Allemagne, comme le montrent les données d'EUROCAT (Centre européen des anomalies congénitales) (Morris et al. 2018).

Dans le registre de Mayence, les malformations « majeures » sont définies comme des anomalies de la forme corporelle qui compromettent la viabilité et nécessitent une intervention (Queisser-Wahrendorf et al., 2016 ; exemples : spina bifida, occlusion intestinale, cardiopathies congénitales, troubles du développement cérébral, fentes faciales, agénésie des membres). Cependant, aucune mesure de politique de santé publique n'est à prévoir sur la base des critères de la CIPR.

Les recommandations susmentionnées (CIPR 103 de 2007) constituent le fondement de la nouvelle loi allemande sur la radioprotection de 2017 ainsi que de la nouvelle ordonnance relative aux rayons X. Ces deux textes réglementaires ont dû être révisés suite à la directive EURATOM 2013/59. L'Allemagne est membre de la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM) et est donc liée par traité, mais, comme tous les États membres en vertu du droit de l'UE, elle a également la possibilité d'adopter des limites plus strictes pour des raisons de santé publique.

Cette option n'est pas utilisée en Allemagne, pays qui abandonne progressivement ce système. On observe plutôt une adaptation rétrospective d'approches déjà plus avancées. Par exemple, le SSK n'a pas encore abordé la question du facteur d'efficacité du débit de dose (DDREF).²⁸ comportement. La CIPR maintient que, lors d'une exposition chronique aux rayonnements, comme sur les lieux de travail, l'effet ne serait que la moitié de celui d'une exposition à court terme (explosion d'une bombe atomique) à dose totale égale.²⁹ Les résultats des études sur les survivants japonais visent notamment à déterminer le risque d'irradiation pour les employés ou le grand public à une dose donnée. Or, à cette fin, ils sont d'abord divisés par deux selon l'argument susmentionné. La SSK (Commission allemande de radioprotection) a jugé cette méthode inacceptable en 2006 et par la suite, et a demandé la suppression de ce facteur.

²⁷Les interdictions et restrictions d'emploi imposées pour protéger la vie à naître ont été levées. La justification avancée est que ces restrictions seraient discriminatoires envers les femmes.

²⁸Facteur d'efficacité de la dose et du débit de dose (DDREF)

²⁹Ce que l'on avait oublié, c'est que ce dogme ancien ne s'appliquait en réalité qu'aux rayonnements faiblement ionisants (rayons X, rayons gamma, rayons bêta) et jamais aux rayons alpha (radon, plutonium).

La SSK l'a recommandé (SSK 2006 ; 2014). Plus récemment, elle estime qu'il n'est pas nécessaire d'agir dans l'immédiat et recommande que « le DDREF ne soit supprimé que dans le cadre d'un éventuel ajustement général ultérieur... si nécessaire » (SSK 2018, p. 45). Pour les salariés atteints de cancer, la réduction erronée de moitié du risque lors de l'évaluation des accidents du travail peut avoir des conséquences importantes.

L'article 9, paragraphe 2, du Code social allemand (SGB) VII, relatif aux maladies professionnelles et en vigueur depuis 2021, stipule que les maladies qui, d'après de nouvelles découvertes médicales, peuvent être liées au travail et n'étaient pas auparavant classées comme telles, doivent être reconnues comme maladies professionnelles. Or, d'après notre expérience, cela n'entraînera aucune amélioration des procédures de reconnaissance. En effet, qui détermine l'état actuel des connaissances scientifiques ? À ce jour, les organismes d'assurance responsabilité civile des employeurs (BG) ont rejeté les avis d'experts formulés par les critiques concernant leurs décisions de refus, les jugeant non pertinents et les qualifiant d'« opinions individuelles ». Autrement dit, ils ne sont pas tenus de vérifier les faits présentés et peuvent se référer à un groupe restreint et indépendant d'experts dont les membres sont qualifiés pour des missions de haut niveau en raison de l'excellence de leurs contributions scientifiques.

Cette approche hiérarchique a été privilégiée dès les débuts de la radiomédecine et de la biophysique des radiations. Le chercheur Wing l'a illustrée à travers l'exemple des procédures judiciaires relatives aux dommages sanitaires consécutifs à l'accident nucléaire de Three Mile Island en 1979 aux États-Unis. Il déplorait la référence, dans le système judiciaire, à une caste fictive pratiquant une science « objective » en marge de la société (Wing 2003). En Allemagne, entre autres, le président sortant du BfS (Office fédéral de radioprotection), John Kaul, s'est donné pour mission d'élaborer des critères d'évaluation de la qualité des résultats scientifiques, même, voire exclusivement, s'ils sont évalués par les pairs (Kaul et al. 1984). Si ces résultats s'avèrent insuffisants, ils doivent être exclus du discours scientifique. C'est le cas, par exemple, lorsque la dose administrée précise est inconnue dans les études épidémiologiques portant sur l'exposition aux rayonnements.

Ce point de vue explique pourquoi l'UNSCEAR, la CIPR et le SSK ne prennent pas en compte de nombreuses publications sur les effets à faible dose de la catastrophe de Tchernobyl, les radiographies diagnostiques, la contamination environnementale ou d'autres domaines, et encore moins pourquoi ils traitent de manière adéquate les travaux scientifiques contradictoires.

Les citoyens qui ne font pas aveuglément confiance aux institutions de la société se trouvent ainsi confrontés, en cas de risque d'exposition aux radiations, au jugement inébranlable d'un petit cercle de scientifiques. Ces comités ne sont pas élus démocratiquement, mais se renouvellent et s'élargissent principalement sur la base des propositions et de l'approbation de leurs membres actuels. Ce n'est certainement pas un hasard, comme le démontre cet article, si les conclusions de ces recherches scientifiques ne contredisent généralement pas les évaluations des partisans du nucléaire. Il est donc impératif de réformer les structures de radioprotection et de les remplacer par une recherche appliquée qui tire les leçons des erreurs du passé. Il faut veiller à ne pas relativiser les faits et les preuves par des objections unilatérales qui arrangeraient les défenseurs du nucléaire.

Dans les années 1920, le généticien américain Herman Joseph Muller découvrit que les rayons X sont mutagènes. Son principal sujet d'étude, en raison de son cycle de vie rapide, fut la drosophile, chez laquelle il observa des malformations du corps et des organes après irradiation, en fonction de la dose. Il conclut de ses recherches que même de faibles doses de rayonnement, comme celles du rayonnement de fond naturel, sont mutagènes. Dans les années 1930, l'idée se développa que le cancer est déclenché par la mutation d'une seule cellule. Muller en conclut qu'il ne pouvait exister de dose sans danger pour le cancer radio-induit. Il reçut le prix Nobel de médecine en 1946 pour ses travaux (voir, par exemple, Muller 1936).

Chercheur renommé dans le domaine des radiations, Muller devait prononcer un discours d'ouverture à la Conférence de Genève sur l'énergie atomique en 1955. Cependant, comme il a été découvert avant la conférence qu'il avait mis en garde contre les dommages potentiels causés au patrimoine génétique de l'humanité par la production des énormes quantités de radioactivité artificielle attendues de cette nouvelle technologie, il a été désinvité (son manuscrit préparé existe toujours).

Parmi les scientifiques qui ont très tôt mis en garde contre les dangers de l'énergie nucléaire figuraient le physicien médical John Gofman et le biologiste Arthur Tamplin, qui, dans leur ouvrage de 1971 intitulé « Poisoned Power: The Case Against Nuclear Power Plants » (L'énergie empoisonnée : plaidoyer contre les centrales nucléaires), ont démontré que les idées reçues sur les effets des radiations étaient fausses et dangereuses. Ils avaient travaillé comme consultants pour la Commission américaine de l'énergie atomique (AEC), la première agence créée par le gouvernement pour promouvoir et contrôler l'industrie nucléaire américaine.

La stratégie de dissimulation et de banalisation qui prévaut depuis le début de l'utilisation dite pacifique de l'énergie nucléaire a fait de nombreuses victimes dans tous les domaines de la radioprotection, dans le fonctionnement dit normal des installations nucléaires, ainsi que dans le diagnostic médical, et le risque de voir cette situation perdurer est réel. Cela est particulièrement vrai pour le démantèlement des centrales nucléaires au cours des prochaines décennies. Dans ce contexte, la radioprotection des employés et du public doit davantage tenir compte des preuves de plus en plus nombreuses issues de la recherche et de la science internationales concernant les effets des rayonnements de faible intensité. Une approche rationnelle des risques liés aux rayonnements ionisants doit être mise en œuvre dès maintenant et doit également inclure le stockage provisoire et définitif des déchets radioactifs.

5. Références

Alexander FE et al. : Regroupement des cas de leucémie infantile à Hong Kong : association avec le pic d'incidence chez l'enfant et la leucémie lymphoblastique aiguë commune, et avec le brassage de la population. *Brit J Cancer* 75 (1997) 45 : 7-463.

Alexander FE et 19 auteurs : Regroupement spatial des leucémies infantiles : résultats synthétiques du projet EU-ROCLUS. *Brit J Cancer* 77 (1998) 818-824

Office fédéral de radioprotection (BfS) : Bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki : implications pour la radioprotection. 2022a [bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/einfuehrung/atombomben/atombomben-strahlenschutz.html](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/einfuehrung/atombomben/atombomben-strahlenschutz.html)

Office fédéral de radioprotection (BfS) : Évaluation des risques. Avis techniques, Rayonnements ionisants. 2022b www.bfs.de

BG ETEM (Fonds allemand d'assurance sociale contre les accidents du travail pour les industries de l'énergie, du textile, de l'électronique et des médias) :

Démantèlement des centrales nucléaires : Anticipez la sécurité au travail. Mise à jour le 27 mars 2021. www.bgetem.de/aktuelles

Initiative citoyenne contre la leucémie dans les marais de l'Elbe, Société allemande de radioprotection, IPPNW (éd.) : Les leucémies des marais de l'Elbe – Étapes d'une enquête. Documentation, Marschacht, décembre 2006. www.strahlenschutz-gesellschaft.de (références)

Black RJ, Urquhart JD, Kendrick SW, Bunch KJ, Warner J, Jones DA : Incidence de la leucémie et d'autres cancers chez les nouveau-nés et les enfants scolarisés de la région de Dounreay. *Brit Med J* 304 (1992) 1401-1405

Boutou O, Guizard AV, Slama R, Pottier D, Spira A : Mélange de populations et leucémie chez les jeunes vivant aux alentours de l'usine de retraitement des déchets nucléaires de La Hague. *Brit J Cancer* 87 (2002) 740-745

BUND (Amis de la Terre Allemagne) : Déclaration de BUND sur le projet de loi relatif à la radioprotection, Berlin, 24 mars 2017 ; Document de commission du Bundestag n° 18 (16) 539-6 pour l'audition du 27 mars 2017 ; www.strahlenschutz-gesellschaft.de

BUND (Amis de la Terre Allemagne) « Anomalies congénitales radio-induites : un appel à une meilleure radioprotection de nos enfants. Le registre des naissances modèle de Mayence doit être maintenu ! » 18.09.2019a

BUND (Amis de la Terre Allemagne) : Les malformations congénitales chez les nouveau-nés nécessitent une collecte de données à l'échelle nationale, sur le modèle de Mayence. Communiqué de presse du 26 septembre 2019b

Dannheim B : Détermination rétrospective de la dose chez l'enfant. Dans : Heinemann G, Pfob H (éd.) : Radiobiologie et radioprotection. 28e congrès annuel de l'Association allemande de radioprotection, Hanovre, 23-25 octobre 1996, p. 172-176.

Demoury C, De Smedt T, De Schutter H, Sonck M, Van Damme N, Bollaerts K, Molenberghs G, Van Bladel L, Nieuvenhuysen V : Incidence du cancer de la thyroïde autour des sites nucléaires belges, 2000-2014. *Int J Environ Res Santé Publique* 14 (2017) 988

Demuth M : Morbidité liée à la leucémie chez les enfants et les adolescents vivant à proximité de la centrale nucléaire de Würgassen. 1re éd. Kassel. Auto-édition, 1988.

Demuth M : Morbidité liée à la leucémie chez les enfants et les adolescents vivant à proximité de la centrale nucléaire de Würgassen. 2e édition révisée. Kassel, autoédition, 1989.

Demuth M : Leucémie chez les enfants vivant à proximité de centrales nucléaires. Dans : Köhnlein W, Kuni H, Schmitz-Feuerhake I (dir.), Faibles doses de rayonnement et santé. Berlin, Springer Verlag, 1990 : 127-135.

Bundestag allemand, 18e législature, document imprimé 18/12162 du 26.04.2017. Proposition de résolution des membres du Parlement et du groupe parlementaire du Parti de gauche sur le « Projet de loi visant à réorganiser la loi sur la protection contre les effets nocifs des rayonnements ionisants ».

Bundestag allemand, 19e législature, document imprimé 19/11294 du 1er juillet 2019. Réponse du gouvernement fédéral à l'interpellation mineure des députées Sylvia Kotting-Uhl, Beate Müller-Gemmeke, Bettina Hoffmann, d'autres députés et du groupe parlementaire BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN ; exploitation minière d'uranium à Wismut et maladies professionnelles des anciens travailleurs.

Dickinson HO, Parker I : Leucémie et lymphome non hodgkinien chez les enfants de travailleurs masculins exposés aux radiations de Sellafield. Int J Cancer 99 (2002) 437-444

Dieckmann H, Schmitz-Feuerhake I : L'étude de Kiel sur la poussière domestique : une occasion manquée d'éclaircissements. Strahlentelex n° 332-333 du 2 novembre 2000, p. 2-5.

Doll R, Wakeford R : Risque de cancer infantile lié à l'irradiation fœtale. Brit J Radiol 70 (1997) 130-139

Eigenwillig GG, Ettenhuber E. (éd.) : Exposition aux radiations et maladies professionnelles induites par les radiations dans les mines d'uranium en utilisant Wismut comme exemple. Association allemande pour la radioprotection, TÜV-Verlag, Cologne 2000

Eigenwillig GG : Radon et produits de désintégration du radon dans l'exploitation minière d'uranium WISMUT – détermination de l'exposition, conditions limites supplémentaires et améliorations. Zbl Arbeitsmed 54 (2004) 420-429.

Eigenwillig GG : Détermination et attribution incorrectes des valeurs d'exposition pour les mineurs des sites WISMUT 02, 03 et 09 entre 1946 et 1976. Zbl Arbeitsmed 57 (2007) 375-390

Eigenwillig GG : exposition estimée aux rayonnements pour les travailleurs souterrains de WISMUT. Ronneburg Radiation Telex numéro 02/2022, pp. 3-7 www.kirchengemeinde-ronneburg.de

Registre épidémiologique du cancer de Rhénanie-du-Nord-Westphalie : Le nombre de cas de cancer est-il élevé à proximité du THTR ? Rapport du Registre épidémiologique du cancer de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW gGmbH) au ministère de la Protection du climat, de l'Environnement, de l'Agriculture, de la Nature et de la Protection des consommateurs du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Münster, octobre 2013.

Frentzel-Beyme R, Schmitz-Feuerhake I, Wolff R : Lymphome non hodgkinien chez les travailleurs exposés aux radiations. Rapport de cas en Allemagne. Zbl Arbeitsmed 70 (2020) 193-195

Gardner MJ, Snee MP, Hall AJ, Powell AJ, Downes S, Terrell JD : Résultats d'une étude cas-témoins sur la leucémie et le lymphome chez les jeunes vivant près de la centrale nucléaire de Sellafield, dans l'ouest du Cumbria. Brit Med J 1990 ; 300 : 423-429

Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, Cahoon EK, Milder CM, Soda M, Cullings HM, Preston DL, Mabuchi K, Ozasa K : Incidence des cancers solides parmi les survivants des bombardements atomiques suivis dans le cadre de l'étude longitudinale : 1958-2009. Radiat Res 2017 ; 187 : 513-537.

Greiser E, Hoffmann W : Commentaires sur l'étude cas-témoins de Basse-Saxe 1995, Institut de Brême pour la recherche en prévention et la médecine sociale (BIPS), Brême, mars 1996

Grosche B, Hinz G, Tsachavidis C, Kaul A : Analyse de la morbidité liée à la leucémie en Bavière entre 1976 et 1981. Partie I : Fondements, méthodologie et aspects médicaux. Neuherberg, Ministère bavarois du Développement régional et des Affaires environnementales, Institut d'hygiène radiologique de l'Office fédéral de la santé, 1987a

Grosche B, Hinz G, Tsachavidis C, Kaul A : Analyse de la morbidité liée à la leucémie en Bavière entre 1976 et 1981. Partie II : Facteurs de risque, répartition régionale et aspects épidémiologiques. Neuherberg, Ministère bavarois du Développement régional et des Affaires environnementales, Institut d'hygiène radiologique de l'Office fédéral de la santé, 1987b

Grosche B, Kreuzer M, Kreishermer M et al : Risque de cancer du poumon chez les mineurs d'uranium allemands : une étude de cohorte, 1946-1998. Br J Cancer 95 (2006) 1280-1287.

Hoffmann W : Incidence des maladies malignes chez les enfants et les adolescents de la région d'Ellweiler, en Rhénanie-Palatinat. Épidémiologie et dosimétrie biologique pour déterminer les voies d'exposition possibles. Thèse, Département de médecine humaine, Université Philipps de Marbourg, 17 juin 1993.

Hoffmann W : Analyse et discussion des données épidémiologiques relatives aux regroupements de leucémies infantiles en Allemagne. Dans : Schmitz-Feuerhake I, Schmitz M (dir.), Exposition aux rayonnements des installations nucléaires – Preuves de l'impact sur la santé. Actes de l'atelier international de l'Université de Portsmouth, 1996, publiés par la Society for Radiation Protection eV, p. 86-117.

Hoffmann W : Les travailleurs temporaires des centrales nucléaires allemandes font partie du groupe professionnel le plus exposé aux rayonnements. Strahlentelex n° 299-293, 4 mars 1999, p. 1-3

Hoffmann W, Kranefeld A, Schmitz-Feuerhake I : Eau potable contaminée par le radium-226 : hypothèse sur une voie d'exposition dans une population présentant une incidence élevée de leucémie infantile. Environ Health Persp Suppl Vol 101 (Suppl 3) 1993 : 113-115

Hoffmann W, Kuni H, Ziggel H : Mortalité par leucémie et lymphome à proximité des centrales nucléaires au Japon, 1973-1987. Lettre à l'éditeur. J Radiol Prot 16 (1996) 213-215

Hoffmann W, Schmitz-Feuerhake I : Quelle est la spécificité du test dicentrique vis-à-vis des radiations ? J Expo Anal Environ Epidemiol 9 (1999)113-33 doi : 10.1038/sj.jea.7500008. PMID : 10321351

Hoffmann W, Terschueren C, Richardson DB : Leucémie infantile à proximité des installations nucléaires de Geesthacht, près de Hambourg, en Allemagne. Environ Health Perspective 2007 ; 115 : 947-52

Académie internationale de médecine et de toxicologie buccales (IAOMIT). Actualités du 1er septembre 2007 (États-Unis) : Les liens entre Doll, Hoover et Douglass. Par Chris Neurath.

CIPR, Commission internationale de protection radiologique. Modèle du tractus respiratoire humain pour la radioprotection. Publication CIPR 66, Annales de la CIPR, 24, n° 1-3. 1994

CIPR, Commission internationale de protection radiologique : Effets biologiques de l'irradiation prénatale (embryon et fœtus). Publication CIPR 90. Annales de la CIPR 33 (2003) n° 1-2

CIPR, Commission internationale de protection radiologique : Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique. Publication CIPR 103, Ann CIPR 37, n° 2-4 (2008)

Iwasaki T, Hishizawa K, Murata M : Mortalité par leucémie et lymphome à proximité des centrales nucléaires au Japon, 1973-1987. J Radiol Prot 15 (1995) 271-288

Jacobi I., Jacobi W., Henrichs K., Barclay D. 1992. Probabilité de cancer du poumon lié à l'exposition professionnelle aux rayonnements des mineurs d'uranium de WISMUT AG. Rapport GSF S-14/92.

Jacobi II : Jacobi W, Roth P : Risque et probabilité de causalité des cancers extrapulmonaires liés à l'exposition aux rayonnements professionnels chez les employés de l'ancienne WISMUT AG. Oberschleißheim 1995. Rapport de recherche commandé par l'Assurance sociale allemande contre les accidents du travail (DGUV). Institut de radioprotection des institutions allemandes d'assurance sociale contre les accidents du travail pour la mécanique de précision, le génie électrique et l'industrie chimique (éd.).

Jöckel KH, Greiser E, Hoffmann W et al. : Évaluation de la qualité épidémiologique des études KiKK commandées par l'Office fédéral de radioprotection (BfS). Hôpital universitaire d'Essen, Centre d'études cliniques d'Essen (ZSKE), 2008.

Johnson KC, Rouleau J : Rejets de tritium de la centrale nucléaire de Pickering et malformations congénitales et mortalité infantile dans les collectivités avoisinantes, 1971-1988. Rapport de recherche préparé pour la Commission de contrôle de l'énergie atomique, Ottawa (Canada). Projet n° 7.156.1 de la CCE, octobre 1991.

Kaatsch P, Kaletsch U, Krummenauer F, Meinert R, Miesner A, Haaf G, Michaelis J : Étude cas-témoins sur la leucémie infantile en Basse-Saxe, Allemagne. Klin Pediatr 208 (1996) 179-185

Kaatsch P et al. Registre allemand des cancers de l'enfant et Institut de biométrie médicale, d'épidémiologie et d'informatique de l'Université Johann Gutenberg de Mayence : Étude épidémiologique sur les cancers de l'enfant à proximité des centrales nucléaires (étude KIKK). Mayence, 2007.

Kaatsch P, Spix C, Jung I, Blettner M : Leucémie chez les enfants de moins de 5 ans vivant à proximité de centrales nucléaires allemandes. Dtsch Arztebl 105/42 (2008) 725-735

Kafka P : Les centrales nucléaires rendent-elles malades ? Dans Peter Kafka/Reinhard Welker (éd.) Dommages biologiques causés par les centrales nucléaires ? 1ère édition, octobre 1985. Brochure disponible auprès du BUND für Umwelt und Naturschutz eV Karlsruhe.

Kaletsch U, Haaf G, Kaatsch P, Krummenauer F, Meinert R, Miesner A, Michaelis J : Étude cas-témoins sur les causes de la leucémie chez l'enfant en Basse-Saxe. Institut de statistiques et de documentation médicales, Université de Mayence, juillet 1995. Financée par le ministère des Affaires sociales de Basse-Saxe.

Kalinkin DE, Karpow AB, Takhauov RM, Samoilova Iua, Shiriaeva IV, Oreshin AA : Mortalité par cancer de la population vivant à proximité d'une grande centrale nucléaire. Vopr Onkol 60 (2014) 41-46

Kater H : Risque accru de leucémie et de cancer dû aux centrales nucléaires ? Nieders. Ärzteblatt 20 (1978) 658-659

Kaul A, Elsässer U, Hinz G, Kossel F, Martignoni M, Nitschke J, Stephan G : Évaluation d'études épidémiologiques sélectionnées sur des groupes exposés aux rayonnements. Office fédéral de la santé, Institut d'hygiène radiologique, ISH Booklet 51, Neuherberg, décembre 1984.

Kemeny JG. Commission présidentielle sur l'accident de Three Mile Island. Pergamon Press, 1979

Kinlen LJ : Preuves d'une cause infectieuse de la leucémie infantile ; comparaison d'une ville nouvelle écossaise avec des sites de retraitement nucléaire en Grande-Bretagne. Lancet 10 déc. 1988 ; 1323-1326

Kinlen LJ, Balkwill A : Causes infectieuses de la leucémie infantile et brassage des populations en temps de guerre dans les Orcades et les Shetland, Royaume-Uni. Lancet 357 (2001) 858

Kinlen LJ : Examen, avec méta-analyse, des études sur la leucémie infantile en relation avec le brassage des populations. Brit J Cancer 107 (2012) 1163-1168

KKW I Michaelis J, Keller B, Haaf G, Kaatsch P : Incidence des cancers infantiles à proximité des centrales électriques d'Allemagne de l'Ouest. Cancer Causes Control 3 (1992) 255-263

KKW II Kaletsch U, Meinert R, Miesner A, Hoisl M, Kaatsch P, Michaelis J : Études épidémiologiques sur la prévalence de la leucémie chez l'enfant en Allemagne. Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire, Bonn, 1997.

Koerblein A, Fairlie I : Une étude Geocap française confirme l'augmentation du risque de leucémie chez les jeunes enfants vivant à proximité des centrales nucléaires. Int J Cancer (2012) 15 déc. ; 131(12) : 2970-1 ; réponse des auteurs : 2974-5. doi : 10.1002/ijc.27585. Publication en ligne : 1er sept. 2012. PMID : 22492475.

Körblein A, Hoffmann W : Cancers infantiles à proximité des centrales nucléaires allemandes. Medicine & Global Survival 6 (1999) 18-23

Körblein A : Malformations congénitales chez les nouveau-nés vivant à proximité des centrales nucléaires bavaroises. Strahlentelex n° 514-515 du 5 juin 2008, p. 1-2

Körblein A : Malformations autour des centrales nucléaires allemandes. Strahlentelex n° 560-561 du 6.05.2010, p. 6-10

Körblein A : Leucémie infantile autour des centrales nucléaires : nouvelle étude épidémiologique française. Strahlentelex n° 602-603 du 2.02.2012, p. 1-3

Koppisch D, Otten H : La contribution des associations d'assurance responsabilité civile des employeurs à la recherche sur le « Wismut ». BG 05 (2005) 291-292

Krestinina IY, Davis F, Ostroumova EV, Epifanova SB, Degteva MO, Preston DL, Akleyev AV : Incidence des cancers solides et exposition aux rayonnements à faible débit de dose dans la cohorte de la rivière Techa : 1956-2002. *Int. J. Epidemiol.* 36 (2007) 1038-1046

Kreuzer M, Walsh L, Schnelzer M et al. : Radon et risque de cancers extrapulmonaires : résultats de l'étude de cohorte des mineurs d'uranium allemands, 1960-2003. *Br J Cancer* 99 (2008) 1946-1953

Kreuzer M, Fenske N, Schnelzer M, Walsh L : Risque de cancer du poumon associé à de faibles taux d'exposition au radon chez les mineurs d'uranium allemands. *Br J Cancer* 113 (2015) 1367-1369

Kreuzer M, Deffner V, Schnelzer M, Fenske N : Mortalité des travailleurs souterrains dans les anciennes mines d'uranium. *Dtsch Arztebl Int* 118 (2021) 41-48

Kuni H : Un groupe de leucémies infantiles à proximité du réacteur de recherche allemand de Jülich. Dans Schmitz-Feuerhake I, Schmidt M (Eds.), *Expositions aux radiations par les installations nucléaires*. Gesellschaft für Strahlenschutz eV, Berlin 1998, p. 251-255

Kuni H, Schmitz-Feuerhake I : Cancer du testicule radio-induit – Une revue systématique. *umg* 35/1 2022, 44-48

Küppers C, Hahn L, Heinzel V, Weil L. Le réacteur expérimental AVR : développement, exploitation, incidents. Rapport final du groupe d'experts AVR. Avril 2014. www.fz-juelich.de

Kusmierz R, Voigt K, Scherb H : Les probabilités de naissance d'un sexe différent sont-elles faussées à proximité des installations nucléaires ? Une approche géo-spatiale et temporelle préliminaire. Dans : Greve K, Cremers AB (dir.), *Actes du 24^e congrès Conférence internationale sur l'informatique pour la protection de l'environnement*, Cologne/Bonn, Allemagne. EnvironInfo 2010. Shaker Verlag, Aix-la-Chapelle, 2010, p. 616-626.

Lange F : Les sites contaminés non dépollués compromettent la revitalisation réussie de la région minière d'Unran en Thuringe orientale. *Strahlentelex* n° 546-547 ; 1er octobre 2009, p. 1-7

Lange, Frank : Supplément spécial : « 30 ans de dépollution des sites miniers d'uranium en Saxe et en Thuringe ». *Ronneburg Radiation Telex*, numéro 2, édition en ligne en noir et blanc du 31 octobre 2021, p. 12-16.
www.kirchengemeinde-ronneburg.de

Lehmann, Frank et al. : Exposition aux rayonnements ionisants lors de l'extraction de minerai d'uranium dans l'ex-RDA. Rapport final sur un projet de recherche. Publié par l'assurance sociale allemande contre les accidents (DGUV) (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften), Sankt Augustin, et l'Association d'assurance responsabilité civile des employeurs de l'industrie minière (Berg-Berufsgenossenschaft), décembre 1998, 484 pages.

Levin RJ, De Simone NF, Slotkin JF, Henson BL. Incidence du cancer de la thyroïde aux alentours de la centrale nucléaire de Three Mile Island : suivi sur 30 ans. *Laryngoscope* 123 (2013) : 2064-71. doi : 10.1002/lary.23953. Publication en ligne : 31 janvier 2013. PMID : 23371046. DOI : 10.1002/lary.23953.

Little MP et 26 auteurs : Revue systématique et méta-analyse des maladies circulatoires liées à l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants et estimations des risques potentiels de mortalité au sein de la population. *Environ Health Perspect* 120 (2012) 1503-1511

MacLeod, G. : Quelques leçons de santé publique tirées de Three Mile Island : une étude de cas en situation de chaos. *Ambio* 10 (1981) 18-22

Mämpel W, Pflugbeil S, Schmitz R, Schmitz-Feuerhake I. : Sous-estimation des risques sanitaires liés à la radioactivité : l'exemple des soldats équipés de radars. Rapports de l'Institut de radioprotection Otto Hug, rapport n° 25 (2015), Société allemande de radioprotection www.strahlenschutz-gesellschaft.de

Mangano JJ, Gould JM, Sternglass EJ, Sherman JD, Brown J, McDonnell W : Réduction de la mortalité infantile et des cancers de l'enfant après la fermeture de centrales nucléaires aux États-Unis. *Arch Environ Health* 57 (2002) 23-31

Reiner, le boucher : 1 500 \$ par jour, en secret. Un consultant britannique en chimie de renommée mondiale a perçu des honoraires d'une filiale de Monsanto pendant des décennies. *Taz am Wochenende*, 9 décembre 2006, n° 8147

Möhner M, Stabenow R : Cancers infantiles autour des installations nucléaires dans l'ex-RDA. *Medical Research* 6 (1993) 59-67

Moormann R, Streich J : Réacteurs à lit de boulets – état des lieux après la publication d'une étude d'experts indépendants sur l'AVR Jülich. Strahlentelex n° 664-665 ; 4.09.2014, p. 1-6

Morris JA, Buckler J : Rétinoblastome associé à la squame marine. Brit Med J 302 (1991) 112

Morris JK, Springett AL, Greenlees R, Loane M, Addor MC, Arrioloa L et al. « Tendances des anomalies congénitales en Europe de 1980 à 2012 ». PLOS One <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194986> 5 avril 2018 : 1-18

Morris MS, Knorr RS : Leucémie de l'adulte et indicateurs indirects d'exposition aux émissions nucléaires de la centrale de Pilgrim. Arch Environ Health 51 (1996) 266-274

Mürbeth S, Rousarova M, Scherb H, Lengfelder E : L'incidence du cancer de la thyroïde a augmenté chez les adultes des pays modérément touchés par les retombées de Tchernobyl. Med Sci Monit 10 (2004) 300-306

Muller HJ : Sur l'effet des rayons X sur le matériel génétique. Radiation Therapy 55 (1936) 207-224

Napier B : Études conjointes américano-russes sur l'exposition de la population aux activités de production nucléaire dans le sud de l'Oural. Health Phys 106 (2014) 294-304

Ministère des Affaires sociales de Basse-Saxe : Rapport sur la mortalité par leucémie en Basse-Saxe, avec une attention particulière portée aux enfants de moins de 15 ans. Réponse à l'allégation d'une forte augmentation des décès par leucémie aux alentours de la centrale nucléaire de Lingen, 1980.

O Donnell RG, Mitchell PI, Priest ND, Strange L, Fox A, Henshaw DL, Long SC : Variations de la concentration de plutonium, de strontium-90 et d'émetteurs alpha totaux dans les dents humaines collectées dans les îles Britanniques : Science Total Environment 201 (1997) 235-243

Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, Sakata R, Sugiyama H, Kodama K. : Études sur la mortalité des survivants des bombardements atomiques, Rapport 14, 1950-2003 : aperçu des cancers et des autres maladies. Radiat Res 177 (2012) 229-243

Paquet F, Bailey MR, Leggett RW, Harrison JD : Évaluation et interprétation des doses internes : incertitude et variabilité. Annales de la CIPR 45 (1 Suppl.) juin 2016 : 202-214

Pierce DA, Preston DL : Risques de cancer liés aux radiations à faibles doses chez les survivants des bombardements atomiques. Radiat Res 154 (2000) 178-186

Pobel D, Viel JF : Étude cas-témoins de la leucémie chez les jeunes vivant près de l'usine de retraitement nucléaire de La Hague : l'hypothèse environnementale revisitée. Brit MJ 314 (1997) 101-106

Prindull G, Demuth M, Wehinger H : Taux de morbidité par cancer chez les enfants vivant à proximité de la centrale nucléaire de Würgassen (RFA). Acta Haematol 90 (1993) 90-93

Queisser-Luft A, Wiesel A, Kaiser M, Stolz G, Mergenthaler A, Spix C : Étude épidémiologique sur les malformations congénitales à proximité des réacteurs nucléaires allemands. Office fédéral de radioprotection 2010 (étude KuKK)

Queisser-Wahrendorf A, Wiesel A, Stolz G : Malformations – fréquences et facteurs de risque. Données actuelles du registre des naissances du modèle Mayence (MaMo). Kinder- und Jugendarzt 47, no. 16/10 (2016) 668-672

Rage E, Richardson PA, Demers M, Do M, Fenske M, Kreuzer M et al. PUMA : analyse groupée des mineurs d'uranium : profil de cohorte. Occup Environ Med 77 (2020) 194-200

Rapport de Mayence 2001 : selon le journal brémois Weserkurier du 29 mai 2001.

Richardson DB et al. : Associations positives entre les rayonnements ionisants et la mortalité par lymphome chez les hommes. Am J Epidemiol 169 (2009) 969-976

Richardson DB, Cardis E, Daniels RD et al. : Risque de cancer lié à l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants : étude de cohorte rétrospective de travailleurs en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis (INWORKS).

BMJ 351 (2015)

<http://www.bmj.com/content/bmj/351/bmj.h5359.full.pdf>

Roman E, Doyle P, Maconochie N, Davies G, Schmitz PG, Beral V : Cancer chez les enfants de travailleurs du nucléaire : rapport sur les enfants de moins de 25 ans issus d'une étude familiale de l'industrie nucléaire. *Brit Med J* 318 (1999) 1443-1450

Ron E, Kleinerman RA, Boice Jr JD, LiVolsi VA, Flannery JT, Fraumeni Jr JF : Étude cas-témoins en population générale sur le cancer de la thyroïde. *JNCI* 79 (1987) 1-12

Ron E, Lubin JH, Shore RE, Mabuchi K, Modan B, Pottern LM, Schneider AB, Tucker MA, Boice JD : Cancer de la thyroïde après exposition à des radiations externes : une analyse groupée de sept études. *Radiat Res* 178 (2012) AV43-AV60

Roy, MA : Fiabilité des coefficients de dose calculés avec le modèle des voies respiratoires de la CIPR. *Radiat Prot Dos* 79 (1998) 237-240

Scherb H, Voigt K, Kusmierz R : Rayonnements ionisants et proportion des sexes à la naissance : synthèse de la littérature et analyses complémentaires de données historiques et récentes. *Early Hum. Dev.* 91 (2015) 841-850

Schmidt M, Ziggel H : La question de savoir si c'est bien ou mal n'est pas du ressort de la science. Elisabeth Reay et Vivian Hope contre British Nuclear Fuels plc. *Strahlentelex* n° 178-179 ; 2 juin 1994, p. 1-6

Schmitz-Feuerhake I, Dannheim B, Heimers A, Oberheitmann B, Schröder H, Ziggel H : Leucémie à proximité d'une centrale nucléaire à eau bouillante allemande : mise en évidence d'une exposition de la population par des études chromosomiques et la radioactivité environnementale. *Environ Health Persp* 105/Suppl.6 (1997)1499

Schmitz-Feuerhake I : Valeurs limites d'émission des dispositions réglementaires nucléaires. Dans Stevenson 2001 (voir ci-dessous), annexe B 2

Schmitz-Feuerhake I, von Boetticher H, Dannheim B, Götz K, Heimers A, Hoffmann W, Schröder H. : Estimation de la surexposition aux rayons X dans un groupe de cas de leucémie infantile par analyse des aberrations chromosomiques. *Radiat Prot Dosim* 2002 ; 98 : 291-297

Schmitz-Feuerhake I., Mietelski, JW, Gaca, P. : Isotopes transuraniens et Teneur en strontium (Sr) dans les poussières des combles à proximité de deux installations nucléaires du nord de l'Allemagne. *Health Physics* 84 (2003) 599-607

Schmitz-Feuerhake I, Dieckmann H, Hoffmann W, Lengfelder E, Pflugbeil S, Stevenson AF : Le foyer de leucémie d'Elbmarsch : existe-t-il des limites conceptuelles au contrôle de l'immission provenant des installations nucléaires en Allemagne ? *Archives of Environmental Contamination Toxicology* 89 (2005) 589-601

Schmitz-Feuerhake I : La recherche passe à côté de l'essentiel. *Strahlentelex* n° 470-471 ; 3 août 2006, p. 1-9

Schmitz-Feuerhake I, Hoffmann W : Le cluster de leucémie de Sittensen – enquête sans conséquences. *KINDER- UND JUGENDARZT* 38 (2007) 816-818

Schmitz-Feuerhake I, Pflugbeil S : Sous-estimation des effets sanitaires de la radioactivité incorporée et conséquences de l'extraction d'uranium par SDAG WISMUT. *Ärzteblatt Thüringen* 7-8 (2008) 413-418

Schmitz-Feuerhake I, Pflugbeil S : Fibrose pulmonaire chez les mineurs de Wismut. *Ärzteblatt Thüringen* 10 (2010) 574-578

Schmitz-Feuerhake I, Frentzel-Beyme R, Wolff R : Maladies professionnelles dues aux rayonnements ionisants – expériences de reconnaissance en Allemagne. *Environmental Medicine Society* 34/2 2021a, 34-51 (également en libre accès)

Schmitz-Feuerhake I, Frentzel-Beyme R, Wolff R : Lymphomes non hodgkiniens et rayonnements ionisants : présentation de cas et revue de la littérature. *Ann Hematol* 08 déc. 2021b en ligne
<https://doi.org/10.1007/s00277-021-04729-z>

Seithe S : La centrale nucléaire désaffectée de Hamm-Uentrop a-t-elle eu un impact sur son environnement ? Expérience menée par des élèves en 2012. Par Samantha Seithe (10 ans, en 5e). Encadrant : Achim Hucke.

Sermage-Faure C, Laurier D, Goujon-Bellec S, Chartier M, Guyot-Goubin A, Rudant J, Hémond D, Chavel J : Leucémies infantiles autour des centrales nucléaires françaises - l'étude Geocap, 2002-2007. Int J Cancer 1er septembre 2012 ; 131 (5):E769-80. est ce que je: 10.1002/ijc.27425. Publication en ligne du 28 février 2012

Spix C, Schmiedel S, Kaatsch P, Schulze-Rath R, Blettner M. : Étude cas-témoins sur le cancer infantile à proximité des centrales nucléaires en Allemagne (1980-2003). Eur J Cancer 44 (2007) 275-284.

Spycher BD, Feller M, Zwahlen M, Rösli M, von der Weid NX, Hengartner H, Egger M, Kuehni CE : Cancers infantiles et centrales nucléaires en Suisse : une étude de cohorte basée sur le recensement. Int J Epidemiol 40 (2011) 1247-1260. doi : 10.1093/ijc/dyr115. Publication en ligne : 12 juillet 2011.

Commission de radioprotection du SSK : Observations sur le projet de recommandations de la CIPR de 2006. Déclaration de la Commission de radioprotection, adoptée lors de la 209e réunion du SSK le 6 septembre 2006. Dans : Recommandations et déclarations de la Commission de radioprotection 2006. Publications de la Commission de radioprotection, volume 61, H. Hoffmann GmbH-Fachverlag, Berlin, 2007.

Commission de radioprotection du SSK : Évaluation de l'étude épidémiologique sur le cancer infantile à proximité des centrales nucléaires (étude KiKK). Rapports du SSK de l'Université de médecine de Berlin, n° 57 (2008). H. Hoffmann GmbH-Fachverlag, Berlin

Commission de radioprotection du SSK : Facteur d'efficacité de la dose et du débit de dose (DDREF). Recommandation de la Commission de radioprotection, avec justification scientifique, adoptée lors de la 268e séance du SSK le 13 février 2014. Journal officiel fédéral AT 03 mai 2016 B4

Commission de radioprotection du SSK : Recherche sur les causes de la leucémie chez l'enfant et l'adolescent. Recommandation du SSK, adoptée lors de sa 288e réunion, les 19 et 20 juin 2017.

Commission de radioprotection de la SSK : Base de fixation des valeurs limites pour les personnes exposées professionnellement. Recommandation de la Commission de radioprotection avec justification scientifique. 7 septembre 2018

Stabenow, R. 2007. Risque de cancer dans les communautés de l'ancienne zone d'extraction d'uranium de Wismut. Gera, 4 juillet, événement organisé par l'IPPNW et le Centre des tumeurs du Waldklinikum : « Risque de cancer lié à l'extraction d'uranium de Wismut ».

Stather JW : Leucémie infantile à proximité des sites nucléaires : quatorzième rapport du Comité sur les aspects médicaux des rayonnements dans l'environnement (COMARE). Radiat Prot Dosimetry 147 (2011) 351-354

Office statistique de l'État de Hambourg. Documentation sur le cancer à Hambourg, 1972-1974. Numéro 116 (1976)

Stein, Bernhard : Mortalité par cancer chez les enfants de moins de 15 ans, mortalité infantile et taux de mortalité aux alentours de la centrale nucléaire de Lingen. Groupe de travail pour la protection de l'environnement de Berlin (E.V.), autoédition, Berlin, 1988.

Stevenson, Abraham FG : Rapport radiobiologique visant à déterminer l'état des connaissances scientifiques et la fiabilité de la réglementation en matière de radioprotection, en particulier concernant l'exposition à la radioactivité à proximité des centrales nucléaires et la question de l'induction de leucémies infantiles par les radiations. Commandé par : Ministère des Finances et de l'Énergie du Land de Schleswig-Holstein. Annexes B1 à C2. Kiel, avril 2001.

Stewart A, Webb J, Giles D, Hewitt D : Affections malignes de l'enfant et irradiation diagnostique *in utero* Lancet 1956;2:447

Strahlentelex n° 358-359, du 6 décembre 2001, p. 9 : Le tribunal maritime de Hambourg examine l'affaire Sellafeld. www.strahlentelex.de

Strahlentelex n° 706-707, daté du 2 juin 2016, p. 6 : Radioactivité délibérément libérée d'un réacteur à lit de boulets en 1986. www.strahlentelex.de

Strahlentelex n° 630-631, daté du 4 avril 2013, p. 10 : Travailleurs temporaires dans les centrales nucléaires allemandes www.strahlentelex.de

The Guardian, mercredi 21 septembre 2011 : La fuite de combustible nucléaire écossaise « ne sera jamais complètement nettoyée ».
L'Agence écossaise de protection de l'environnement a renoncé à son objectif d'éliminer toute trace de contamination des fonds marins au large des côtes nord. Par Rob Edwards

Tweeddale G : Héros ou vilain ? – Sir Richard Doll et le cancer professionnel. *Int J Occup Environ Health* 13 (2007) 233-235

Ulanowski A, Shemiakina E, Gütthlin D, Becker J, Preston D, Apostoaei AJ, Hoffman FO, Jacob P, Kaiser JC, Eidemüller ME : ProZES : méthodologie et outil logiciel pour l'évaluation de la part attribuable aux rayonnements dans la probabilité de survenue d'un cancer. *Radiat Environ Biophys* 59 (2020)

Communiqué de presse (131128) du ministère de l'Environnement de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, du 18 novembre 2013 : Le ministère de l'Environnement présente un rapport sur le lien possible entre les cas de cancer et l'ancien réacteur THTR de Hamm. L'analyse du registre épidémiologique du cancer de Rhénanie-du-Nord-Westphalie ne révèle aucune influence sur l'incidence du cancer dans la population environnante.

UNSCEAR (Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants) : Sources et effets des rayonnements ionisants. Rapport de l'UNSCEAR à l'Assemblée générale de 1993, avec annexe scientifique. Nations Unies, New York, 1993.

UNSCEAR (Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants) : Effets héréditaires des rayonnements. Rapport de l'UNSCEAR 2001 à l'Assemblée générale, Nations Unies, New York, 2001.

UNSCEAR (Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants). UNSCEAR 2008, Rapport à l'Assemblée générale avec annexes scientifiques, vol. II, annexe D (Effets sanitaires des rayonnements de l'accident de Tchernobyl), rectificatif au document n° E.11.IX.3 du 18 mai, page 183, § D251, Nations Unies, New York, 2011.

Atlas de l'uranium. Données et faits sur la matière première de l'ère atomique. Fondation pour un avenir sans nucléaire, Fondation Rosa Luxemburg, Fondation environnementale Greenpeace, Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature et .ausgestrahlt (dir.). Berlin, 2e éd., avril 2022, 60 p. www.rosalux.de/uranatlas ; www.nuclearfree.com/uranatlas ; www.bund.net/uranatlas

Vakil C, Harvey L : Une étude canadienne sur le tritium induit le public en erreur. Lettre à la rédaction, concernant : Wanigaratne et al. 2013. *Maladies chroniques et traumatismes Canada* 34 (2014) 175

Van Santen F, Irl C, Grosche B, Schoetza A : Enquête sur la fréquence des tumeurs malignes et des malformations congénitales chez les enfants vivant à proximité des installations nucléaires bavaroises. Rapport de l'Office fédéral de radioprotection (BfS) de novembre 1995.

Beaucoup, Jean-François : La SANTÉ PUBLIQUE ATOMISÉE. Radioactivité et leucémies : les leçons de la Hague. Paris : La Découverte, 1998 (Sciences et société) ISBN 2-7071-2827-9

Vogel F, Röhrborn G, Schleiermacher E, Schroeder T : Génétique des rayonnements des mammifères. Thième, Stuttgart, 1969

Wallraff, Günter : Au fond. Avec une documentation des conséquences. 23e éd. 2015. Kiepenheuer & Witsch, Cologne

Walsh L, Tschense A, Schnelzer M, Dufey F, Grosche B, Kreuzer M : L'influence de l'exposition au radon sur la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium allemands, 1946-2003 : *Radiat Res* 173 (2010) 79-80

Walsh L, Dufey F, Möhner M, Schnelzer M, Tschense A, Kreuzer M : Différences de mortalité par cancer du poumon à l'inclusion entre la cohorte des mineurs d'uranium allemands et la population de l'ancienne République démocratique allemande (1960-2003). *Radiat Environ Biophys* 50 (2011) 21-35

Wanigaratne S, Holowaty E, Jiang H, Norwood TA, Pietrusiak MA, Brown P : Estimation de l'exposition au tritium liée au fonctionnement normal d'une centrale nucléaire à Pickering, en Ontario. *Maladies chroniques et traumatismes Canada* 33 (2013) 247-256

Wassermann O et al. Conclusions de la Commission d'experts du Schleswig-Holstein sur la leucémie (1993-2004) concernant l'étiologie du regroupement de cas de leucémie infantile à proximité des installations nucléaires de Geesthacht. Rapport final du président, le professeur émérite Otmar Wassermann, en date du 15 septembre 2004. www.strahlenschutz-gesellschaft.de

Weiss W : Cancer de la thyroïde lié à Tchernobyl : bilan de suivi sur 30 ans. *Radiat Prot Dosimetry* 182 (2018) 58-61

Wiesel A, Stolz G, Queisser-Wahrendorf A : Existe-t-il des preuves d'un risque tératogène chez la descendance du personnel de santé exposé aux rayonnements ionisants ? *Birth Defects Research (Partie A)* 106 (2016) 475-479

Wing S, Richardson D, Armstrong D, Crawford-Brown D : Réévaluation de l'incidence du cancer à proximité de la centrale nucléaire de Three Mile Island : confrontation des données probantes et des hypothèses. *Environ Health Perspective* 105 (1997) 52-57

Wing S : Objectivité et éthique en sciences de la santé environnementale. *Environ Health Persp* 111 (2003) 1809-1818

Wolff R, Frentzel-Beyme R, Schmitz-Feuerhake I : Forte prévalence de leucémie lymphoïde chronique et de lymphomes à cellules B chez les travailleurs du nucléaire après incorporation d'émetteurs alpha. Étude de cas et revue de la littérature. Actes de la conférence RAD, vol. 3 (2018) 143-148 <https://rad-proceedings.org/paper.php?id=196>

Données du registre du cancer du ZKD : Le cancer en Allemagne pour 2013/2014. 11e édition. Institut Robert Koch, Berlin, 2017. www.gekid.de

Données du registre du cancer du ZKD : Le cancer en Allemagne pour 2017/2018. 13e édition. Institut Robert Koch, Berlin, 2021, p. 126. www.gekid.de

À propos des auteurs :

Oda Becker, docteure en physique (Hanovre), experte indépendante en sûreté et risques liés aux installations nucléaires. Présidente de la Commission nucléaire et radiologique du BUND (Amis de la Terre Allemagne).

Prof. Dr méd. Wolfgang Hoffmann, Greifswald, Institut de médecine communautaire, médecine universitaire de Greifswald

Docteure en sciences naturelles Inge Schmitz-Feuerhake, Hanovre, retraitée, professeure de physique expérimentale à l'université de Brême de 1973 à 2000

Karin Wurzbacher, diplômée en physique de Starnberg, retraitée, employée de l'Institut environnemental de Munich jusqu'en 2012

Les travaux de recherche et d'élaboration scientifiques présentés dans cet article ont été menés par les auteurs susmentionnés, membres de la Commission allemande de l'énergie atomique et des rayonnements (BASK) de la Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND). Cet organisme regroupe des scientifiques nommés par le conseil exécutif fédéral de la BUND et chargés de fournir des conseils d'experts à l'organisation.

6. Glossaire

Brûler	La quantité d'énergie thermique générée par unité de masse dans un élément combustible, mesurée en gigawatt-jours par tonne de métal lourd (GWj/t SM), est un rayonnement de
Rayons alpha	particules composé de noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons) et est produite lors de la désintégration des noyaux atomiques.
enrichissement	Dans les réacteurs à eau légère, l'isotope d'uranium fissile U 235 doit être enrichi dans le mélange isotopique pour que la réaction en chaîne puisse se produire.
Traitement	Afin d'extraire l'uranium du minerai pour l'utiliser dans le réacteur nucléaire, il est nécessaire
Rayons bêta	extraits chimiquement Les électrons sont des électrons (chargés négativement) qui sont créés dans le noyau atomique en convertissant un neutron en un proton et un électron, ce dernier quittant le noyau.
Ventilation	ventilation artificielle des galeries de mines souterraines
BfS	Office fédéral de radioprotection, autorité fédérale scientifique et technique indépendante relevant du ministère fédéral de l'Environnement ; Association d'assurance responsabilité
BG	civile des employeurs, société publique
BKV	L'ordonnance sur les maladies professionnelles régit les maladies liées au travail décrites par l'assurance accident du travail obligatoire (GUV).
chromosome	Le matériel génétique de chaque cellule est organisé en chromosomes. Chaque chromosome contient un segment spécifique d'ADN.
Confusion	Un facteur qui détermine simultanément la survenue d'un facteur de risque et l'effet observé.
dominant	Chez l'humain, chaque gène existe en deux exemplaires, et ces deux exemplaires peuvent différer (allèles). Un caractère déterminé par un seul gène est dit « dominant » s'il s'exprime et que l'autre gène est inactif (gène récessif).
syndrome de Down	également connue sous le nom de « trisomie 21 », où un chromosome 21 supplémentaire apparaît dans le génome.
Réacteur à eau pressurisée	Réacteur à eau légère de type ; l'eau chauffée est stockée sous vide. à une pression si élevée qu'il ne peut s'évaporer
embryon	Stade prénatal du fœtus entre le 16e et le 60e jour après la fécondation ;
Épidémiologie	médecine, science qui étudie la répartition des maladies, leurs causes et leurs conséquences au sein de la population.
Dosimètre à film	dosimètre individuel, dans lequel un film optique est utilisé comme mesure de l'intensité du rayonnement.
fœtus	également « fœtus », stade prénatal du fœtus entre le 61e jour et la naissance
produit successeur,	La matière radioactive est créée lorsqu'un noyau atomique instable se transforme en un isotope d'un autre élément, lui-même instable, en émettant des protons (rayons alpha) ou des électrons (rayons bêta).
rayons gamma	rayonnement d'ondes électromagnétiques à haute fréquence émis lors de la décroissance de des noyaux atomiques sont libérés

gène	L'information codée dans l'ADN est présente dans le génome sous forme d'unités contenant des informations individuelles pour un caractère spécifique de l'organisme. Ces unités sont appelées « gènes ».
Gy (Gris)	L'unité de dose énergétique est définie comme l'énergie absorbée par rayonnement par unité de masse tissulaire ; 1 Gy = 1 joule/kg
Demi-vie	le temps nécessaire pour qu'un isotope radioactif se désintègre de moitié.
in utero	dans l'utérus (matrice)
Incorporation	Ingestion de substances par voie respiratoire ou œsophagienne, ainsi que par voie cutanée ou par des blessures.
Incidence	Prévalence de la maladie dans une population spécifique au cours d'une période spécifique
Isotopes	Les différents types d'atomes d'un même élément chimique diffèrent par le nombre de neutrons présents dans leur noyau atomique.
combustible nucléaire	Matériaux utilisés dans les centrales nucléaires contenant des substances fissiles à neutrons telles que l'isotope d'uranium 235 ou l'isotope de plutonium 239, ou le thorium naturel 232
réacteur nucléaire	Un réacteur nucléaire est un dispositif servant à amorcer, entretenir et contrôler une réaction en chaîne de fission. Ses principaux composants sont la zone de fission contenant le combustible nucléaire, le fluide caloporteur pour dissiper la chaleur produite, les dispositifs de contrôle et de sécurité, et le blindage contre les radiations.
Criticité	Ceci est réalisé dans le réacteur lorsque la fission nucléaire amorcée par les neutrons est suffisante pour libérer suffisamment de neutrons supplémentaires pour maintenir le processus de fission en cours (réaction en chaîne).
durable	est un isotope radioactif à longue demi-vie
Réacteur à eau légère	Dans ce type de réacteur, l'eau normale (légère) sert de modérateur et liquide de refroidissement
Excursion de spectacle	une augmentation incontrôlée de la puissance dans un réacteur nucléaire, qui conduit à sa destruction. peut conduire à
facteur létal	Mutation induite dans un chromosome qui entraîne la mort du zygote ; en
signifier	arithmétique, somme des valeurs individuelles divisée par leur nombre
médian	également « moyenne géométrique », valeur la plus fréquente dans une distribution de valeurs individuelles
Modérateur	Substance présente dans les centrales nucléaires, utilisée pour ralentir et ainsi réduire l'énergie des neutrons présents.
MOX	Oxyde mixte d'uranium et de plutonium destiné à être utilisé comme combustible nucléaire
Uranium naturel	Isotopes de l'uranium présents dans la croûte terrestre dans leur composition naturelle
Neutrons	éléments constitutifs non chargés du noyau atomique
dosimètre optique	Dosimètre personnel adapté à la lecture directe
périnatal	Entre la naissance et le 7e jour de vie, les éléments
protons	constitutifs chargés positivement du noyau atomique

plutonium	Un élément lourd qui n'existe pas à l'état naturel et qui est créé (produit) dans un réacteur en bombardant de l'uranium avec des neutrons.
Phase préimplantatoire	stade prénatal, développement de l'ovule fécondé jusqu'à Implantation dans l'utérus
radon(Rn)	Produit de désintégration gazeux de la chaîne de désintégration de l'uranium (U) 238 ou du thorium (Th) 232 ; l'isotope le plus abondant à l'état naturel, le Rn 222 (demi-vie de 3,8 jours), est produit directement à partir du radium 226 (demi-vie de 3 600 ans) et est un émetteur alpha.
récessif	Chez l'humain, chaque gène existe en deux exemplaires, et ces deux exemplaires peuvent différer (allèles). Un caractère héréditaire déterminé par un seul gène est dit « récessif » s'il ne s'exprime pas parce que l'autre gène est dominant. Risque relatif :
RR	nombre de cas observés / nombre de cas attendus
réacteur à eau bouillante	type réacteur à eau légère MONSIEUR
Produit fractionné	Taux d'incidence standardisé : rapport des taux d'incidence standardisés selon l'âge dans le groupe d'étude et le groupe témoin
SMR	isotope majoritairement radioactif produit par fission nucléaire avec des neutrons ; taux de mortalité standardisé : rapport des taux de mortalité standardisés selon l'âge du groupe d'étude et du groupe témoin
SSK	Commission allemande de radioprotection, conseil auprès du ministère fédéral de l'Environnement. Unité de dose d'irradiation radioactive chez l'homme, servant de mesure de l'effet biologique ; elle est calculée à partir de la dose absorbée en Gy, pondérée (multipliée) par un facteur w_R , qui évalue l'effet biologique du type de rayonnement respectif par rapport aux rayons X : $1 \text{ Sv} = 1 W_{RX} \text{ Gy}$
Sv (Sievert)	
transuranien	élément produit artificiellement avec un nombre de protons n supérieur à celui de l'uranium (n = 92)
Tritium	Isotope radioactif de l'hydrogène, émetteur bêta, son noyau atomique est composé d'un proton et de deux neutrons.
Zone de confiance	Intervalle d'incertitude pour un er déterminé par une méthode statistique résultat ; il indique la plage de valeurs dans laquelle se situe le résultat en fonction de la probabilité, par exemple 90, 95 ou 99 %.
Probabilité de causalité	Probabilité que les rayonnements ionisants détruisent l'original La cause de la maladie est
Retraitement	à partir d'éléments combustibles usés provenant de centrales nucléaires, dans le processus de dé-Uranium et plutonium usés séparés d'une cellule
zygote	d'œuf fécondée