

Leucémie infantile et centrales nucléaires: faut-il – **oui ou non** – s'inquiéter?

Bases, études, analyses



**«Leucémie infantile et centrales nucléaires:
faut-il – oui ou non – s’inquiéter?»**

En réponse au vif intérêt suscité par l’ouvrage, le FME a publié une deuxième édition de sa brochure «Leucémie infantile et centrales nucléaires: faut-il – oui ou non – s’inquiéter?» qui présente un aperçu de la recherche actuelle dans ce domaine.

«Une excellente brochure.»

Alan Niederer, Rédaction NZZ Science

**«Représentation nécessaire, objective et fidèle
des faits pertinents.»**

Académie suisse des sciences médicales (ASSM)

**«Nous aimerions mettre en avant la brochure
publiée par le Forum suisse Médecine et Énergie
(FME) qui nous semble expliquer de manière
très compréhensible et équilibrée toute la problé-
matique [leucémie infantile et centrales nucléaires;
complément FME].»**

*Dr Peter Kaatsch, Directeur du registre allemand des
cancers infantiles, Mayence*

Table des matières

	Avant-propos	
	Prof. Dr. Ralph Eichler, Président de l'ETH de Zurich	4
1	Résumé des principaux aspects	5
2	Introduction	6
3	Doses de rayonnement et leucémie – ce que nous enseigne l'histoire	7
3.1	L'époque pionnière des rayons X	7
3.2	Hiroshima et Nagasaki	9
3.3	Tchernobyl	10
4	Radioactivité et mesures de protection	12
4.1	Rayonnements ionisants: mesure et effet biologique	12
4.2	Dispositions légales en matière de radioprotection et surveillance de la radioactivité	13
4.3	Dose annuelle moyenne reçue par la population suisse et comparaison avec la part imputable aux centrales nucléaires	14
5	Leucémie infantile et rayonnement	16
5.1	Pathologie de la leucémie infantile	16
5.2	Etat actuel des recherches concernant les causes	17
5.3	Opinions actuelles concernant l'apparition de la leucémie	19
6	Etudes épidémiologiques ayant trait aux centrales nucléaires	20
6.1	Etudes épidémiologiques	20
6.2	KiKK, étude sur la leucémie infantile à proximité des centrales nucléaires en Allemagne (2007)	22
6.3	Aperçu des études réalisées jusqu'ici dans ce domaine	23
6.4	Vue d'ensemble des méta-études publiées jusqu'à ce jour	25
6.5	Etudes épidémiologiques concernant d'autres causes	26
7	Résumé	27
7.1	Evaluations et déductions	27
7.2	Conclusions	29
8	Annexes	29
8.1	Glossaire	29
8.2	Autres sources	33
8.2.1	Bases générales	33
8.2.2	Aperçu des principales études épidémiologiques	33
8.3	Autres liens	34
	Impressum	35

Avant-propos

Le fait que les rayons X et de téléphonie mobile ainsi que les rayons cosmiques ne puissent être perçus par les organes de nos sens est source de crainte chez de nombreux individus et laisse place à des pulsions affectives. La présente étude prend ces préoccupations au sérieux, invite les lectrices et lecteurs à une réflexion fondée sur la connaissance et leur donne la possibilité de se faire leur propre opinion sur ce thème.

Une base importante de l'entendement scientifique occidental est le présupposé selon lequel tout effet a une cause. Des méthodes statistiques nous permettent de mettre en avant les corrélations existantes – mais en prenant des précautions: des corrélations élevées entre deux phénomènes ne constituent pas toujours des relations causales, même si elles sont calculées statistiquement de manière correcte. L'exemple suivant le montre bien: on peut montrer statistiquement que le salaire moyen des hommes sera d'autant plus élevé qu'ils auront moins de cheveux sur le crâne. La cause du revenu plus élevé ne tient pourtant pas à la pousse des cheveux, qui sont plus clairsemés, mais à l'âge plus élevé des hommes, car il peut être à la fois la raison des cheveux plus rares et d'un salaire moyen plus élevé.

Dans notre monde, où tout est réglementé juridiquement, nous avons soif d'affirmations absolues sur les risques. Les progrès de la technique et de la médecine permettent d'avoir des méthodes de mesure toujours plus sensibles. Elles favorisent la quête sociale d'une diminution permanente des valeurs de tolérance autorisées par la loi. En physique toutefois, la grandeur de mesure zéro n'existe pas: la seule conclusion correcte est qu'un effet est plus petit que la précision de mesure de l'instrument utilisé ou de la méthode appliquée.

Ainsi, il subsistera toujours des incertitudes dans un monde réglementé juridiquement, toujours mieux compris scientifiquement et plus contrôlé techniquement. A l'avenir également, chacun devra se faire son opinion et son jugement personnels sur les incertitudes et les ignorances. Plus on comprendra soi-même, plus il sera simple de se faire une opinion personnelle du risque que l'on est prêt à accepter pour soi.

Prof. Dr. Ralph Eichler, Président de l'ETH de Zurich

1 Résumé des principaux aspects

L'objectif de la présente brochure est de donner aux lectrices et aux lecteurs la possibilité de se forger leur propre jugement sur ce thème. Les auteurs s'efforcent donc d'avoir un discours clair et compréhensible. Il n'a toutefois pas été possible d'éviter l'usage de certaines notions techniques. Elles sont indiquées en *italique dans le texte* et expliquées dans un glossaire à partir de la page 29.

Ce chapitre résume les informations les plus importantes de la brochure. Vous trouverez des informations détaillées dans les chapitres correspondants.

Mesures de protection et radioactivité

L'homme est constamment et en tous lieux exposé à l'action de radiations *ionisantes*. A chaque seconde des milliers de particules subatomiques se déplaçant à grande vitesse ainsi que des paquets *d'ondes électromagnétiques* traversent le corps. Différentes sources génèrent des doses de rayonnement radicalement diverses.

La dose annuelle moyenne reçue par la population helvétique s'élève à *4 millisieverts* (mSv). Cette dose se compose du rayonnement cosmique (0,35 mSv), du rayonnement terrestre (0,45 mSv), du gaz *radon* dans les lieux d'habitation (1,6 mSv), du potassium-40 que le corps intègre avec l'alimentation (0,35 mSv), du radiodiagnostic médical (1,2 mSv) ainsi que des centrales nucléaires (0,001-0,005 mSv).

Le droit suisse mentionne pour la première fois la radioprotection dans la loi fédérale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique et la protection contre les radiations (1959). Fondée sur cette loi paraît ensuite, en 1963, la première ordonnance concernant la protection contre les radiations. La législation actuelle est extrêmement détaillée: elle comprend la loi sur la radioprotection (LRaP 814.50) et l'ordonnance y relative (ORaP 814.501), ainsi que d'autres ordonnances et directives.

La CIPR (Commission on Radiological Protection ou Commission internationale de protection radiologique) a été fondée en 1928 afin de garantir la protection contre les effets néfastes des radiations *ionisantes*. Celle-ci publie depuis 1950 des recommandations reposant sur des bases scientifiques reconnues dans le monde entier.

Doses de rayonnement et risque de cancer

Après une certaine période de *latence*, les radiations *ionisantes* augmentent la probabilité de contracter un cancer. Cette période de *latence* est de 3 à 6 ans pour la leucémie, et de 10 à 20 ans pour les tumeurs solides. La probabilité

de développer un cancer radio-induit est proportionnelle à la dose de rayonnement reçue.

Le risque de cancer radio-induit s'élève à environ 5 à 10% par sievert et vaut approximativement dans une fourchette comprise entre 3 sieverts et 0,05 Sv (50 mSv). Concernant les doses encore moins importantes, on adopte l'hypothèse préventive que ce *facteur de risque* est encore présent et qu'il n'existe pas de seuil en-dessous duquel les effets de l'irradiation seraient nuls. Le *facteur de risque* signifie concrètement que, par exemple, dans un groupe de 1000 personnes exposées à une dose de 100 mSv, il faudrait faire face à 4,1 cas de cancer mortels supplémentaires.

Les doses limites du rayonnement généré par l'homme ont été fixées, à l'échelle internationale, sur la base du *facteur de risque* mentionné ci-dessus (sauf charges occasionnées par les utilisations médicales ainsi que le rayonnement naturel). Depuis 1990, celles-ci se chiffrent à 20 mSv par an pour les personnes professionnellement exposées aux radiations et à 1 mSv par an pour la population.

La dose de rayonnement générée par les centrales nucléaires est nettement inférieure à celle des autres rayonnements. Elle est également inférieure aux variations locales ou temporelles de l'exposition globale aux radiations. Elle ne peut donc guère être responsable d'une *incidence* médicalement significative comme, par exemple, de l'augmentation du risque de leucémie infantile à proximité des centrales nucléaires.

Leucémie infantile et ses causes

Chaque année, quelque 50 à 60 enfants sont atteints de leucémie en Suisse. Ce chiffre correspond à 5 nouveaux cas de leucémie pour 100'000 enfants âgés de moins de 15 ans. Plusieurs milliers d'enfants sont concernés chaque année dans le monde. Au cours des 30 dernières années, les statistiques montrent une légère augmentation de la fréquence des leucémies chez les enfants.

Les enfants de tous âges peuvent être atteints de leucémie. Le groupe d'âge le plus souvent concerné est cependant celui des enfants de 2 à 5 ans. Les garçons sont légèrement plus souvent touchés que les filles. En l'absence de traitement, la maladie est mortelle. Grâce à la *chimiothérapie* moderne, le taux de guérison a pu être très sensiblement amélioré au cours des années passées. Quatre enfants sur cinq présentant une *leucémie lymphatique aiguë* sont aujourd'hui guéris à long terme.

On ne connaît pas la cause exacte de la leucémie infantile. On sait cependant que certains stades précurseurs de la leucémie peuvent exister avant même la naissance, peut-être en raison de modifications génétiques au sein des leucocytes immatures. Après la naissance, ces globules blancs déjà endommagés sont susceptibles de subir encore

d'autres transformations. Il est probable que des infections à un très jeune âge, qui provoquent des troubles supplémentaires de la maturité dans les cellules sanguines altérées, jouent un rôle. Si ces globules blancs ne sont pas détruits par le corps lui-même, ceux-ci peuvent provoquer une leucémie.

Etudes épidémiologiques

L'épidémiologie est l'étude des maladies dans des groupes entiers de la population. Pour ce faire, on évalue les relevés statistiques existants et on organise parfois également des enquêtes auprès de patients et dans les hôpitaux. Si, dans le contexte d'une cause supposée, il résulte des proportions numériques qui ne peuvent plus être expliquées par le seul hasard, il est possible que celles-ci soient liées à la maladie mais cela ne constitue encore nullement une preuve définitive.

Une étude publiée en 2007 en Allemagne a mis en évidence un lien statistique entre la proximité d'une habitation par rapport à la centrale nucléaire la plus proche au moment du diagnostic, et le risque de contracter un cancer (leucémie par ex.) avant le cinquième anniversaire. Cette relation ne vaut que pour les cinq premiers kilomètres. Selon les auteurs de l'étude – et l'évaluation finale émise par la Commission nucléaire allemande – tout comme sur la base des acquis radiobiologiques et épidémiologiques actuels, le rayonnement *ionisant* émis par les centrales nucléaires allemandes en exploitation normale ne peut pas, en principe, être interprété comme une cause. On n'a pas pu répondre définitivement, dans cette étude, à la question de savoir si d'autres facteurs jouaient un rôle dans la tendance observée en relation avec la distance.

Il est possible que le brassage des populations constitue une explication à l'*incidence* partiellement plus élevée de la leucémie infantile à proximité des centrales nucléaires. Celles-ci sont souvent édifiées dans les zones rurales. Les immigrés se mélangent à la population autochtone et introduisent des agents pathogènes. C'est un phénomène qui nous est également familier dans d'autres lieux et à d'autres époques.

Evaluations et déductions

La totalité des études réalisées dans le monde montre que l'existence d'un risque plus élevé de leucémie à proximité des centrales nucléaires n'est pas une conclusion de portée générale. Dans la majorité des lieux d'implantation de centrales nucléaires, soit aucune *incidence* plus élevée des cas de leucémie n'a été constatée, soit celle-ci n'a pas pu être confirmée à l'occasion d'autres observations. Autour d'implantations isolées, il existe une augmentation de la fréquence des cas, mais le nombre absolu de ces cas se situe dans une proportion également constatée pour d'autres risques.

2 Introduction

Leucémie infantile et centrales nucléaires. Faut-il – ou non – s'inquiéter?

La leucémie infantile est une maladie dont l'issue peut être mortelle. Elle atteint le plus souvent les enfants âgés de deux à cinq ans. Il n'existe pas d'étude complète sur les causes ou facteurs pouvant déclencher la maladie. L'incertitude qui en découle laisse de l'espace aux spéculations. La recherche des causes présume, entre autres, que les *champs électromagnétiques* générés par les lignes aériennes à haute tension ou les antennes pourraient jouer un certain rôle. Mais les substances chimiques et autres facteurs sont également cités parmi les causes possibles de la maladie. Différentes études ont examiné ces relations d'ensemble sans fournir une force probante suffisante.

Il existe une autre hypothèse, selon laquelle les centrales nucléaires et le rayonnement qu'elles génèrent seraient responsables de l'apparition de la leucémie infantile. Dernièrement, une étude réalisée en Allemagne et publiée fin 2007 sur ce thème a fait couler beaucoup d'encre. Des articles quelque peu inquiétants ont également été publiés dans les médias suisses. Suite à ces publications, des interventions politiques ont été faites au Parlement fédéral, et une étude suisse (étude CANUPSIS) a été lancée sur sujet. Cette incertitude politique est-elle fondée? Les soucis et peurs de la population ont-ils une raison d'être? Que sait-on aujourd'hui de l'apparition de la leucémie chez l'enfant et à quels résultats les études publiées sur ce thème jusqu'à ce jour parviennent-elles? La présente brochure souhaite répondre à ces questions.

Présentation objective des résultats

Depuis plus de 25 ans, le «Forum Médecine et Énergie» (FME) traite les thèmes qui se situent à l'interface entre énergie et santé. Le FME s'est donné comme objectif d'informer population et politiciens de manière objective et équilibrée, y compris sur des questions controversées. Pour cette raison, le comité du FME a décidé début 2008 de mettre sur pied un groupe de travail chargé de l'évaluation fondamentale du thème «leucémie infantile et centrales nucléaires» et d'en présenter les résultats dans une documentation à la fois complète et compréhensible. En effet, le FME est d'avis que la population et tous les milieux intéressés ont droit à une information objective et neutre. Ce n'est pas toujours parfaitement possible, car le débat

sur un éventuel rapport entre l'apparition de la leucémie infantile et les centrales nucléaires ne prend pas place dans le vide mais dans un contexte de politique énergétique sur fond de pragmatisme: concrètement, il s'agit de savoir si l'énergie nucléaire doit rester une composante de l'approvisionnement en énergie. Comme c'est souvent le cas dans les débats politiques, les arguments sont formulés avec passion ou ne sont pas présentés de manière objective. La thèse selon laquelle les centrales nucléaires seraient responsables de la leucémie infantile est souvent utilisée pour lutter contre l'énergie nucléaire. Déterminer si et dans quelle mesure cet argument est pertinent, cela mérite, au-delà de la dispute politique, une interprétation fondée et objective. Il y va finalement de la santé de nos enfants.

Présentation de la brochure

L'objectif de la présente brochure est de permettre aux lectrices et aux lecteurs de se forger un jugement autonome sur ce thème. Pour ce faire, certaines connaissances préliminaires sont nécessaires, et les trois premiers chapitres de cette brochure s'emploient à les transmettre sous une forme condensée.

Le troisième chapitre commence, aux yeux de l'observateur contemporain, par un regard sur l'histoire et sur la manipulation relativement négligente de la radioactivité et du rayonnement *ionisant* pendant «l'époque pionnière» du début du XX^{ème} siècle. Suite au bombardement du Japon à la fin de la Seconde Guerre mondiale, a commencé une longue enquête sur les effets du rayonnement *ionisant* sur les survivants. Celle-ci est toujours en cours. La catastrophe de Tchernobyl a, elle aussi, coûté des vies humaines qui, en raison des dommages consécutifs, entraînera vraisemblablement la mort précoce de plusieurs milliers de survivants. Les enseignements tirés de ces événements tragiques, ainsi que de nombreuses autres enquêtes, ont donné une image relativement nette de l'effet du rayonnement *ionisant*.

Le chapitre 4 explique ce qu'est réellement le rayonnement *ionisant* ou la radioactivité, leur effet et la manière de les mesurer. Nous sommes constamment exposés à ce rayonnement, des substances radioactives étant même présentes dans le corps humain. La dose reçue détermine le risque d'une maladie causée par le rayonnement ou le risque d'une malformation génétique. Nous décrivons, en outre, les principes de la législation suisse sur la radioprotection.

Le cinquième chapitre se consacre exclusivement à la leucémie infantile. Il explique d'abord la maladie et ses symptômes avant de résumer l'état actuel de la recherche sur les causes potentielles et les *facteurs de risque* connus jusqu'ici. Enfin, l'explication actuellement la plus courante concernant l'apparition de la leucémie sera présentée.

Armé de ces connaissances, le lecteur sera en mesure de se pencher sur le sujet principal de cette brochure: existe-t-il un risque majeur de contracter la leucémie pour les enfants vivant à proximité d'une centrale ou d'un réacteur nucléaire? Le sixième chapitre expose des *études épidémiologiques* concernant ce sujet, dans le but de répondre à cette question. Il est centré sur l'étude allemande publiée fin 2007 tandis qu'y sont également résumées d'autres *études épidémiologiques* réalisées au cours des 30 dernières années. Ce chapitre se consacre également aux *méta-études* et à la question des déductions qu'il est possible d'en tirer. Il se termine par un résumé des résultats fournis jusqu'à ce jour par des *études épidémiologiques* non focalisées sur les centrales nucléaires.

Le septième et dernier chapitre présente une synthèse des résultats obtenus et procède à leur évaluation. La conclusion présente également l'évaluation des résultats de la perspective adoptée par le groupe de travail.

Les termes techniques ou étrangers sont expliqués dans le glossaire joint en annexe. On y trouvera également une liste des ouvrages de référence et des études publiées sur le sujet qui permettront au lecteur intéressé d'approfondir le sujet.

3 Doses de rayonnement et leucémie – ce que nous enseigne l'histoire

3.1 L'époque pionnière des rayons X

C'est en 1895 que le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen découvre de nouveaux rayons pénétrants qu'il baptise *rayons X*. Pour prouver sa découverte, il publie l'image au rayon X de la main de son épouse – une sensation aux yeux de ses contemporains. Ensuite, un rapide développement se met en place: quelques mois plus tard seulement, en mars 1896, Henri Becquerel fait une découverte similaire, celle des rayons uraniques. L'année suivante, des hôpitaux réalisent les premières *radiographies* du thorax humain. En 1898, Marie et Pierre Curie découvrent le *radium*. Pour la première fois, on parle de

«radioactivité». L'enthousiasme scientifique est grand. Tout le monde bricole son tube radiogène improvisé et *radiographie* toutes sortes d'objets. Des manifestations sont organisées pour le public, pendant lesquelles ce dernier peut admirer la réalisation de *radioscopies* en direct. Sur des stands de foires, on soumet à la *fluorescence* les objets les plus divers. On y démontre également comment peuvent être découverts et identifiés des objets métalliques contenus dans le sac d'une personne.

Une manipulation négligente des rayons

Ces installations radiologiques rudimentaires génèrent des doses massives de rayonnement, un fait qui, sur le moment, ne retient pourtant l'attention de personne. Malgré cela, on observe très tôt déjà que le rayonnement entraîne des rougeurs de la peau et l'on parle de brûlures causées par les *rayons X*. La chute de cheveux est, elle aussi, rapidement considérée comme un indice de forte exposition aux radiations: plus la dose cutanée est forte, plus les cheveux mettront de temps à repousser. A partir de 1905, on commence enfin par supposer que certains décès ont pu également être causés par la radiation.

Par la suite, le progrès se fait plus lent: il faudra attendre 1928 pour voir apparaître le premier *compteur de Geiger-Müller*. Grâce à lui, il sera dorénavant possible de mesurer la quantité de rayonnement. 1928 est également l'année de fondation de la CIPR (International Commission on Radiological Protection). Depuis 1928, des études réalisées sur la mouche drosophile révèlent aussi que le rayonnement *ionisant* peut également déclencher des *mutations*. La crainte que l'exposition du corps au rayonnement *ionisant* puisse également avoir des effets à long terme se renforce. Il en résulte la demande d'introduction d'une limite de dose. En 1934 seulement, l'autorité américaine de radioprotection (U.S. National Committee on Radiological Protection, NCRP) recommandera une valeur limite de 1 mSv par jour – dose étonnamment généreuse si on la compare aux actuelles limites de 20 et 1 mSv par an.

La radiothérapie pour lutter contre les maladies

L'euphorie persiste. On était, à l'époque, persuadé que les rayonnements *ionisants* pouvaient être utiles dans la lutte contre les maladies les plus diverses: on combat les varices en portant des chaussettes imprégnées de *radium*, on prétend que le *radon* apaise la toux et que la radioexposition des articulations soulage des douleurs arthritiques.

Un groupe de patients particulièrement intéressants de l'époque – ceux qui souffraient de *spondylarthritis ankylosante (Morbus Bechterew)* – constitue la base d'une *étude épidémiologique* sérieuse et menée à bien. La *spondylarthritis ankylosante* est une inflammation chronique de la colonne vertébrale. Douleuruse, celle-ci entraîne la raideur et la déformation progressive de toute la colonne vertébrale.

Une radioexposition de la zone touchée réduit nettement les symptômes. Les radioexpositions ont eu lieu entre 1935 et 1944. Elles sont bien documentées et concernent un grand nombre de patients (14'106). L'histoire de la maladie des personnes traitées a été documentée sur une durée exceptionnellement longue, s'étalant sur presque 50 ans après la radiothérapie – des conditions idéales pour une *étude épidémiologique* (Darby et al. 1987).

Les résultats de cette étude sont sans équivoque: après une certaine période de *latence*, les radiations *ionisantes* augmentent la probabilité de contracter un cancer. Cette période de *latence* est de 3 à 6 ans pour la leucémie et de 10 à 20 ans pour les tumeurs solides. La probabilité de développer un cancer radio-induit augmente proportionnellement à la dose de rayonnement reçue. L'étude a permis de quantifier ce fait pour la première fois. *Le facteur de risque* élaboré a été confirmé plus tard par l'étude Hiroshima – Nagasaki (cf. *chapitre 3.2*).

Les enseignements débouchent sur la radioprotection

C'est vers 1970 que commence enfin à se faire la lumière concernant la différence entre les effets *déterministes* à court terme d'une irradiation qui ne se vérifie qu'au-dessus d'un niveau seuil déterminé, et les risques *probabilistes* à long terme pour lesquels il n'existe vraisemblablement pas de dose seuil. En ce qui concerne les effets *déterministes* dus au rayonnement (par exemples les dommages causés aux organes et les brûlures), l'importance du dommage augmente proportionnellement à la dose. Pour les effets dits *probabilistes* (par exemple cancer, leucémie ou malformations génétiques des descendants d'une personne irradiée), la probabilité d'apparition augmente, en revanche, avec la dose. Grâce à ces acquis, la radioprotection moderne a été construite sur des fondements solides.

Les utilisations folkloristes des *rayons X*, et qui se sont montrées inutiles, pouvaient désormais être interdites, n'étant pas justifiées. Les «pédoscopes» que l'on trouvait dans tous les magasins de chaussures des années 60 et qui permettaient à la fois de voir ses doigts de pied dans la chaussure et si la chaussure avait la bonne pointure, ont, par exemple, disparu. Ces appareils généraient des doses effectives de 10 à 20 mSv/mn et constituaient une attraction très prisée des enfants mais dangereuse.

Sources

- Darby S., Doll R., Gill SK et al. (1987). Long term mortality after a single treatment course with X-rays in patients treated for ankylosing spondylitis. *British Journal of Cancer*, volume 55, pages 179–190.
- Darby S., Nakashima E. and Kato H. (1985). A parallel analysis of cancer mortality among atomic bomb survivors and patients with ankylosing spondylitis given X-ray

therapy. Journal of the National Cancer Institute, volume 75, pages 1–21.

- Publications ICRP 22 (1973), 26 (1977), 60 (1991) et 103 (2007).

3.2 Hiroshima et Nagasaki

Le lancement de deux bombes atomiques sur les villes japonaises d'Hiroshima (6.8.1945) et de Nagasaki (9.8.1945) a, en grande partie, déterminé la fin de la Seconde Guerre mondiale. La majorité des victimes ont été tuées sur le coup par l'effet épouvantable de la fulgurante vague de chaleur. Beaucoup de personnes sont mortes peu après, lorsque l'énorme onde de choc de l'explosion a détruit les bâtiments et enseveli les hommes sous leurs décombres. La tempête de feu s'est ensuite abattue sur les maisons d'Hiroshima et Nagasaki, qui étaient majoritairement construites en bois et ont brûlé pendant toute une journée. Jusqu'à 2 kilomètres de l'épicentre, la vie a été anéantie à 90%. Grand nombre de personnes vivant dans cette région centrale sont mortes dans les deux à trois semaines d'une dose de rayonnement aiguë (*rayons gamma et neutrons*). La vague de mort n'a cessé que quelques mois plus tard. Elle a coûté, toutes pertes confondues, quelque 130'000 vies humaines à Hiroshima et Nagasaki. A une distance plus grande des épicentres on comptait de nombreux survivants qui n'avaient guère ou pas du tout été touchés par les effets thermiques et mécaniques de l'explosion. Ils avaient, en revanche, subi une exposition à une dose de rayonnement non négligeable. Ces survivants de la catastrophe ont été baptisés «Hibakushas».

Une étude consistante sur les survivants

La plus importante *étude épidémiologique* de tous les temps («The Life Span Study») a été mise sur pied en 1950, dans le cadre du projet américano-japonais pour la reconstruction du Japon. Elle a pris en compte 86'572 Hibakushas, tous soigneusement enregistrés. Les données personnelles de chaque victime incluaient avant tout l'emplacement exact où elle se trouvait au moment de l'explosion, en tenant compte des particularités locales, qui l'avaient peut-être protégée. Cette information a permis de déterminer, grâce à un effort important, la dose de rayonnement (*gamma et neutron*) subi par chaque Hibakusha, et de définir sept catégories de doses. La première catégorie comprend 37'458 Hibakushas avec une dose inférieure à 5mSv. Elle constitue le groupe à dose nulle auquel se réfèrent tous les calculs statistiques. Les 49'114 autres Hibakushas forment le groupe des personnes irradiées, lui-même subdivisé en 6 catégories de doses. La dose

moyenne d'irradiation des Hibakushas s'élève à environ 200 mSv (0,2 Sv). Depuis lors, on suit attentivement ces cohortes et on enregistre l'*incidence du cancer* et les causes de décès. La «Life Span Study» (LSS) est encore active et publie environ tous les cinq ans l'état de cette cohorte. Elle continuera à le faire jusqu'à la mort du dernier Hibakusha. Depuis l'époque, le groupe étudié a vieilli de 63 ans, et environ la moitié des personnes sont déjà décédées.

Le raccourcissement radio-induit moyen de la vie d'un Hibakusha est de deux mois dans la plage de dose inférieure, et de 2,6 ans dans la plage de dose supérieure. Environ 10'000 Hibakushas sont morts de tumeurs cancéreuses jusqu'à aujourd'hui. 440 de ces tumeurs sont directement imputables au rayonnement. Dans la même *cohorte*, 176 personnes sont mortes de leucémie, 78 de ces décès étant dus au rayonnement. L'enregistrement des causes de décès n'ayant fonctionné sans faille et durablement que quelques années après 1950 seulement, la LSS semble avoir manqué l'enregistrement de la majeure partie des leucémies infantiles.

Risque de cancer plus élevé en raison du rayonnement

En conclusion, nous avons constaté qu'au total, 130'000 personnes étaient mortes à Hiroshima et Nagasaki en peu de temps. Dans une période d'à peu près 50 ans, 500 autres personnes ont succombé à des lésions radio-induites tardives, ce qui correspond en moyenne à 10 cas par an.

Sur la base de la LSS et de l'*étude épidémiologique* des patients de la *maladie de Bechterew*, il a été possible de quantifier le risque de cancer radio-induit (*cf. chapitre 3.1.*). Celui-ci se chiffre à environ 5 à 10% par sievert, soit 1 à 2 % par 0,2 Sv (= la dose moyenne des 49'114 Hibakushas irradiés). 1 à 2% de 49'114 représentent environ 500 à 1'000 cas de cancer supplémentaires résultant de l'exposition. En réalité, on compte jusqu'à ce jour 440 tumeurs cancéreuses + 78 leucémies = 518. La moitié de la *cohorte* est encore en vie.

Sources

- Pierce D.A. and Preston D.L. (2000). Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. Radiation Research, volume 154, pages 178–186.
- Preston D.L. et al. (2003). Studies of mortality of atomic bomb survivors, Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality: 1950–1997. Radiation Research, volume 160, pages 381–407.
- Preston D.L. et al. (1994). Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987. Radiation Research, volume 137, pages 68–97.

3.3 Tschernobyl

Le 26 avril 1986 explosait à 1h23 le réacteur du bloc 4 de la centrale nucléaire de Tschernobyl dans le nord de l'Ukraine. Ce réacteur russe de type RBMK présentait certains défauts de sécurité, voire même de construction. Aucun pays de l'Ouest ne lui aurait accordé une licence d'exploitation. De plus, son équipe, insuffisamment formée, a tenté une expérience extrêmement risquée. L'explosion a arraché le toit du bâtiment et le réacteur a brûlé. Des gaz et *aérosols* radioactifs à très haute température ont été libérés en quantités énormes dans l'atmosphère. Bien qu'une intervention de grande ampleur des sapeurs-pompiers ait été en mesure d'éteindre les incendies secondaires, elle n'est pas venue à bout des feux de *graphite* au cœur des décombres de combustible nucléaire. Le *graphite* a brûlé pendant 14 jours. Pendant cette période, le régime des vents a changé à plusieurs reprises. Résultat: les nuages radioactifs ont été disséminés quasiment aux quatre points cardinaux.

La population des agglomérations avoisinantes a eu de la chance dans sa malchance: les gaz radioactifs se sont élevés à une hauteur de 1 à 3 km dans l'atmosphère. Les doses de rayonnement qu'a subies la population locale et régionale ont, par conséquent, été nettement moins importantes que l'on ne le craignait. Les substances radioactives ont cependant été dispersées à grande distance.

Les forces d'intervention ont risqué leur vie

Après l'accident, un grand investissement en personnel et matériel a permis de construire un gros bouclier autour du bloc 4 et d'improviser un toit. Le tout fut baptisé «sarcophage». Ces forces d'intervention ont dû être relayées après un bref laps de temps déjà, en raison de la dose de rayonnement reçue – tout d'abord après quelques minutes, puis après quelques heures et, plus tard encore, après quelques jours. La majorité des «liquidateurs» participant à cette entreprise risquée étaient des soldats. On estime qu'environ 200'000 à 600'000 liquidateurs sont intervenus en tout.

A l'intérieur de la zone de 30 km (zone d'exclusion), près de 120'000 personnes furent évacuées le second jour, puis déplacées. Quelques années plus tard, 220'000 autres personnes ont encore une fois été déplacées pour des raisons bureaucratiques et politiques. L'agriculture a été interdite dans une zone de quelque 7'000 km². Au total, près de 7 millions de personnes ont subi les conséquences de la catastrophe, soit directement en raison du nuage radioactif soit indirectement à travers la consom-

mation d'aliments *contaminés*. Pour environ 95% de ces personnes, la dose de rayonnement est cependant restée à hauteur du double de la dose de rayonnement naturel.

La catastrophe et ses conséquences sur la santé

L'image d'ensemble des effets de la catastrophe sur la santé reste lacunaire. Aucune *étude épidémiologique* à grande échelle n'a été menée, et les déclarations des médecins concernant les maladies observées restent contradictoires.

Pendant les 24 premières heures, près de 500 personnes (sapeurs-pompiers, unités d'urgence) se sont efforcées d'éteindre les incendies et d'éliminer les décombres hautement radioactifs. Parmi ces premières forces d'intervention, 134 ont souffert de maladies d'irradiation aiguës et 28 d'entre elles en sont mortes dans les 2 à 3 semaines suivantes.

Certains groupes de liquidateurs, qui n'avaient pas développé de maladie aiguë malgré les hautes doses de rayonnement reçues, ont été placés sous observation médicale. Ainsi qu'il était prévisible, on a constaté une occurrence légèrement plus élevée des maladies suivantes: leucémie, cataracte et *maladies cardiovasculaire*, mais, jusqu'ici, aucune tumeur solide.

Les répercussions les plus évidentes sur la santé concernent le cancer de la thyroïde chez les enfants. La relation de cause à effet entre l'ingestion de radio-iode (principalement à travers la consommation de produits laitiers) et l'augmentation du risque de cancer de la thyroïde chez les enfants est nette. Étant donné que l'iode constitue un élément nécessaire et rare servant à la production des hormones de la thyroïde, celui-ci est enrichi 25 à 200 fois dans cet organe puis stocké. Lors d'une *contamination* avec de l'iode radioactif, il résulte une irradiation locale nettement plus élevée qu'avec d'autres substances radioactives. Environ 5'000 cas de cancer de la thyroïde sont imputables à l'iode radioactif. Heureusement, ce type de cancer est guérissable dans 99% des cas. De fait, jusqu'à ce jour, seuls 9 des jeunes concernés sont morts de cette maladie.

Concernant la leucémie, une légère hausse de l'incidence a été observée. Celle-ci n'était cependant pas significative sur l'ensemble de la population. Au sein de plusieurs groupes de liquidateurs, le risque de leucémie a cependant augmenté significativement. On a noté une légère hausse chez les enfants. Celle-ci n'a cependant pas pu être mise en corrélation avec le degré de *contamination* du sol.

Chez les femmes, après une *latence* très longue (de 15 à 20 ans) le risque de cancer du sein a nettement aug-

menté. Cet accroissement ne peut être que partiellement mis en corrélation avec les effets de Tchernobyl. Après la catastrophe, l'assistance médicale et par conséquent les possibilités de diagnostic ont été nettement améliorées.

Abus des indemnités versées par l'Etat

L'état général de santé de la population de cette région – que ce soit en Russie, en Ukraine ou en Biélorussie –, est mauvais et l'espérance de vie ne dépasse guère 60 ans. L'assistance médicale y est rudimentaire, le CICR mentionne, par exemple, un hôpital régional sans eau courante. Les soins de santé lamentables de cette région d'Europe de l'Est ne se sont pas notablement améliorés au cours des dernières années.

Des dédommagements de l'Etat, sous forme de rentes ou de privilèges à vie, ont été instaurés pour les liquidateurs et les victimes de l'accident de Tchernobyl et continuent à être versés de nos jours. Le statut officiel de «liquidateur» ou de «victime» est donc encore très prisé et de nombreuses personnes non concernées en ont malheureusement abusé grâce à leurs relations ou par la corruption. De plus, les liquidateurs ont été nombreux à réussir à se faire enregistrer deux fois et par conséquent, à obtenir deux rentes. C'est ainsi que près de 7 millions de personnes obtiennent aujourd'hui des subventions ou privilèges bien que l'on estime à 400'000 maximum le nombre de personnes irradiées.

Les dommages subséquents sont difficilement estimables

L'ensemble de ces circonstances ne permet d'estimer que difficilement les maladies et décès réellement imputables à l'exposition au rayonnement *ionisant* de Tchernobyl. Un pronostic des décès est malaisé. Les estimations varient entre 4'000 et 9'000 morts. Vu l'ampleur de la catastrophe, ce chiffre paraît étonnamment faible. L'espérance de vie déjà courte de la population, qui résulte de la consommation d'alcool et de nicotine, pourrait constituer une explication de ce phénomène. En effet, beaucoup de personnes meurent avant que le cancer radio-induit ne puisse se manifester.

Le principal dommage causé par la catastrophe est cependant d'ordre psychosocial et psychosomatique. Une grande partie de la population vit, en effet, dans la peur du cancer et souffre, par conséquent, de symptômes de stress (apathie, dépression, fatigue). On rapporte également que le taux de suicide est plus élevé. Les groupes de population évacués et déplacés sont rejetés comme des lépreux et vivent dans des ghettos. La nouvelle génération ne souhaite pas demeurer dans la région et émigre.

Les doses de rayonnement causées en Europe centrale par la catastrophe de Tchernobyl sont restées faibles et ont fluctué dans la plage d'exposition naturelle au rayonnement. Les familles se nourrissant du produit de leur jardin situés dans les régions plus touchées ont accumulé les doses d'irradiation les plus élevées, qui correspondaient temporairement au double de l'exposition naturelle. A titre de comparaison, en Inde, au Brésil, en Chine et en Iran, il existe des régions où, bien que le rayonnement naturel du sous-sol soit très élevé – soit jusqu'à 10 fois supérieur au niveau normal –, on ne peut observer aucune atteinte visible à la santé. La population locale y est plus exposée au rayonnement que ne l'étaient 95% des «victimes» officielles de Tchernobyl.

Sources

- Cardis E. et al. (2006). The Cancer Burden from Chernobyl in Europe. International Agency for Research in Cancer (IARC) and World Health Organisation (WHO).
- Internationale Länderkommission Kerntechnik (ILK) (2006). Stellungnahme zu den Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl – Eine Bestandesaufnahme nach 20 Jahren. ILK-26, www.ilk-online.org.
- Strahlenschutzkommission (SSK) des BMU, Heft 50 (2006). 20 Jahre nach Tschernobyl – Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes. Hoffmann-Fachverlag, Berlin; ISBN 3-87344-127-6.
- The Chernobyl Forum 2003–2005 (2006) (IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. Printed by IAEA.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000 Report), Volume II: Effects. Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident.
- World Health Organisation, WHO (2005). Health Effects of the Chernobyl accident and special health care programmes.

4 Radioactivité et mesures de protection

4.1 Rayonnements ionisants: mesure et effet biologique

Les substances radioactives soit se trouvent dans la nature – par exemple sous forme d'*uranium*, thorium, *radium*, *radon*, potassium-40, etc –, soit sont générées artificiellement dans une centrale nucléaire ou un accélérateur. Ces substances sont instables et émettent, lors de leur désintégration, des rayonnements (*rayons alpha, bêta et/ou gamma*) afin d'atteindre un état plus stable. Ces rayons sont plus énergétiques que la lumière et les rayons UV. En effet, ils sont en mesure de briser les liaisons électroniques au sein des molécules de matière (ionisation) et de modifier la position des atomes dans les molécules. Lorsque ces processus touchent le matériel génétique, il peut en résulter une *mutation*. La dose de rayonnement, qui permet d'établir un rapport avec l'étendue des dommages causés au sein de la matière, est mesurée comme suit: quantité d'énergie (joule) par unité de mesure de la matière exposée au rayonnement (kg). En premier lieu, le dommage est déterminé par l'énergie d'ionisation et non pas par le type de substance radioactive qui émet le rayonnement. Les différents appareils permettant de mesurer la dose sont appelés *dosimètres*. 1 gray correspond à une dose d'énergie d'1 joule/kg absorbée.

Modification chimique des cellules

Dans la radiothérapie utilisée pour tuer les cellules cancéreuses, on dirige sur la tumeur des doses très élevées, de l'ordre de 50 à 60 grays au total. Dans la plage des faibles doses de rayonnement (moins de 0,1 gray = 100 milli grays), les cellules ne sont pas tuées mais modifiées chimiquement. Tandis que les *enzymes* ou *organismes cellulaires* endommagés peuvent être simplement décomposés et remplacés par de nouveaux, les modifications de l'*acide nucléique* en tant que porteur d'informations génétiques demeurent. Ces altérations sont cependant découvertes par les cellules touchées et généralement réparées. Il existe néanmoins une faible probabilité que ces réparations ne réussissent pas pleinement et que la

modification entraîne une *mutation* durable. Lorsque, plus tard, cette cellule qui a déjà muté, est touchée si souvent qu'elle n'est plus en mesure de se réparer, celle-ci passe normalement au suicide génétiquement programmé (*apoptose*) ou est supprimée par les cellules voisines. Mais lorsque tous ces mécanismes de défense échouent, cette cellule qui a muté plusieurs fois peut se transformer en première cellule cancéreuse qui se multipliera et commencera à former une tumeur ou des *métastases*.

La probabilité de cette évolution malheureuse dépend, entre autres, du nombre d'atteintes, c'est-à-dire de la dose de radiation reçue. Mais le type de rayonnement joue ici également un rôle important. Une radiation par particules lourdes (*rayonnement alpha, protons, neutrons*) ionise avec une densité plus grande que les *rayons gamma* ou les *rayons X* et peut provoquer plusieurs atteintes simultanées de la cellule touchée. De plus, les différents organes du corps affichent des sensibilités différentes vis-à-vis des rayonnements *ionisants*. Parmi les plus sensibles, on peut citer la moelle rouge, le gros intestin, les poumons et l'estomac.

Détermination du facteur de risque

Dans le domaine de la protection contre les radiations et donc des faibles doses, l'unité de mesure utilisée est la «dose effective». Celle-ci sert à calculer la probabilité qu'a une exposition de provoquer plus tard un cancer. La «dose effective» est la dose d'énergie (en gray) pondérée d'une part en fonction du type de rayonnement et d'autre part en fonction de la sensibilité des organes touchés. La «dose effective» est exprimée en sievert. En cas d'irradiation globale du corps par des *rayons gamma* ou des *rayons X*, on pose l'équation suivante:

$$1 \text{ sievert} = 1 \text{ gray} = 1 \text{ joule/kg.}$$

L'*étude épidémiologique* extrêmement détaillée menée sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki a permis de quantifier le risque d'apparition de cancer déclenché par irradiation. Le risque est d'environ 5 à 10% par sievert et s'applique approximativement dans une fourchette allant de 3 sieverts à moins de 0,05 Sv (*50 millisieverts*). Concernant les doses encore moins importantes, on adopte l'hypothèse préventive selon laquelle ce *facteur de risque* est encore présent et qu'il n'existe pas de seuil en-dessous duquel les effets du rayonnement seraient nuls. De nombreux scientifiques défendent cependant la thèse selon laquelle, dans la plage des doses très faibles et en cas d'irradiation «diluée dans le temps», les mécanismes de réparation de la cellule sont à 100% efficaces. Les effets d'une telle exposition seraient donc réellement insignifiants.

Le *facteur de risque* signifie concrètement que dans un groupe de 1000 personnes exposées à une dose de 100 mSv, on devrait faire face à 4,1 cas de cancer mortels supplémentaires. Si l'on suppose que le taux de cancers mortels spontanés de cette population s'élève à 20%, au fil du temps, on aurait approximativement 204 cas de cancers mortels au lieu de 200. Une augmentation aussi faible ne serait guère mesurable statistiquement, étant donné que les cas de cancers causés par irradiation ne se distinguent aucunement des autres cas de cancer. La CIPR a recommandé les doses limites du rayonnement généré par l'homme sur la base du *facteur de risque* mentionné ci-dessus. Les charges occasionnées par les utilisations médicales ainsi que le rayonnement naturel en sont, bien entendu, exclues. Depuis 1990, elles s'élèvent à 20 *millisieverts* (20 mSv) par an pour les personnes exposées professionnellement et à 1 mSv par an pour la population ordinaire.

4.2 Dispositions légales en matière de radioprotection et surveillance de la radioactivité

La CIPR (Commission on Radiological Protection ou Commission internationale de protection radiologique) a été fondée en 1928 pour garantir la protection contre les effets néfastes des radiations *ionisantes*. A partir de 1950, celle-ci publie des recommandations reposant sur des bases scientifiques reconnues dans le monde entier. Ces recommandations internationales constituent dans pratiquement tous les pays la base des dispositions légales en matière de radioprotection.

Le droit suisse mentionne pour la première fois la radioprotection dans la loi fédérale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique et la protection contre les radiations (1959). Se fondant sur cette loi paraît ensuite, en 1963), la première ordonnance concernant la protection contre les radiations. La législation actuelle est extrêmement détaillée: elle comprend la loi sur la radioprotection (LRaP 814.50) et l'ordonnance y relative, ainsi que d'autres ordonnances et directives (ORaP 814.501 de 1994, révision 2008).

Les trois principes de la radioprotection

La protection de l'homme et de l'environnement repose sur les trois principes suivants:

1. Toute activité par laquelle l'homme est exposé à des rayonnements *ionisants* doit être justifiée. Cette justification doit montrer que les avantages de cette activité l'emportent sur ses inconvénients.
2. La dose d'irradiation causée par cette activité doit être maintenue à un niveau aussi bas qu'il est raisonnablement possible de l'atteindre. Il s'agit du célèbre et efficace principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable).
3. Les doses individuelles reçues par les personnes que cette activité concerne ne doivent pas dépasser les limites des doses correspondantes. Les valeurs limites stipulées pour les personnes exposées aux radiations pour des raisons professionnelles sont de 20 mSv par année, et de 1 mSv par année pour les individus de la population ordinaire (enfants en bas âge et fœtus compris).

Mais le seul respect de ces valeurs limites ne suffit pas. En vertu du principe n°2, le responsable de l'exposition à la radiation – dans l'esprit du principe de précaution – doit toujours s'efforcer de respecter les doses «ALARA». Il est ainsi tenu compte du fait que des doses mêmes infimes seraient en mesure de causer un dommage biologique, même si la probabilité en est extrêmement faible.

Mesures de protection pour les personnes exposées aux rayonnements

Les personnes exposées aux radiations pour des raisons professionnelles doivent porter un ou plusieurs *dosimètres*, afin que la dose journalière ou mensuelle de rayonnement externe qu'ils ont reçue puisse être calculée et enregistrée. Si nécessaire, la radioactivité de l'air de ces espaces sera surveillée et la dose interne due à l'inhalation sera régulièrement mesurée (mesures à l'anthropogammamètre, analyses de l'urine).

Toute personne exposée au rayonnement pour des raisons professionnelles possède un document dosimétrique personnel comptabilisant les doses accumulées. L'OFSP (Office fédéral de la santé publique) enregistre les données dans une banque de données et publie tous les ans les statistiques de dosimétrie des personnes exposées au rayonnement dans l'exercice de leur profession, y compris les doses individuelles totales accumulées.

Les contrôles des doses de la population sont réalisés grâce à des *dosimètres locaux*, des stations de mesure et analyses en laboratoire, de l'herbe, de la terre, des céréales, du lait, etc. par des laboratoires fédéraux, des universités et des cantons.

Les stations de mesure surveillent la radioactivité

En Suisse, les postes de mesure automatiques sont groupés en trois réseaux de mesure. RADAIR mesure la radioactivité dans l'air et permet de détecter par anticipation les nuages radioactifs, par exemple après un essai d'explosion d'armes nucléaires quelque part sur la terre. NADAM (environ 60 stations) mesure le débit de dose local dans toute la Suisse. Enfin, MADUK se compose de 12 à 18 sondes disséminées à proximité immédiate (= rayon de 5 km) des centrales nucléaires. Ces sondes mesurent en continu le débit de dose local et transmettent tous les 10 minutes les résultats aux autorités de surveillance et à l'administration communale du village (exemple: voir illustration 1).

De plus, les faibles quantités autorisées de rejets radioactifs dans l'atmosphère, les fleuves et dans le système d'évacuation d'eau sont mesurées directement à la source (dans les centrales nucléaires, les hôpitaux, universités, l'industrie de transformation du tritium et autres laboratoires agréés).

Il convient également de mentionner que la Suisse dispose d'un équipement de mesure d'aéroradiométrie extrêmement sensible qui était, à l'origine, utilisé pour détecter du minerai d'uranium. Aujourd'hui, celui-ci permet, par exemple, de dégager les débris de satellite ou les sources radioactives perdues, à l'aide d'hélicoptères de l'armée. Cet équipement est utilisé afin de surveiller régulièrement les environs des centrales nucléaires suisses.



Illustration 1: exemple de station de mesure MADUK autour de la centrale nucléaire de Beznau et Leibstadt. Source: Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA091547)

Les autorités de surveillance informent le public

Les autorités de surveillance compétentes (OFSP = Office fédéral de la santé publique, chargé du domaine médical et de la recherche; IFSN = Inspection fédérale de la sécurité nucléaire, domaine des centrales nucléaires; Suva = Caisse nationale suisse en cas d'accidents, domaine commerce et industrie) donnent chaque année des informations sur le respect des exigences légales. En cas d'incident, le public est immédiatement informé et la gravité de l'événement sera – en référence à l'échelle de Richter utilisée pour les tremblements de terre – évaluée et communiquée sur la base de l'échelle INES (International Nuclear Event Scale). Le niveau 1 correspond à une panne sans conséquence pour la population, le niveau 7 à une catastrophe de l'ampleur de Tchernobyl. Le vol d'une source de radiothérapie hors d'usage dans un hôpital correspondrait, par exemple, à un événement de niveau 3.

4.3 Dose annuelle moyenne reçue par la population suisse et comparaison avec la part imputable aux centrales nucléaires

L'homme est constamment et en tous lieux exposé à l'action de radiations ionisantes. A chaque seconde des milliers de particules subatomiques volant à grande vitesse ainsi que des paquets d'ondes électromagnétiques traversent le corps. Les différentes sources génèrent des doses de rayonnement radicalement diverses.

Exposition du corps humain au rayonnement naturel

Le rayonnement cosmique, provenant principalement de l'espace et partiellement du soleil (vent interstellaire), provoque à la hauteur du Plateau suisse une dose d'environ 0,35 millisievert par an (mSv/an). En altitude (à env. 1800 m au-dessus du niveau de la mer), l'exposition s'élève à environ 0,6 mSv/an. Chez le personnel navigant, la dose annuelle est nettement plus élevée que dans le reste de la population, en raison du rayonnement cosmique. Lors d'une éruption chromosphérique, l'exposition aux radiations peut représenter un danger aigu pour les cosmonautes.

L'uranium, le thorium et le potassium-40, disséminés sous forme de traces sur toute la croûte terrestre, sont les principaux responsables du rayonnement terrestre. Le radium est un produit de décomposition de l'uranium contribuant de manière essentielle à la dose terrestre. Cette dose dépend du lieu et se chiffre au minimum à 0,4 mSv/an. A certains endroits des Alpes, elle peut atteindre jusqu'à 1 mSv/an en raison de la teneur en uranium du granite. En Inde, en Iran et au Brésil, la population locale de certaines régions est exposée à un rayonnement terrestre encore nettement plus élevé.

Rayonnement provenant de l'intérieur du corps humain

Les atomes d'uranium contenus dans le sol génèrent le gaz radioactif radon qui émane des fissures de roches et se diffuse jusque dans les caves et les appartements situés au rez-de-chaussée (voir illustration 2: carte du radon en Suisse). L'inhalation de radon produit une irradiation alpha des poumons pouvant conduire à une dose effective équivalente à 100 mSv/an. L'exposition moyenne de la population helvétique s'élève à 1,6 mSv/an. On estime que le radon représente, après le tabagisme, la seconde cause la plus importante du cancer des poumons.

Le potassium-40 est une autre source d'irradiation interne du corps humain. Il s'agit d'un isotope radioactif naturel du potassium que le corps absorbe par l'alimentation et qui fait partie de ses éléments. Le potassium-40 se décompose et irradie le corps de l'intérieur. Le potassium génère une dose annuelle de 0,35 mSv/an et ne varie que peu d'un individu à l'autre.

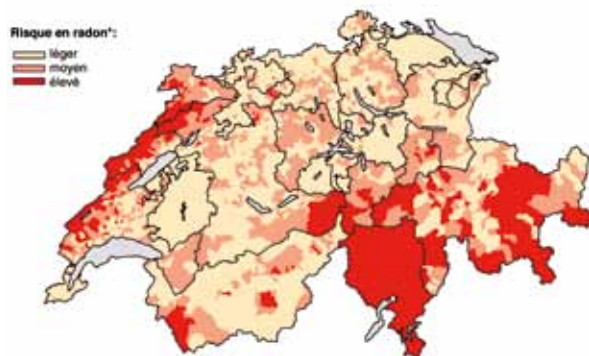


Illustration 2: Carte du radon en Suisse.

Etat: mars 2009. *Remarque: dans certaines communes, le risque en radon est estimé à partir d'un échantillon insuffisant de mesures (à voir dans le «moteur de recherche par commune», sous www.ch-radon.ch).

Source: Office fédéral de la santé publique, GG25 ©Swisstopo

Irradiation imputable aux applications médicales

Malgré des appareils à la pointe du progrès, l'utilisation médicale des rayons X et de la radioactivité contribue,

pour une part qui s'accroît rapidement, à l'exposition de la population aux rayonnements. Nous limitons notre tableau au radiodiagnostic qui concerne une grande partie de la population. En revanche, la radiothérapie ne concerne pas l'ensemble de la population mais uniquement un petit groupe de malades tirant un bénéfice thérapeutique direct de l'irradiation.

La population suisse est soumise en moyenne à 1,3 radiodiagnostic par an. Une radiographie délivre une dose effective d'environ 0,05 à 5 mSv. Faire une radioscopie ou une tomographie par ordinateur revient à imposer au patient une charge d'environ 0,5 à 50 mSv. Dans le domaine médical, les doses limites doivent, en premier lieu, être appliquées au personnel. En ce qui concerne le diagnostic, les méthodes correspondantes doivent être sélectionnées et appliquées de manière que le bénéfice qu'en tire le patient soit supérieur au risque qu'il encourt. C'est le terme de «justification» qui ancre ce processus dans la législation. Une enquête détaillée effectuée en 1998 (Aroua et al.) montre que la charge moyenne délivrée à la population suisse par le radiodiagnostic s'élève à 1,2 mSv/an.

Part imputable aux centrales nucléaires et comparaison

La part de l'irradiation de la population imputable aux centrales nucléaires est très faible, comparée aux sources mentionnées ci-dessus. L'autorisation d'exploitation de chaque centrale nucléaire fixe des limites déterminées pour le rejet d'émissions radioactives dans l'environnement. Celles-ci sont calculées de telle sorte que, dans la pire des hypothèses, la dose reçue par les populations avoisinantes, eu égard au lieu et à l'origine des aliments consommés, soit d'au plus 0,2 mSv/an. En application du principe ALARA, les doses réelles reçues restent nettement inférieures à ces limites (environ 100 fois inférieures).

Près d'un quart de ces très faibles irradiations subies sont causées par le carbone-14 (C-14) rejeté sous forme de CO₂ dans l'atmosphère par les cheminées des centrales nucléaires. Etant donné que cet isotope est assimilé par les plantes et pénètre dans leur métabolisme, on déclare parfois qu'il est à traiter avec une pondération particulière. Depuis de nombreuses années, on surveille les concentrations de C-14 dans le feuillage des proches environs des centrales nucléaires. Ces concentrations affichent des valeurs qui sont jusqu'à environ 15% supérieures au niveau de C-14 mondial. On sait cependant également que les essais atomiques des années 50 et 60 ont pratiquement doublé, et pour plusieurs années, le niveau de C-14 dans tout l'hémisphère Nord du globe terrestre. Depuis, cette valeur a lentement baissé pour retrouver son niveau d'avant le lancement des bombes. Si ce rayonnement était responsable d'un risque accru de leucémie, on aurait dû, à

l'époque, constater une augmentation massive des cas de leucémie dans tout l'hémisphère Nord, ce qui n'est pas été le cas.

Le récapitulatif des contributions discutées permet d'établir le tableau suivant:

	Valeur moyenne mSv/an	Valeur maximale mSv/an
Rayonnement cosmique	0,35	0,6
Rayonnement terrestre	0,45	1,0
Radon dans les locaux	1,6	~ 100
Potassium-40 dans le corps	0,35	0,5
Radiodiagnostic médical	1,2	~ 100
Centrales nucléaires (proche voisinage)	0,001-0,005	0,2
Total	4	~ 200

Selon ce tableau, la dose de rayonnement générée par les centrales nucléaires est nettement inférieure à celle de tous les autres rayonnements. Elle est également inférieure aux variations locales ou temporelles de l'exposition globale aux radiations. Elle ne peut donc guère être responsable d'une incidence médicalement significative comme, par exemple, de l'augmentation du risque de leucémie infantile dans les environs des centrales nucléaires.

Sources

- Aroua A., Vader J.-P., Valley J.-F. (2000). Enquête sur l'exposition par le radiodiagnostic en Suisse en 1998. Hospices Cantonaux de l'Etat de Vaud. ISBN 2-88444-0006-2.
- HSK Strahlenschutzbericht 2007 (2008) (Jahresberichte der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen) HSK-AN-6503, ISSN 1661-2906.
- Radioprotection et surveillance de la radioactivité en Suisse. Résultats 2005, 2006, 2007, etc. Office fédéral de la santé publique OFSP (rapports annuels).

5 Leucémie infantile et rayonnement

5.1 Pathologie de la leucémie infantile

Bien que les cas de cancer soient rares chez l'enfant, ils peuvent se déclarer dans tous les groupes d'âge. Ils se distinguent des cancers de l'adulte d'une part par leur forme, d'autre part

par leurs chances de guérison. Les enfants, qui souffrent ainsi de cancers à croissance rapide, répondent cependant mieux aux traitements médicamenteux que ne le font les personnes plus âgées aux cancers dont elles sont atteintes.

Les cancers de l'enfant représentent 1 % seulement environ de l'ensemble des cancers. Avec quelque 33 %, la leucémie aiguë est la forme de cancer la plus fréquente. Viennent ensuite les cancers du cerveau et des glandes lymphatiques. Il existe par ailleurs quelques formes de cancers typiquement infantiles, résultant de tissus immatures et qui, pour cette raison, ne concernent guère les adultes.

Dans le cas de la leucémie, il y a surproduction de leucocytes immatures, incapables d'assumer une fonction correcte. Les cellules leucémiques se reproduisent rapidement. Elles peuvent repousser les cellules sanguines saines, être évacuées dans le sang, toucher ainsi d'autres organes et affecter leur fonction (voir illustrations 3 et 4). La leucémie se traduit par des douleurs osseuses ou articulaires, par une fatigue prononcée, la pâleur et la perte de poids, et même par la présence de nombreux hématomes ou d'infections récurrentes. Dans le corps, les globules blancs sains jouent un rôle important dans la lutte contre les infections et les travaux de remise en état après les blessures. Ceux-ci sont formés, comme les globules rouges, dans la moelle épinière ou dans d'autres organes du *système lymphatique*. On distingue deux groupes principaux de globules sanguins blancs: les cellules lymphoïdes et les cellules myéloïdes. Ces deux familles de cellules peuvent être à l'origine d'une leucémie.

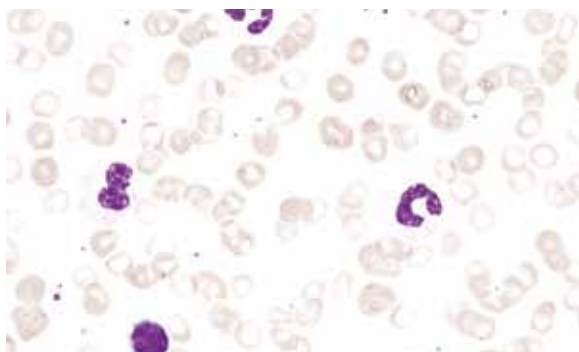


Illustration 3: formule avec cellules sanguines normales

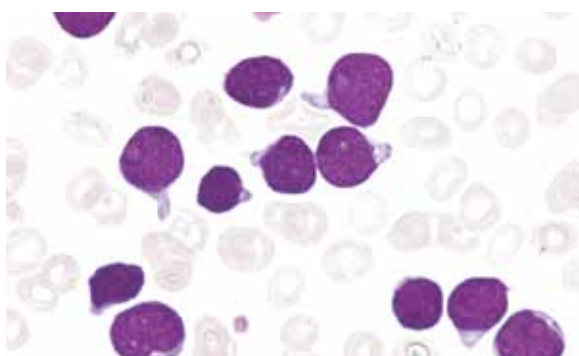


Illustration 4: formule avec cellules leucémiques
Source: Clinique universitaire pédiatrique, Zurich

Les différentes formes de leucémies et leurs thérapies

Chaque année, quelque 50 à 60 enfants sont atteints de leucémie en Suisse. Ce chiffre correspond à 5 nouveaux cas pour 100'000 enfants âgés de moins de 15 ans. Dans le monde, ce sont plusieurs milliers d'enfants qui sont concernés chaque année. Au cours des 30 dernières années, les statistiques montrent une légère augmentation de la fréquence des leucémies infantiles. Dans quatre cas sur cinq, c'est une *leucémie lymphatique aiguë (LLA)*, caractérisée par la prolifération de lymphocytes qui est diagnostiquée. Quant aux autres enfants concernés, ils souffrent principalement d'une *leucémie myéloïde aiguë (LMA)* caractérisée, de son côté, par la prolifération des cellules sanguines myéloïdes. Ces deux variantes de la leucémie sont différents biologiquement et nécessitent, pour cette raison, des traitements de conception différente.

Les enfants de tous âges peuvent être atteints de leucémie. Le groupe d'âge le plus souvent concerné est cependant celui des 2 à 5 ans. Les garçons sont légèrement plus souvent touchés que les filles. En l'absence de traitement, la maladie est mortelle. Grâce à la *chimiothérapie* moderne, le taux de guérison a pu être très sensiblement amélioré au cours des années passées. De nos jours, 4 enfants sur 5 souffrant d'une *leucémie lymphatique aiguë* sont guéris à long terme. La *leucémie myéloïde aiguë* n'est, en revanche, pas encore traitée avec autant de succès. Certaines situations de risque requièrent une radiothérapie supplémentaire, voire même une transplantation de la moelle osseuse.

Différents facteurs influencent les chances de guérison

Le succès à long terme d'une thérapie peut être influencé par différents facteurs de risque. Le type de leucémie et l'âge de l'enfant jouent un rôle. Les modifications génétiques au sein des cellules leucémiques et avant tout la sensibilité des cellules leucémiques à la thérapie s'avèrent également très importantes. En règle générale, le traitement est réalisé sur une période de deux ans, avec des phases thérapeutiques plus ou moins intensives. Bien qu'on ignore encore bien des faits sur les séquelles du traitement de la leucémie, la majorité des adultes soignés pour une leucémie pendant leur enfance n'affichent pas de problèmes de santé excessifs.

5.2 Etat actuel des recherches concernant les causes

Comme pour d'autres maladies cancéreuses de l'enfant, la cause exacte de la leucémie reste dans la majorité des cas inconnue. Il existe cependant certains facteurs de risque pouvant favoriser le développement d'un cancer déterminé. Les bains de soleils excessifs représentent ainsi, par exemple, un *facteur de risque* pour le développement des cancers de la peau, et le tabagisme peut être à l'origine d'autres types de cancer. Il est évident que présenter un risque élevé ne signifie pas – tant s'en faut – qu'un cancer se déclarera automatiquement.

On connaît également des facteurs susceptibles de favoriser la leucémogénèse. Certains indicateurs signalent que différents facteurs de risque peuvent se révéler importants pour les différents groupes de leucémies. Ces facteurs peuvent être classés en trois catégories: A) les facteurs congénitaux ou génétiques; B) les modifications du système immunitaire; C) les facteurs extérieurs concernant l'hygiène de vie et l'environnement. Il est probable que l'interaction des différents facteurs accroît particulièrement le risque de développer une leucémie.

A) Les facteurs congénitaux et génétiques

Bien que les leucémies apparaissent quelquefois dans une série de maladies génétiques, la majorité des enfants atteints de leucémie ne présentent pas de facteurs de risque génétiques connus. Les cellules humaines normales croissent et fonctionnent selon des informations contenues dans les cellules chromosomiques. Ces *chromosomes*, dont une moitié provient du père et l'autre de la mère, sont porteurs de l'ensemble de nos facteurs héréditaires, les gènes. Les gènes contiennent les instructions concernant la croissance et la division des cellules. Lors de chaque division de cellule en deux nouvelles cellules, les facteurs génétiques du *chromosome* doivent être recopiés afin d'être transmis aux cellules-filles. Cette duplication n'est pas toujours parfaite. Elle peut être à l'origine d'erreurs entraînant la perte ou même la modification de certains gènes. Une telle modification d'un gène est appelée *mutation*. Ce type de *mutation* peut également avoir lieu spontanément ou être provoqué par des influences externes telles que les substances cancérogènes.

Une mutation peut provoquer la leucémie

Une telle modification des gènes est en mesure d'influencer la division cellulaire et de déclencher une croissance incontrôlée des cellules dont pourra finalement résulter une leucémie ou un autre type de cancer. Le *syndrome de Down (trisomie 21)* est un exemple de maladie génétique connue allant de pair avec un risque de leucémie accru. On a établi un lien entre certaines maladies congénitales rares et une instabilité chromosomique, raison pour laquelle ces enfants présentent un risque plus élevé de développer une leucémie.

Parfois, des modifications génétiques capables de provoquer un cancer sont également transmises par les parents. Un tel facteur génétique modifié, par exemple sur le *chromosome 17*, peut contribuer à augmenter le risque d'apparition d'une leucémie, d'un *sarcome des parties molles* ou d'un cancer du sein. On part du principe que les modifications génétiques pouvant déclencher plus tard une leucémie infantile se déclarent majoritairement après la fécondation de l'ovule, mais en partie encore avant la naissance.

B) Modifications du système immunitaire

Les patients dont l'état nécessite, par exemple en raison d'une transplantation d'organe, un traitement intensif pour éviter le rejet des organes greffés, présentent un risque accru de développer certains cancers, en particulier le cancer des glandes lymphatiques et la leucémie. L'état individuel du système immunitaire du corps humain joue donc sûrement un rôle important dans l'apparition de la leucémie.

C) Facteurs extérieurs concernant l'hygiène de vie et l'environnement

L'hygiène de vie joue un rôle dans plusieurs cancers de l'adulte mais se révèle moins importante chez les enfants. Il n'existe guère d'indicateurs qui tendraient à montrer que ce type de facteurs favorise la maladie, en particulier en ce qui concerne la leucémogénèse. Une consommation accrue d'alcool pendant la grossesse a été discutée comme un éventuel *facteur de risque* d'apparition de la leucémie mais n'a pas pu être démontrée de manière concluante. La consommation de tabac n'a pas non plus pu être associée de manière convaincante à l'augmentation du risque de leucémie pour la progéniture des fumeurs. Il est également improbable que l'alimentation soit responsable de l'apparition de la leucémie chez l'enfant.

Facteurs environnementaux: les facteurs environnementaux comme, par exemple, les différents rayonnements, particules d'air et substances chimiques influencent notre environnement et peuvent, dans certains cas, constituer un facteur de déclenchement d'une maladie. Certains rares agents nocifs sont bien connus. Au cours des années

passées, différentes études ont été menées sur les facteurs environnementaux susceptibles de déclencher la leucémie. Malheureusement, les résultats obtenus divergent fortement et ne sont pas sans équivoque.

Les rayonnements ionisants: l'exposition à de hautes doses de radioactivité peut provoquer la leucémie. Ce fait est parfaitement connu depuis que des bombes atomiques ont été lâchées sur le Japon (*cf. chapitre 3*). On a pu démontrer l'apparition *accrue de leucémies myéloïdes aiguës*, généralement 6 à 8 ans après l'exposition. Une exposition excessive de l'enfant à naître peut également augmenter son risque de développer une leucémie. On n'a pas encore réussi à déterminer si les *rayons X* ou les examens tomographiques chez l'enfant, réalisés dans le cadre d'applications diagnostiques usuelles, augmentent le risque de cancer. Il n'en existe jusqu'ici aucune preuve irréfutable. Un éventuel *facteur de risque* découlant de ces examens diagnostics serait en tous cas très faible. Comme il n'est cependant pas possible de l'exclure totalement, il est absolument nécessaire de procéder avec la plus grande précaution et retenue en matière d'examen radiologique de l'enfant et de la femme enceinte.

Les enfants et adultes devant suivre une radiothérapie et une *chimiothérapie* en raison d'un cancer existant encourent un risque accru de contracter un second cancer, en particulier une leucémie (LMA). La radiothérapie du premier cancer nécessite des doses élevées jusqu'à 100'000 supérieures à celles que délivre une *radiographie* normale.

Ondes électromagnétiques: au cours des dernières années, on a prétendu à maintes reprises que l'exposition aux ondes électromagnétiques favorisait l'apparition des cancers. Le rayonnement électromagnétique fait partie de notre environnement. Nous sommes donc constamment entourés de *champs électromagnétiques*. Ces champs sont produits par tous les systèmes électriques: des lignes ferroviaires aux ordinateurs, installations téléphoniques, téléphones portables, émetteurs radio et télévisées, fours à micro-ondes (rayonnement haute fréquence) en passant par les circuits à haute tension (rayonnement basse fréquence). Bien que certaines études postulent un lien entre les *ondes électromagnétiques* et un risque de leucémie plus élevé – par exemple pour un lieu de résidence à proximité directe de lignes à haute tension – d'autres études similaires n'ont pas été en mesure de démontrer un tel lien. Une étude récemment publiée n'a pas non plus pu illustrer clairement une fréquence accrue des cas de leucémie infantile chez les enfants résidant à proximité d'antennes radio et télévisées. Dans ce contexte, l'impact des téléphones mobiles est toujours un objet d'études. Il n'existe cependant encore aucun indicateur quant au rôle des téléphones portables dans la leucémogénèse chez les enfants et les adolescents. Un programme de recherche étudie actuellement les effets des *champs électromagnétiques* sur la santé de l'homme.

Substances chimiques: il est connu que certaines substances chimiques peuvent provoquer une *leucémie myéloïde aiguë* chez l'adulte. Tel est le cas, par exemple, du *benzène*, un solvant utilisé dans les matériaux industriels. En ce qui concerne la *leucémie lymphatique aiguë*, on ne connaît jusqu'ici aucun produit chimique en mesure de provoquer directement cette maladie. Il est possible que les facteurs héréditaires jouent, là aussi, un rôle important: ils déterminent essentiellement le mode de comportement de notre organisme avec les différentes substances que nous ingérons ou que nous rencontrons dans l'environnement. En fin de compte, ici aussi, ce sera avant tout la quantité de la substance qui déterminera le caractère thérapeutique ou *toxique* de son effet.

Controverse sur les facteurs de risque d'apparition de la leucémie: il existe toute une série de facteurs qui sont mis en relation de manière récurrente avec la l'apparition de la leucémie. Pour un grand nombre de ces facteurs, les données ou l'administration des preuves sont insuffisantes ou leurs résultats prêtent à controverse.

Les *pesticides*, par exemple, auxquels les parents des enfants atteints de leucémie avaient été exposés, ont été rendus responsables d'une influence sur l'apparition de la maladie.

Le poste de travail paternel et l'exposition aux substances chimiques et aux solvants ont été particulièrement étudiés. Un lien entre la *contamination* chimique des eaux souterraines, des douzaines d'autres substances et, pour finir, les aliments les plus divers, est souvent établi avec l'apparition de cancers. Toutes ces études ont cependant donné des résultats peu probants quant à la cause de la leucémie. Bien qu'il n'existe aucune explication explicite à ces observations, on a constaté que l'âge plus avancé de la mère à la naissance de l'enfant ainsi qu'un poids de naissance élevé allaient de pair avec un développement légèrement plus fréquent de la leucémie. L'administration d'hormones pendant la grossesse ou la vaccination de l'enfant n'ont pas pu être mises en rapport avec l'apparition de la leucémie.

Sources

- Belson M., Kingsley B., Holmes A. (2007). Risk factors for acute leukemia in children: a review. *Environmental Health Perspectives*, volume 115, pages 138–145.
- Childhood cancer and residential proximity to power lines. UK Childhood Cancer Study Investigators. *British Journal of Cancer* 2000, volume 83, pages 1573–1580.
- Deutsches Kinderkrebsregister, Jahresbericht 2006/07. Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik, Mainz <http://www.kinderkrebsregister.de/>
- Dickinson HO. (2005). The causes of childhood leukaemia. *British Medical Journal*, volume 330, pages 1279–1280.

- Doll R., Wakeford R. (1997). Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *British Journal of Radiology*, volume 70, pages 130–139.
- Draper G., Vincent T., Kroll ME., Swanson J. (2005). Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *British Medical Journal*, volume 330, page 1290.
- Hjalgrim LL., Rostgaard K., Hjalgrim H., Westergaard T., Thomassen H., Forestier E., Gustafsson G., Kristinsson J., Melbye M., Schmiegelow K. (2004). Birth weight and risk for childhood leukemia in Denmark, Sweden, Norway, and Iceland. *Journal of the National Cancer Institute*, volume 96, pages 1549–1556.
- Linet MS., Hatch EE., Kleinerman RA., Robison LL., Kaune WT., Friedman DR., Severson RK., Haines CM., Hartsock CT., Niwa S., Wacholder S., Tarone RE. (1997). Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *The New England Journal of Medicine*, volume 337, pages 1–7.
- Programme national de recherche du Fonds national suisse «Rayonnement non-ionisant. Environnement et santé» (PNR 57), <http://www.nfp57.ch>.
- Rudant J., Menegaux F., Leverger G., Baruchel A., Lambilliotte A., Bertrand Y., Patte C., Pacquement H., Vérité C., Robert A., Michel G., Margueritte G., Gandemer V., Hémon D., Clavel J. (2008). Childhood hematopoietic malignancies and parental use of tobacco and alcohol: the ESCALE study (SFCE). *Cancer Causes & Control*, volume 19, pages 1277–1290.
- Schulze-Rath R., Hammer GP., Blettner M. (2008). Are pre- or postnatal diagnostic X-rays a risk factor for childhood cancer? A systematic review. *Radiation and Environmental Biophysics*, volume 47, pages 301–12.

5.3 Opinions actuelles concernant l'apparition de la leucémie

La leucémie est une maladie hétérogène. Une maladie peut avoir les causes les plus diverses. Elles ont cependant toutes comme dénominateur commun une sensibilité génétiquement ancrée des cellules sanguines pendant une phase de la vie au cours de laquelle l'enfant réagit avec grande sensibilité aux influences externes. Les enfants souffrant du *syndrome de Down* courent ainsi plus souvent le risque de développer une leucémie. Les garçons et bébés au poids de naissance plus élevé développent, eux aussi, un peu plus fréquemment une leucémie.

Explication plausible: le modèle à deux événements

Les indicateurs se multiplient selon lesquels la *genèse* de la *leucémie lymphatique aiguë* reposerait sur un modèle à deux événements (2-hit-model) qui était, à l'origine, proposé pour d'autres types de cancers infantiles déterminés. Selon ce modèle, il faut qu'au moins deux événements aient lieu pour qu'une leucémie se déclare (l'hypothèse de Greaves). Le premier événement entraînant une modification génétique a lieu dès la période de la grossesse. Pendant la rapide division des cellules sanguines de l'enfant in utero, des *mutations* – donc des modifications des facteurs génétiques – peuvent intervenir. Il peut en résulter une *modification préleucémique* des globules blancs. En règle générale, cette modification ne suffit cependant pas à elle seule à faire éclore la maladie. Un autre événement touche les cellules déjà endommagées pendant les premières années de vie de l'enfant. Les infections peuvent jouer un rôle important dans ce processus. Ce second événement peut avoir comme conséquence une modification ultérieure des cellules pré-endommagées ou *préleucémiques*, et finalement déboucher sur une leucémie dont l'issue pourra être mortelle. Selon certaines sources, les jumeaux monozygotes qui développent une leucémie pendant leurs premières années de vie présentent déjà à la naissance de telles modifications spécifiques *préleucémiques*, qu'ils auraient vraisemblablement échangées mutuellement à travers le sang in utero.

Indicateurs d'apparition de la leucémie

Quels sont donc ces événements déclencheurs? Des agents infectieux peuvent-ils réellement en être la cause? Il est en tout cas frappant de voir que la leucémie apparaît le plus souvent chez les enfants âgés de 2 à 5 ans. De plus, la leucémie est plus fréquente dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement. La maladie semble se développer avec la modernisation d'une région. Il est possible que l'amélioration de l'hygiène joue un rôle: certains agents infectieux pourraient entrer plus tard en contact avec les enfants (entre la 2ème et 5ème année de vie), à un moment où leur système immunitaire et le développement de leurs cellules sanguines se trouvent dans une phase critique. En effet, les leucémies sont plus nombreuses dans les régions où les modifications de la population et les brassages augmentent, peut-être en raison des contacts plus fréquents entre les personnes avec et sans agents infectieux.

Certains indices suggèrent aussi que les enfants qui vont très tôt à la crèche développeraient moins souvent la leucémie que ceux dont le contact fréquent avec d'autres enfants aurait lieu plus tard. Une confrontation des cellules sanguines lymphatiques de notre système immunitaire avec les agents infectieux pendant les premiers mois de vie peut donc avoir une influence positive sur le système immunitaire dans le sens d'une maturation précoce. Si les agents

infectieux tardent à rencontrer des cellules sanguines lymphatiques, ces cellules sanguines pourraient subir des modifications qui les transforment finalement en cellules leucémiques. On sait que les agents infectieux tels que les virus peuvent déclencher un cas de leucémie rare chez l'adulte ainsi que chez certains animaux (par ex. le virus de la leucémie féline pouvant provoquer des phénomènes de type leucémique chez les chats). Une cause uniforme des différentes formes d'apparition de la leucémie est cependant plutôt improbable.

Sources

- Alexander FE., Chan LC., Lam TH., Yuen P., Leung NK., Ha SY., Yuen HL., Li CK., Li CK., Lau YL., Greaves MF. (1997). Clustering of childhood leukaemia in Hong Kong: association with the childhood peak and common acute lymphoblastic leukaemia and with population mixing. *British Journal of Cancer*, volume 75, pages 457–463.
- Gilham C., Peto J., Simpson J., Roman E., Eden TO., Greaves MF., Alexander FE. (2005). Day care in infancy and risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia: findings from UK case-control study. *British Medical Journal*, volume 330, pages 1294–1297.
- Greaves M. (2006). Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukaemia. *Nature Reviews Cancer*, volume 6, pages 193–203.
- Kamper-Jørgensen M., Woodward A., Wohlfahrt J., Benn CS., Simonsen J., Hjalgrim H., Schmiegelow K. (2007). Childcare in the first 2 years of life reduces the risk of childhood acute lymphoblastic leukemia. *Leukemia*, volume 22, pages 189–193.

6 Etudes épidémiologiques ayant trait aux centrales nucléaires

6.1 Etudes épidémiologiques

L'épidémiologie permet de mener des études portant sur un éventuel lien entre les centrales nucléaires et les maladies néoplasiques. On désigne par le terme d'épidémiologie le domaine de la recherche médicale étudiant les maladies de la population dans son ensemble ou de groupes définis, et non

pas d'un patient en tant qu'individu. Elle constitue donc l'une des sources les plus importantes du savoir médical – à côté de l'observation individuelle au chevet du malade, de la transposition des acquis scientifiques à l'homme et de l'expérimentation.

Naissance de l'épidémiologie

On considère que l'épidémiologie est née en 1854, lors de l'épidémie de choléra à Londres. À l'époque, la répartition des décès dans le quartier de Soho avait permis au docteur John Snow de conclure que l'épidémie provenait de l'eau de la pompe de Broad Street. Il fit donc ôter les bras de la pompe, ce qui eut pour conséquence de faire décroître en très peu de temps le choléra et de mettre un terme à l'épidémie. Cela se passait à une époque où l'on ne connaissait ni les agents ni la diffusion du choléra, et où de nombreux bruits, au fondement souvent douteux, circulaient sur les causes de cette maladie mortelle.

Pour John Snow, il avait été facile d'établir à l'époque un rapport entre la source d'eau potable et la maladie, étant donné que l'infection était extrêmement contagieuse et que le laps de temps entre la consommation de l'eau avariée et l'apparition des symptômes graves et caractéristiques, n'était compris qu'entre quelques heures à quelques jours. Pour la majorité des maladies, les données ne sont pas aussi évidentes. De nombreuses maladies ont des causes multiples qui engendrent parallèlement ou en combinaison seulement le mal. Souvent, entre le dommage causé et les premiers symptômes, il se passe des années, durant lesquelles l'évènement est atténué, voire même falsifié.

Les statistiques fournissent des données précieuses

Seules les méthodes statistiques permettent de se livrer à des affirmations fiables pour des groupes entiers de populations. Le terme de statistique a deux significations: d'une part la collecte systématique de données, par exemple, sur l'état de santé de la population. Les naissances, décès et causes de décès, tout comme les maladies, sont en permanence enregistrés et publiés par les autorités compétentes et les hôpitaux. Les tableaux et graphiques qui en résultent ne sont pas toujours simples à interpréter mais constituent une aide précieuse pour répondre à certaines questions à l'aide de données. D'autre part, on désigne également comme statistique les processus mathématiques permettant de déterminer si des observations sont significatives ou si elles tiennent au hasard.

Au début d'une *étude épidémiologique*, on compare les cas d'infection au sein de groupes spécifiques ventilés par sexe, profession ou lieu de domicile. Ce faisant, il est important de s'assurer que les données collectées soient complètes. De plus, elles doivent être corrigées pour permettre la comparaison entre les différentes structures d'âge. Une telle *étude de la population* ne représente à chaque fois qu'un instan-

tané de la situation et ne permet guère de se livrer à des affirmations sur l'évolution d'une maladie. Dans ce cas, les études dites de *cohorte* font avancer la recherche: un groupe précisément défini de patients souffrant d'une maladie déterminée est interrogé et étudié sur le long terme. Seule cette méthode permet de donner des indications exactes concernant la détérioration, le taux de complications ou les guérisons spontanées, car il va de soi que dans les statistiques des hôpitaux, on accorde une trop grande importance aux cas dont l'évolution est négative. De plus, toutes les circonstances, habitudes ou tous les risques professionnels suspects font l'objet de demandes détaillées dans le but d'obtenir des indications concernant la cause de la maladie.

Echantillonnages en cas de maladies rares

Lors de l'étude de maladies rares, il s'avère impossible de suivre cette démarche détaillée, étant donné que les statistiques officielles ne contiennent pas d'informations sur les conditions de vie et que les interviews à large échelle sont irréalisables. Dans les cas où les patients doivent être comparés à des milliers de personnes saines, on fait appel aux études dites cas-contrôle, c'est-à-dire qu'on sélectionne si possible au hasard quelques personnes normales pour chaque malade – en général d'un âge, d'un sexe et d'une origine correspondants – qui se mettent à disposition pour une interrogation détaillée. Cet échantillon aléatoire est utilisé dans le cadre d'une comparaison et permet de tirer des conclusions quant à la cause et aux facteurs de risque d'une maladie. On a cependant généralement à lutter contre la faible disponibilité des personnes saines pour accorder des entretiens et permettre des examens prolongés. Un pourcentage élevé de refus conduit automatiquement au scénario suivant: le reste des personnes interrogées ne peut plus être considéré comme un échantillon *représentatif* de la population normale, aussi devient-il impossible de tirer des conclusions définitives.

Limites et bénéfices de l'épidémiologie

Dans tous les cas, les *études épidémiologiques* fournissent uniquement des rapports numériques concordant avec une cause supposée, mais ne livrent jamais de preuve définitive de la *genèse* d'une maladie. Pour ce faire, des études et expériences en laboratoires sur des animaux sont nécessaires. Celles-ci servent à confirmer un soupçon. Souvent, de fausses conclusions ont été tirées en raison d'un *facteur de risque* supposé ou indirect – qui n'était donc pas la cause réelle de la maladie –, relevé à une fréquence nettement accrue chez les malades. Malgré ces restrictions et en dépit de son coût souvent élevé, l'épidémiologie est un domaine de la recherche médicale auquel on ne saurait renoncer. Elle est souvent en mesure de compléter les enseignements tirés des expériences biochimiques et de biologie moléculaire. En effet, ceux-ci permettent d'élaborer un grand nombre de connaissances détaillées mais ne permettent pas de confirmer la pertinence d'un résultat.

6.2 KiKK, étude sur la leucémie infantile à proximité des centrales nucléaires en Allemagne (2007)

L'étude sur la leucémie infantile à proximité des centrales nucléaires en Allemagne est née dans un climat de tensions politiques et trouve ses origines – comme tant d'autres *études épidémiologiques* de ce genre – dans une information de la presse grand public: à proximité de la centrale nucléaire de Krümmel, dans le Land du Schleswig-Holstein, un surnombre inusuel de décès d'enfants dus à des cancers a été constaté. Comme il existe depuis longtemps un registre complet des cancers infantiles en Allemagne, une première étude datant de 1992 a comparé les taux de maladie à proximité de toutes les centrales nucléaires avec ceux des régions possédant des structures similaires de population. 1610 cas de maladie ont été évalués dans 20 arrondissements avec centrales nucléaires, et à chaque fois dans un arrondissement idoine comme contrôle. Le risque d'être atteint d'une maladie néoplasique pendant l'enfance a également été comparé dans les différentes régions.

Résultats contradictoires de la première étude

Les résultats obtenus étaient contradictoires: toutes maladies néoplasiques confondues, la fréquence était inférieure à proximité des centrales nucléaires à ce qu'elle était dans les régions de référence. Le risque de leucémie était cependant de 6% plus élevé. D'autres calculs pour des groupes d'âge isolés, la distance du domicile à la centrale nucléaire et certains types de cancer ont donné un risque partiellement supérieur et partiellement inférieur. Statistiquement parlant, presque aucun résultat ne pouvait être différencié d'un résultat dû au hasard. C'est uniquement pour les leucémies aiguës des enfants de moins de cinq ans avec domicile distant de moins de 5 km de la centrale nucléaire, que l'évaluation montrait un risque significativement plus élevé. Le taux de maladie y reste cependant inférieur à la moyenne nationale en République fédérale d'Allemagne.

Des confrontations bilatérales entraînent une nouvelle édition

D'un côté, les scientifiques ont signalé que l'analyse des sous-groupes – même en cas de répartition totalement fortuite – donnait un résultat significatif dans un cas sur

20. De l'autre, les adversaires des centrales nucléaires ont insisté sur le fait que la leucémie, en tant que cancer le plus fréquent parmi les enfants habitant sur le lieu du plus grand risque, ne pouvait pas être balayée d'un revers de main. De plus, le risque plus élevé était nettement supérieur aux attentes, compte tenu de la charge faiblement supérieure de rayonnement *ionisant* pouvant être imputée à la proximité d'une centrale nucléaire. Dans cette situation, le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) a lancé une nouvelle étude à laquelle il a associé des représentants de la critique aux personnes jusqu'alors responsables. D'autres facteurs de risque expliquant la fréquence de la maladie devaient, en outre, y être examinés à l'aide d'entretiens détaillés.

L'étude KiKK et sa nouvelle approche

L'étude KiKK, publiée en 2007, est le fruit de ces efforts. Celle-ci renonce à la comparaison avec une région de référence dont le choix s'avère toujours problématique. En revanche, dans les trois arrondissements les plus proches de la centrale nucléaire, trois enfants du même âge et du même sexe ont été choisis au hasard pour chaque enfant malade, et la distance de leur domicile à la centrale nucléaire la plus proche a été comparée avec celle des enfants malades. C'est ce que l'on désigne sous le terme *d'étude cas-contrôle*. La proximité du lieu de domicile à la centrale nucléaire en tant que facteur influençant le risque de maladie a été examinée par le biais de deux méthodes: d'une part en comparant le périmètre de 5 km avec l'ensemble de la région, d'autre part à l'aide de *l'analyse de régression*, qui part du principe que le risque augmente au fur et à mesure de l'approche de la centrale et qu'il ne se base pas sur une distance de risque aléatoire. Lorsque les enfants de référence en bonne santé, sélectionnés au hasard, habitent à une distance comparable de la centrale nucléaire, on peut en conclure que cela n'a pas d'influence sur la fréquence des leucémies. S'ils habitent cependant à des distances supérieures, il faut partir du principe que la centrale nucléaire «attire» cette maladie et qu'il existe donc un risque supérieur.

Faiblesses de la nouvelle étude

A son stade de planification, cette étude correspond à l'état le plus récent de la science. Durant son exécution, elle a cependant été confrontée à certaines difficultés. Avant tout, personne n'était disposé à attendre encore une fois pendant 15 ans avant d'obtenir des résultats. C'est pour cette raison que les anciennes données ont été enrichies de données supplémentaires de plusieurs années, puis recalculées à l'aide des nouvelles méthodes. Par conséquent, la nouvelle étude ne peut pas être jugée comme une confirmation indépendante des résultats initiaux, en particulier parce que la suite de l'étude n'a pas

confirmé la tendance supérieure au risque. Des résultats aléatoires ne peuvent pas être confirmés ou infirmés en recalculant les mêmes données. Pour ce faire, il faudrait impérativement une nouvelle période d'observation avec un nombre suffisant de cas.

L'étude montre cependant que dans les alentours directs des centrales nucléaires habitent deux fois plus d'enfants malades que dans les zones de contrôles choisies au hasard. L'augmentation du risque de la première étude ne peut donc pas seulement s'expliquer par le choix des régions de référence. Durant la période d'étude de 1980 à 2003, 37 enfants au total ont développé une leucémie dans un périmètre de 5 km autour des 16 centrales nucléaires existant en Allemagne. Les statistiques laissaient présumer 17 cas de leucémie. Cela signifie que pour chaque centrale nucléaire on a constaté, en moyenne, tous les 18 ans un cas supplémentaire par rapport à la moyenne nationale.

De plus, il s'est avéré que trop peu de parents d'enfants de référence en bonne santé étaient disposés à donner des informations détaillées. Conséquence: la recherche d'autres tentatives d'explication a dû être abandonnée, ce qui représente une grave faiblesse de la nouvelle étude.

Malheureusement, on constate que la nouvelle étude KiKK n'a pas été en mesure de clarifier l'importance des centrales nucléaires et de leur radioactivité dans l'apparition de la leucémie infantile. Le rayonnement *ionisant* n'explique pas l'augmentation du risque dans les proportions données, l'étude KiKK n'a malheureusement pas pu étudier scientifiquement d'autres causes, et un résultat dû au hasard n'est toujours pas exclu. C'est là également la conclusion tirée par une expertise indépendante ordonnée par le ministère mandataire.

Sources

- Kaatsch P., Blettner M. et al. (2008). Leukämien bei unter 5-jährigen Kindern in der Umgebung deutscher Kernkraftwerke. Deutsches Ärzteblatt, volume 105, pages 725–32.
- Kaatsch P., Spix C. et al. (2008). Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. International Journal of Cancer, volume 1220, pages 721–726.
- Kaatsch P., Kaletsch U. et al. (1998). An extended study on childhood malignancies in the vicinity of German nuclear power plants. Cancer Causes & Control, volume 9, pages 529–533.
- Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Stellungnahme der Strahlenschutzkommission <<http://www.ssk.de/werke/volltext/2008/ssk0806.pdf>>

6.3 Aperçu des études réalisées jusqu'ici dans ce domaine

L'intérêt pour les maladies néoplasiques chez l'enfant en relation avec les installations nucléaires est né bien plus tôt déjà, autour de 1980. A l'époque, dans le cadre d'un reportage, une télévision locale anglaise informait que les cas de leucémie infantile étaient plus fréquents aux alentours de la centrale de traitement des déchets radioactifs de Sellafield. Dans la ville de Seascale, au lieu du cas attendu, on a dénombré 5 cas de leucémie infantile. Plusieurs études ont été organisées sous la forte pression de l'opinion publique, dans le but de confirmer et d'expliquer ce phénomène. Bien que celles-ci aient quelque peu corrigé les chiffres initialement indiqués, elles ont cependant confirmé le caractère accru du risque.

Sellafield reste l'exception

La centrale de Sellafield existait déjà depuis un certain temps. Vingt ans plus tôt, l'incendie d'un réacteur modéré au *graphite*, conjugué aux normes moins sévères de l'époque, a conduit à une *contamination* nettement décelable de l'environnement. Le rejet de matériel radioactif n'était cependant pas assez important pour déclencher l'accumulation des cas de leucémie. Les tentatives d'explication telles que l'exposition au rayonnement des pères sur le lieu du travail, la fréquentation de plages en bord de mer où des effluents liquides radioactifs avaient été éliminés ou la consommation de poisson radioactif n'ont pas pu être confirmées. Après presque 30 ans, Sellafield est l'unique centrale nucléaire dans les environs de laquelle la fréquence des cas de leucémie est toujours restée élevée.

Une autorité britannique fournit une contribution importante

L'autorité britannique COMARE (Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment), chargée de surveiller l'ensemble des centrales nucléaires britanniques, a fourni une contribution importante à la surveillance continue de la situation en publiant en 2005 son 10^e rapport concernant les répercussions sur la fréquence des cancers infantiles.

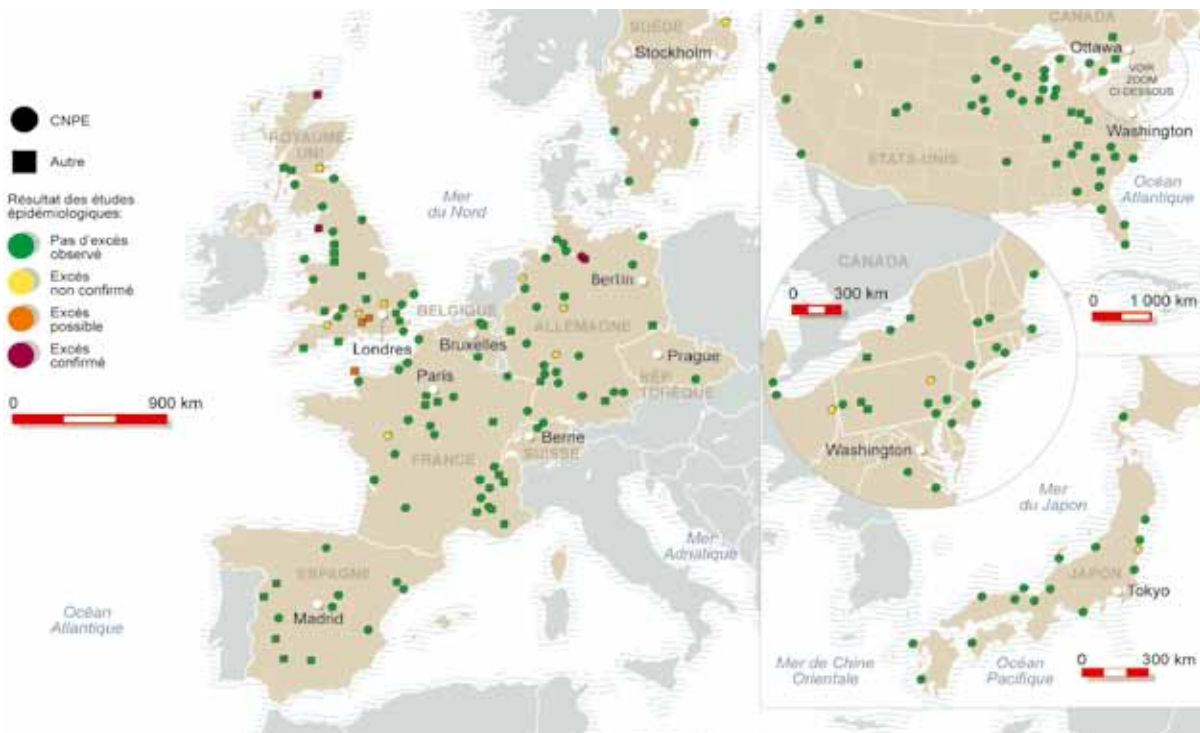


Illustration 5: carte montrant l'ensemble des centrales nucléaires étudiées.

Source: Dominique Laurier. IRSN, rapport DRPH/SRBE n° 2008-001, www.irsn.fr.

Dans cette vue d'ensemble englobant une période de presque trente ans, la fréquence des leucémies était légèrement plus élevée pour trois centrales nucléaires mais était inférieure à la moyenne nationale pour dix autres. Même la nouvelle *méthode de régression*, également utilisée pour l'étude KiKK, n'illustre pas d'augmentation en cas de faible distance par rapport à la centrale nucléaire. Dans les environs d'une autre usine de retraitement située près de Dounreay en Ecosse, où l'on avait constaté une fréquence plus élevée des cas de leucémie pendant les années 90, les chiffres se sont normalisés et aucun cas de leucémie ne s'est déclaré depuis 1992.

Des études aux résultats similaires à l'échelle mondiale

Plus de 50 études sur cette question ont été publiées dans le monde: en France, en Allemagne, aux Etats-Unis, au Japon, en Suède et en Israël. Les études sérieuses font défaut seulement pour la Russie et l'Europe de l'Est. Toutes ces *études épidémiologiques* (à l'exception de l'étude KiKK) montrent qu'il n'y a pas de cumul du taux de leucémies si l'on analyse tout un groupe de centrales nucléaires. Dans des études portant sur un seul cas, celles-ci dévoilent un risque partiellement plus élevé généralement sans que celui-ci n'atteigne une valeur statistiquement significative. Hors des frontières britanniques, études à long terme et programmes de surveillance continue manquent totalement. Il est mentionné en

passant que ces études font parfois ressortir des résultats surprenants. On a ainsi trouvé une accumulation de décès dans des régions où la construction d'une centrale nucléaire avait été planifiée mais jamais réalisée. A proximité d'Oxford où une augmentation du risque avait été constatée autour de trois centrales nucléaires voisines, la traditionnelle centrale à charbon s'est finalement révélée être à l'origine de la majorité des émissions radioactives (le charbon contient des traces de *radium*).

L'illustration 5 montre une carte de l'ensemble des centrales nucléaires étudiées. Un risque accru a été démontré pour les implantations signalées en rouge (3) et un risque encore suspecté subsiste pour celles qui sont signalées en orange (3). Les implantations en jaune indiquent les endroits dans lesquels la fréquence supposée du taux de leucémie a pu être infirmée par des études approfondies (12), et en vert les centrales nucléaires non suspectées d'un excès localisé de leucémies (177).

Sources

- Bridges B. et al. (2005). The incidence of childhood cancer around nuclear installations in Great Britain. COMARE Tenth Report. <http://www.comare.org.uk/documents/COMARE10thReport.pdf>
- Laurier D. et al. (2008). Les études épidémiologiques des leucémies autour des installations nucléaires chez l'enfant et le jeune adulte. Rapport DRPH No 2008_1: http://www.irsn.org/document/site_1/fckfiles/File/Internet/Actualites/IRSN-Rapport-Leucemie.pdf

6.4 Vue d'ensemble des méta-études publiées jusqu'à ce jour

Au regard de toutes ces études contradictoires réalisées sur un sujet aussi chargé d'affectivité, il est naturel de tenter de résumer clairement ces résultats. Cela se fait généralement à l'aide d'une *méta-étude*, c'est-à-dire que les données brutes de toutes les études disponibles sont recalculées ensemble puis analysées une nouvelle fois. Etant donné que ces études ont été évaluées de manière totalement différente, entreprendre de les résumer s'est avéré nettement plus difficile que prévu.

Ainsi, les patients souffrant de leucémie ont souvent été comptés deux fois lorsqu'ils sont entrés dans un autre hôpital pour leur traitement. Comme les décès dus à la leucémie étaient nettement moins nombreux que dans le passé en raison des méthodes de traitement améliorées, les résultats ne pouvaient être comparés. De même, les groupes d'âge, la définition du périmètre d'une centrale nucléaire et d'autres données de bases servant aux calculs ont été définis différemment.

Faible valeur informative de la méta-analyse

Baker et Hoel ont finalement évalué un total de 14 études qui avaient suffisamment de points communs pour permettre un décompte cumulé. En moyenne, l'augmentation du risque relatif s'élevait à 20% pour les enfants de moins de 9 ans et environ 10% pour tous les jeunes. Dans un pays comme l'Allemagne, cela correspond à un cas supplémentaire de leucémie tous les huit ans pour chaque centrale nucléaire. En raison des grandes divergences entre les études, la signification reste faible. Des 194 analyses de sites connues à l'époque, seules 50 ont été incluses dans la *méta-analyse*, les autres ne pouvant être évaluées selon la même méthode de calcul. C'est pourquoi les résultats ne peuvent pas être considérés comme *représentatifs*.

Une vue d'ensemble publiée en 1999 et offrant un aperçu global ainsi qu'une appréciation critique des qualités et limites de chaque étude s'avère plus importante. Celle-ci arrive à la conclusion suivante: des excès locaux de cas de leucémie infantile ont toujours été observés – et pas seulement en rapport avec les centrales nucléaires. En cas d'événements spectaculaires, toute tentative pour déceler une raison a régulièrement échoué. Pour l'opinion publique et les parents préoccupés, il aurait sûrement été

plus tranquilisant de disposer d'une surveillance constante et transparente, au lieu de résultats de cas particuliers souvent perçus comme dramatiques.

Nouveaux enseignements grâce à des statistiques complètes

Le groupe d'experts britanniques du COMARE a gardé le cap avec fermeté. Dans son dernier rapport sur le sujet, il a présenté une étude évaluant et analysant dans le détail plus de 30'000 cas de cancer infantile et les facteurs qui les favorisent dans tout le Royaume-Uni. Pour la première fois, à l'aide d'une statistique aussi bien fournie, la documentation a montré que les cas de leucémie infantile dépendaient visiblement de la couche sociale dans laquelle grandissent les enfants. Les enfants issus de milieux aisés vivent de manière plus isolée et ont moins de contacts avec des enfants de leur âge pendant leurs premières années de vie. Pour cette raison, les maladies traditionnelles des enfants se déclarent plus tard, c'est-à-dire à un moment où l'enfant n'est plus protégé par les anticorps de la mère et où son système immunitaire ne s'est pas encore parfaitement mis en place.

Si l'on prend comme base de calcul un comté anglais (comptant environ 1 million d'habitants), le taux de leucémie est d'environ 10% supérieur dans les milieux aisés à ce qu'il est dans les milieux les plus pauvres. Si les calculs sont faits sur la base des districts de recouvrement (5000 habitants en moyenne), la différence atteint même jusqu'à 50% entre les milieux aisés et les plus démunis en Ecosse. Plus les districts dans lesquels les structures sociales sont classifiées, sont petits et *homogènes*, plus les différences sont marquées. La comparaison entre les régions rurales et les centres-villes suit le même modèle, tout comme celle des zones résidentielles aux constructions aérées comparées à celles qui présentent des constructions denses. Dans les deux comparaisons, le taux de maladie du premier cas est significativement plus élevé. Il faut donc tenir compte de ces différences lorsqu'on compare la fréquence des leucémies à proximité des centrales nucléaires avec celle d'autres régions.

Autres facteurs de l'apparition de la leucémie

Il a pu, d'autre part, être montré à l'échelle nationale que les flux de population – en particulier les déplacements des habitants des villes vers les régions rurales – vont socialement de pair avec un taux nettement plus élevé de cas de leucémie dans les classes d'âge de 1 à 4 ans. Cela n'est dû qu'en petite partie à l'origine généralement aisée des personnes qui déménagent. De plus, il a été démontré que, suite à ces migrations, les leucémies mais également d'autres cancers infantiles sont localement et temporairement plus fréquents que ce à quoi on devrait s'attendre en cas de répartition purement fortuite.

Il n'existe pas encore d'explication à ce phénomène, désigné sous le terme de «*clustering*». Il n'est cependant pas limité aux environs des centrales nucléaires. Les chercheurs partent du principe que des enfants qui vivaient auparavant de manière isolée à un âge critique sont alors exposés plus souvent à de nouveaux agents infectieux. La carte 6, qui, pour chaque district d'Allemagne, illustre le risque de contracter la leucémie, le met également en évidence selon la structure de la population, le risque peut être 4 fois supérieur et ne se limite nullement aux circonscriptions avec centrale nucléaire. Certains districts atteignent des fréquences qui dépassent de 250% la moyenne nationale, même en corrigeant la ventilation par tranches d'âge.

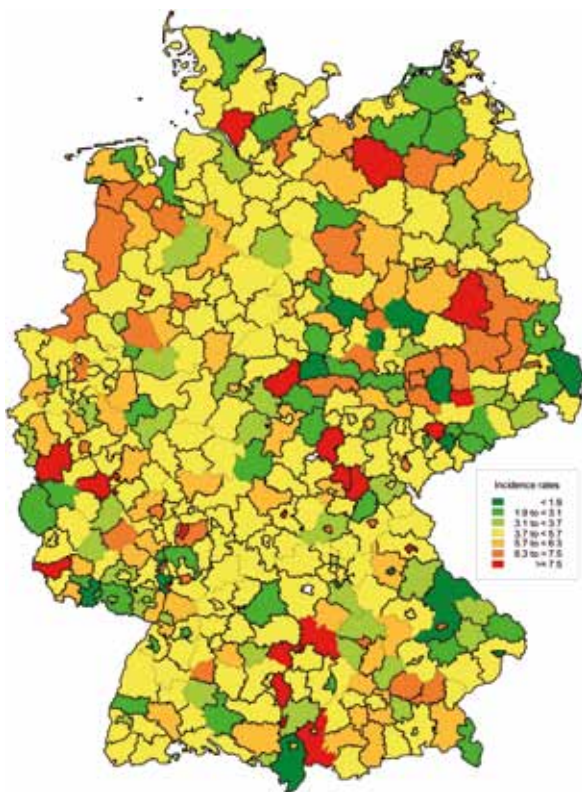


Illustration 6: carte de tous les arrondissements allemands. Les différentes couleurs signalent à chaque fois le risque qu'encourt un enfant de contracter la leucémie.

Source: Kaatsch P., Mergenthaler A. (2008). Incidence, time trends and regional variation of childhood leukaemia in Germany and Europe. *Radiation Protection Dosimetry*, volume 132, pages 107–113.

Sources

- Baker P., Hoel D. (2007). Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *European Journal of Cancer Care*, volume 16, pages 355–363.
- Elliot A. et al. (2006). The distribution of childhood

leukaemia and other childhood cancers in Great Britain 1969–1993. COMARE Eleventh Report. http://www.comare.org.uk/press_releases/documents/COMARE11thReport.pdf

- Laurier D., Bard D. (1999). Epidemiologic Studies of Leukemia among Persons under 25 Years of Age Living Near Nuclear Sites. *Epidemiological Reviews*, volume 21, pages 188–206.

6.5 Etudes épidémiologiques concernant d'autres causes

Sous cet éclairage, toute une série d'observations qui ont été réunies sur Sellafield au cours des dernières décennies, deviennent compréhensibles. Il explique le paradoxe d'après lequel, en Grande-Bretagne, aux USA et également en Allemagne, la fréquence des leucémies était également plus élevée dans des régions où une centrale nucléaire avait bien été planifiée mais n'avait jamais été construite.

Les migrations de population comme explication

A proximité de la centrale de traitement des déchets nucléaires de Dounreay, en Ecosse, qui affichait un taux de leucémie significativement plus élevé, on a noté que ce taux n'avait augmenté que dix ans après la mise en service de la centrale et qu'il avait fortement reculé depuis le milieu des années 90. P. Kinlen, un *épidémiologiste* du centre de recherche écossais sur le cancer, a pu rapporter de manière crédible ce phénomène au brassage de la population des années 1980 à 1990, à la suite de la découverte des champs de pétrole de la Mer du Nord, et à l'afflux important d'une main-d'œuvre nouvelle. Dans toutes les régions rurales dans lesquelles on avait recruté les travailleurs et où ces derniers revenaient tous les mois de leurs camps de chantiers, on a pu observer une nette augmentation de la fréquence des leucémies. La région qui entoure Dounreay en faisait également partie.

Des phénomènes similaires ont eu lieu pendant la Seconde Guerre mondiale, lors d'importantes migrations de la population: pendant la guerre, les enfants des métropoles ont massivement été déplacés à la campagne afin d'être mis à l'abri des bombardements. Sur les îles du Nord de l'Ecosse, où des milliers de soldats avaient été mutés, la fréquence des leucémies a même quadruplé. Après la guerre, lorsque les soldats qui n'avaient pas encore été démobilisés ont été affectés dans des zones peu habitées, les taux de leucémie y ont augmenté de manière notable. A cette époque, des villes nouvelles de 100'000 habitants ont surgi en un rien de temps dans différentes régions. Des agglomérations dont les habi-

tants provenaient des centres détruits de Londres et Manchester n'affichaient pas d'élévation de leur taux de leucémie. En revanche, la maladie était nettement plus fréquente dans les villes construites autour des nouvelles installations industrielles où se groupait la main d'œuvre originaire des districts ruraux.

Les «clusters» de leucémie confirment la thèse

Ce phénomène trouve sa confirmation la plus impressionnante à Hong-Kong, où près de 10 millions d'immigrés provenant de la Chine communiste toute proche ont afflué dans des agglomérations nouvelles au sein d'un système de santé bien organisé. La fréquence des leucémies infantiles y était partout significativement plus élevée.

La présence d'autres *clusters de leucémie* s'intègre également parfaitement dans ce modèle. Aux Etats-Unis, la fréquence des cas de leucémie à Fallon (Nevada), une base aéronautique éloignée datant de la Seconde Guerre mondiale, qui avait été transformée en centre de formation en 1996 avait fait beaucoup de bruit. Plus de 50'000 soldats ont été envoyés tous les ans dans cette ville de 8'000 habitants, ce qui a eu pour conséquence de multiplier par douze la fréquence des leucémies. On a cherché pendant des années des substances radioactives ou *toxiques* dans le but d'expliquer ce phénomène. La réunion d'un grand nombre de familles dans une région isolée suffit à expliquer la fréquence nettement plus élevée de leucémies par rapport à la moyenne nationale. Les rapports concernant les taux de leucémie plus élevés autour des lignes à haute tension en Suède s'expliquent selon un modèle similaire. Celles-ci ne sont généralement pas posées dans des régions habitées mais souvent construites plus tard, et les habitants de ces zones affichent un nombre d'immigrés supérieur à la moyenne.

Sources

- Kinlen L. (1995). Epidemiological evidence for an infective basis in childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, volume 71, pages 1–5.

7 Résumé

7.1 Evaluations et déductions

L'apparition d'une leucémie chez un enfant est coup du sort très durement ressenti par la famille, malgré des possibilités de traitement nettement améliorées. Pour l'entourage, il est également effrayant d'observer comment un enfant en pleine santé est visiblement atteint d'une

affection très sévère. Il est donc compréhensible que la fréquence apparente de cette maladie suscite de fortes émotions. Depuis la mise en place des services de santé publics, il y a près de 100 ans, l'histoire de la médecine connaît des cas de maladie d'une telle fréquence, dont on cherche régulièrement la raison avec beaucoup d'effort et d'empathie mais sans grand succès.

Encore récemment, des *études épidémiologiques* conduites dans de larges zones et reposant sur des statistiques à long terme ont montré que la leucémie n'apparaissait pas dans une dispersion fortuite mais qu'elle avait tendance à se répartir irrégulièrement, telle la goutte d'eau sur un imperméable bien imprégné. Les raisons en sont inconnues. On peut cependant prédire sans risque de se tromper que des annonces de telles fréquences reviendront régulièrement à l'avenir et qu'elles susciteront les suppositions les plus diverses, au gré des préjugés.

Ne pas perdre l'essentiel de vue

Il est important de ne pas perdre de vue les caractéristiques essentielles d'une maladie, en particulier lorsque l'air du temps est dominé par l'affectivité. Tandis que les cas de cancers augmentent continûment tout au long de la vie, il existe des tumeurs qui sont plus fréquentes chez l'enfant. Il s'agit, par exemple, des troubles du développement des organes et de la croissance ainsi que de la *leucémie lymphatique aiguë*, qui se déclare principalement chez les enfants âgés de 1 à 5 ans. Sous l'influence de ce type de cancer, les cellules sanguines lymphatiques, qui sont responsables de la production d'anticorps – un des plus importants mécanismes de notre système de défense immunitaire – se multiplient de manière incontrôlée. En réponse à un agent infectieux nouveau et rencontré pour la première fois, la division cellulaire est massivement stimulée pendant les premières années de vie et commence ensuite à produire des anticorps protecteurs. Plus tard, ceux-ci existent en un nombre suffisant et sont parfaitement armés pour assumer leurs tâches. Ils peuvent immédiatement commencer à assumer leur fonction de défense. C'est là le mécanisme des maladies d'enfant bien connues. En cas de défaut génétique préexistant, cette première stimulation peut déclencher une multiplication incontrôlée. C'est ce qui explique que cette maladie apparaît le plus souvent dans cette tranche d'âge.

La théorie sur les facteurs de risque est convaincante

Chaque nouveau né reçoit de sa mère une réserve d'anticorps pour la vie. Celle-ci le protégera jusqu'à l'âge d'un an contre ce genre d'infections. Dans cette phase de la vie, les infections peuvent être maîtrisées en douceur, sans stimulation excessive du système immunitaire. Pour cette raison, la théorie est convaincante: la *leucémie lymphatique aiguë* des enfants en bas âge pourrait être la conséquence d'une rencontre tardive avec des virus et bactéries fré-

quents, et ce, non seulement à l'état de nourrisson mais également en bas âge, en l'absence du bouclier protecteur maternel.

De plus, différentes observations épidémiologiques viennent renforcer cet avis. La leucémie infantile est plus rare dans les couches sociales plus pauvres vivant en ville, dans des logements étriqués. Elle se déclare nettement moins souvent lorsque les enfants ont été mis à la crèche très tôt. Au contraire, on la rencontre plus souvent dans les banlieues et à la campagne, où les possibilités de contact sont moins nombreuses, les infections y étant transmises plus tard. Une migration touchant des familles qui vivaient auparavant à l'écart et qui sont désormais confrontées à un grand nombre d'agents infectieux nouveaux s'avère particulièrement risquée et conduit à une certaine fréquence temporelle. La fréquence des leucémies a ainsi quasiment quadruplé sur les îles situées au nord de l'Ecosse lors de la mise en service des bases navales pendant la Seconde Guerre mondiale.

La composante génétique est une condition préalable de la leucémie

Evidemment, ce mécanisme n'explique pas à lui seul l'apparition globale de la leucémie chez l'enfant. Celle-ci reste heureusement, même en cas de risques élevés, une maladie rare. D'autres anomalies dans l'évolution de la biologie cellulaire déterminent l'apparition éventuelle de la maladie. Pour qu'elle apparaisse, il faut qu'il y ait dès la naissance une composante génétique. L'expérience suivante le prouve: lorsqu'un jumeau contracte la leucémie, le risque que l'autre jumeau tombe également malade augmente de vingt fois. Les méthodes actuelles de biologie moléculaire permettent, dans des cas isolés, de mettre en évidence après coup les avant-stades de la leucémie dans des échantillons de laboratoire contenant du sang de cordon ombilical.

Comme cette maladie apparaît rarement et ponctuellement, il existera toujours des rapports signalant son apparition fréquente et cela non exclusivement dans le voisinage de centrales nucléaires. Dans la grande majorité des cas, ces fréquences sont purement fortuites. Le caractère statistiquement significatif de ces fréquences ne signifie nullement que leur cause supposée soit définitivement prouvée. Cela veut seulement dire qu'en cas de répartition totalement fortuite, seule 1 étude sur 20 devrait donner un tel résultat. Mais comme la répartition de la maladie n'est pas égale, on peut même s'attendre à nettement plus de résultats «significatifs». Ceux-ci doivent être analysés isolément par rapport aux facteurs de risques connus, comme la densité de la population, le statut social et les mouvements migratoires, avant d'être interprétés comme étant l'expression d'un nouveau risque. Malheureusement, l'influence de ces facteurs de

risque ne peut pas être déterminée avec une exactitude suffisante pour que soient entreprises des corrections mathématiques précises sur les fréquences observées. Une nouvelle récolte de données durant la période temporelle consécutive offre, par conséquent, la sécurité la plus élevée: les résultats dus au hasard et les flux migratoires s'atténueront ou disparaîtront entièrement dans l'étude consécutive.

Appliquer des critères objectifs pour l'évaluation

Que peut-on retenir de crédible, en tant que citoyen intéressé ou préoccupé, dans cette situation d'incertitude? Même sans être soi-même épidémiologiste ou physicien en radiations professionnel, on peut évaluer les nombreux rapports et études à l'aide de critères objectifs. Il faut tout d'abord se demander quelle est la source de ce travail. Les revues scientifiques de renom ne publient pas d'articles qui n'ont pas été contrôlés par des spécialistes et dont les méthodes ne sont pas considérées comme parfaitement correctes. Cette «Peer-Review» (évaluation par les pairs) est un label de qualité auquel on peut se fier, car, non seulement la démarche mais également la pertinence des conclusions auront fait l'objet d'une vérification et d'une acceptation indépendantes. Si, au contraire, une nouvelle étude ne mentionne pas, comme source, une revue scientifique ou une autre publication renommée, il est fortement probable que les auteurs n'ont pas su faire face à la critique des spécialistes ou auront voulu consciemment l'éviter.

Indicateurs de crédibilité des études

Les rapports qui ne se fondent pas sur une seule enquête mais sur un programme continu de surveillance autour des centrales nucléaires sont particulièrement crédibles. Ceux-ci dépendent moins du hasard, décrivent les faits sur une période plus longue et utilisent une méthode constante et normalisée. Les aperçus nationaux et les statistiques récapitulatives sont plus dignes de confiance que les cas isolés qui sont volontiers choisis parmi le matériel disponible pour leur aspect frappant et en partie bienvenu. La comparaison du risque avec la moyenne nationale devrait toujours être indiquée même si la comparaison primaire a été calculée par rapport à une région qui, selon tels ou tels critères, devrait être particulièrement «similaire» à la zone entourant la centrale nucléaire. En règle générale, il faut être sceptique s'il y a absence de chiffres absolus. Une augmentation du risque de 70% semble, au premier abord, impressionnante. Si l'on apprend ensuite que la maladie a frappé 5 enfants au lieu des 3 escomptés pendant la période donnée, cette déclaration prend un caractère nettement relatif.

Le mode de présentation des conclusions est également un indicateur de crédibilité. Tout scientifique souhaite évaluer que ses collègues lui prouvent, grâce à des méthodes

plus récentes ou des réflexions plus pertinentes, qu'il a commis une erreur. Pour cette raison, ses conclusions seront prudentes et pondérées. Si les résultats sont présentés affirmativement comme définitifs et impératifs, sans comparaison avec des conclusions antérieures, et que des actions et démarches politiques immédiates soient revendiquées, la probabilité est grande que l'intérêt politique prévaut sur l'exactitude scientifique. Une évaluation nuancée et incluant la discussion des facteurs de risques connus: telle est la caractéristique d'une étude concluante. Toute tentative d'explication et tout développement allant à l'encontre de l'état reconnu de la science et des expériences passées, doivent être examinés de manière particulièrement critique.

7.2 Conclusions

Quelles conclusions peut-on tirer des données recueillies? L'étude, dans sa globalité, montre que la proximité d'une centrale nucléaire ne signifie pas, en règle générale, que le risque de leucémie soit plus élevé. Dans la majorité des lieux d'implantation de centrales nucléaires, soit aucune élévation de la fréquence des cas de leucémie n'a été constatée, soit elle n'a pas pu être confirmée par d'autres observations. Autour d'implantations isolées, on a constaté une fréquence plus élevée de cas, mais leur nombre absolu se situe dans une proportion également constatée pour d'autres risques: des circonstances de vie aisées, des habitations spacieuses et un contact limité avec d'autres enfants en bas âge.

Il n'est pas plausible que les émissions radioactives d'une centrale nucléaire sont responsables du risque de leucémie. Si la pathogénèse était provoquée par le rayonnement *ionisant*, la radioactivité provenant de sources naturelles devrait également entraîner un plus grand nombre de cas de leucémies infantiles. Les tumeurs radio-induites que connaissent les adultes ne devraient pas être absentes non plus. Les célèbres accidents de réacteurs nucléaires avec leurs conséquences sur l'environnement ou la plus grande charge de *C-14* pendant les essais d'armes atomiques des années 50 et 60, n'ont en aucun cas entraîné une augmentation des cas de leucémie – augmentation qui, vu les proportions, aurait dû être très forte.

La confrontation rationnelle est utile

Après Sellafield, la question d'une éventuelle corrélation entre le rayonnement et la leucémie infantile a été étudiée et élaborée avec beaucoup d'efforts et de ténacité. De nombreux enseignements plus récents, tels que l'influence des infections contractées tardivement, les risques des flux de migration ainsi que l'apparition, au niveau natio-

nal, de la leucémie infantile en *clusters*, ont d'abord été présumés au fil de ces recherches puis confirmés par des *études épidémiologiques* à large échelle. Même si les craintes initiales n'étaient pas fondées, elles nous ont fait avancer et nous ont amenés à mieux comprendre cette maladie. Cet exemple illustre le fait que la confrontation rationnelle avec un phénomène permet d'aller plus loin que la persistance idéologique dans une opinion préconçue.

De nombreux aspects différents doivent être minutieusement pris en compte pour qu'on puisse décider du rôle que jouera à l'avenir l'énergie nucléaire dans notre société: la sécurité d'approvisionnement, les coûts, les risques à long terme des dépôts en couches profondes et avant tout la question du laps de temps nécessaire à notre société pour changer ses habitudes sans tensions. A toutes ces questions, tout décideur et citoyen responsable doit trouver une réponse acceptable. La leucémie infantile fait-elle partie des réflexions qui doivent influencer cette décision? En notre qualité d'auteurs de cette brochure, nous sommes d'avis qu'il n'est pas suffisamment confirmé que la leucémie infantile est une conséquence directe du fonctionnement des centrales nucléaires. Et même dans les rares lieux où la suspicion n'a pas pu être clairement infirmée, le risque demeure faible par rapport à d'autres influences plus répandues concernant le mode de vie. Pour cette raison, nous considérons qu'il est inopportun de faire dépendre des décisions politiques d'une telle portée de suppositions peu avérées.

8 Annexes

8.1 Glossaire

A

Acides nucléiques: grandes «biomolécules» dans lesquelles sont stockées les informations génétiques. Son représentant le plus connu est l'acide désoxyribonucléique (DNA).

Aérosol: mélange de particules solides et/ou liquides en suspension avec un gaz (par ex. poussière fine dans l'air).

Aéroradiométrie: mesure de la radioactivité du sol à partir d'un hélicoptère.

Analyse de régression: l'analyse de régression est un processus mathématique de compensation permettant d'obtenir les chiffres les plus probables à partir de valeurs à mesurer qui varient ou sont imprécises. La démarche est similaire à celle qu'emploie un ingénieur lorsqu'il veut construire une route à in-

clinaison égale sur un terrain en colline sans avoir, à la fin, trop ou trop peu de matériel de remblai. Dans son mandat, il est fixé que la route doit avoir une inclinaison égale. L'observation d'une analyse de régression présuppose l'existence d'un modèle mathématique auquel les chiffres seront le mieux possible adaptés.

Ankylose: raideur d'une ou de plusieurs articulation due à un processus pathogène.

Apoptose: mort programmée des cellules. Il s'agit, en quelque sorte, du «suicide» d'une cellule isolée dû à un facteur externe (par ex. causé par des cellules immunitaires) ou au fort endommagement de l'information génétique.

B

Benzène (angl. benzene): hydrocarbures aromatiques cancérigènes.

C

C-14: Carbone-14. Le carbone le plus courant est le C-12. Son noyau atomique se compose de 6 protons + 6 neutrons. Le C-14 se forme à partir du rayonnement de l'azote de l'air avec des neutrons (provenant du soleil, des explosions atomiques ou d'un réacteur atomique), il s'agit d'une forme radioactive du charbon. Son noyau se compose de 6 protons et de 8 neutrons. Le C-14 se dégrade lentement et émet un *rayon bêta* faiblement énergétique.

Carcinome: type de cancer de la peau, des muqueuses ou du tissu glandulaire.

Champs/ondes électromagnétiques: on compte, par exemple, parmi eux les ondes radio, les radars, les micro-ondes, la lumière visible, la lumière infrarouge, la lumière ultra-violette, les *rayons X* ou les *rayons gamma*.

Chimiothérapie: traitement médicamenteux servant à lutter contre le cancer.

Chromosome: structures microscopiques au sein du noyau cellulaire contenant la substance génétique ADN. Les cellules humaines possèdent 46 chromosomes.

Cluster – clustering: (terme anglais signifiant grappes, agglomérat). On désigne sous le terme de «cluster» un groupe de points ou d'unités étroitement assemblés dont aucun mécanisme connu ne permet d'expliquer la fréquence. En astronomie, on parle par exemple de clusters d'étoiles, dans les études de marché de clusters de la demande. Le terme est utilisé en épidémiologie pour désigner des maladies temporellement et localement groupées.

Cohorte – étude de cohorte: en désigne par cohorte un groupe d'individus que l'on suit pendant une période de

temps prolongée et dont on connaît le nom. Au début de l'épidémie du SIDA, un groupe de malades nouvellement infectés s'est engagé à se soumettre à des contrôles réguliers. Ainsi, la durée de survie, les causes les plus fréquentes de décès et les complications les plus courantes ont pu être évaluées exactement. Contraire: études de population.

Compteur de Geiger-Müller: dosimètre comptant les particules isolées ou les quanta gamma.

Confidence-Intervall ou intervalle de confiance: paramètre de précision statistique permettant de calculer un rapport (par exemple un risque) sur la base des données existantes. En règle générale, on indique une valeur plus basse et plus élevée, de manière que le risque réel soit compris à 95% dans cette fourchette.

Contamination: souillure provenant de substances radioactives.

D

Déterministe: qui est prévisible selon des règles précises. Exemple: selon leur durée, les conditions météorologiques, l'altitude et la sensibilité individuelle, les bains de soleil prolongés entraînent des héliodermes plus ou moins prononcées avec rougeurs, la desquamation de la peau et éventuellement la formation de cloques. Cette réaction est prévisible et, avec de l'expérience, peut être planifiée de manière à éviter toute rougeur douloureuse. Contraire: *probabiliste*.

Dosimètre: instrument servant à mesurer la dose de rayonnement.

E

Enzyme (anciennement ferment): protide en mesure de catalyser des réactions biochimiques.

Epicentre: en surface, l'épicentre est situé à la verticale du point d'explosion d'une bombe.

Epidémie: apparition d'un grand nombre de cas de maladie dans un lieu et à un moment donnés. Des maladies infectieuses comme la peste se sont, par exemple, répandues en épidémies parce que les voies de transmission étaient propices et que les personnes n'étaient pas immunisées. Mais nous parlons également d'épidémies lorsque les maladies ne sont pas transmissibles. Actuellement, le concours des phénomènes télévision, popcorn et escaliers roulants entraîne une épidémie de surpoids chez les jeunes.

Epidémiologie – études épidémiologiques: sciences étudiant les causes possibles d'une maladie donnée et les groupes de patients particulièrement touchés à partir des cas isolés et de la fréquence de la maladie. Cela englobe

la description minutieuse des cas, son recensement exact et le choix d'une grandeur de référence adéquate pour la comparaison. Si ces données sont optimisées et réalisées pour une question précise, on parle d'étude épidémiologique.

Etude cas-contrôle: une *étude épidémiologique* pour laquelle un groupe explicitement choisi au hasard sert de grandeur de référence. Pour les cas rares, la comparaison avec la moyenne de la population, en particulier lorsque l'on étudie des détails particuliers, n'est pas praticable. Une comparaison avec, par exemple, les frères et/ou sœurs des malades ne permettra guère de reconnaître un comportement à risque spécifique tel que, par exemple, la sous-alimentation. Si j'interroge, en revanche, des personnes du même âge choisies au hasard dans l'annuaire téléphonique, je pourrai constater rapidement quelles sont les différences majeures existant par rapport aux malades.

Etude de population: on désigne par étude de population une enquête décrivant une maladie ou un comportement au sein d'un groupe défini sans tenir compte du fait que le groupe pourrait se modifier, même au niveau de sa composition. Dire que dans un gymnase, en moyenne 6% des élèves ne passent pas dans la classe supérieure correspondrait à une étude de population. Une description plus exacte – soit 100 nouveaux gymnasiens, parmi lesquels 20 élèves doivent recommencer une des deux premières années; 5 élèves, l'une des 3 classes suivantes, et 15 élèves quittent le gymnase sans maturité – correspondrait à une *étude de cohorte*.

F

Facteur de risque: en médecine, cause partielle possible. Par exemple, tabagisme et surpoids sont des facteurs de risque de la crise cardiaque. En physique, coefficient de probabilité. Par exemple 5% par sievert.

Fluorescence: «lumière emmagasinée» qui rayonne en retard. On appelle fluorochromes les substances dont les molécules sont excitées par l'énergie lumineuse et lors de leur retour à l'état normal émettent cette lumière.

G

Genèse: en médecine, la genèse désigne la cause d'un trouble. Pour ce qui est du symptôme de Down, on sait, par exemple, que la cause de la maladie réside dans les trois copies du *chromosome 21* mais ce n'est là qu'une modification au sein de la genèse.

Graphite: forme de carbone qui est par exemple utilisée pour les mines de crayon. Celui-ci sert de frein aux neutrons (modérateur) dans certains types de réacteurs nucléaires (réacteurs à eau légère).

H

Homogène: égal, sans différences intrinsèques. Au début, le lait est homogène, lorsqu'on le laisse reposer, la crème se dépose en surface. Ce processus peut être ralenti par l'homogénéisation, c'est-à-dire la diminution de la taille des gouttelettes de graisse.

I

Incidence du cancer – incidence: on désigne par incidence la fréquence d'apparition d'une maladie sur une période de temps donnée au sein d'une population. L'incidence des blessures au genou est élevée parmi les conducteurs de motos. Sur 100 détenteurs de motos, trois connaissent une telle mésaventure chaque année. Pour la plupart des organes, l'incidence du cancer augmente nettement avec l'âge.

Ioniser: arracher des électrons des atomes ou molécules.

Isotopes: atomes du même élément chimique (même nombre de protons dans le noyau) qui ne se différencient que par un nombre différent de neutrons au sein du noyau. Par exemple C-12 et C14 sont des isotopes du carbone.

L

Latence – Temps de latence: on désigne par latence, la période de temps comprise entre l'effet d'une cause et la première manifestation de la maladie. Le cancer de la plèvre ou mésothéliome peut encore se déclarer après un temps de latence supérieur à 20 ans suivant la dernière inhalation de poussière d'amiante.

Leucémie lymphatique aiguë (LLA): les leucémies sont des maladies néoplasiques des cellules sanguines conduisant à une multiplication incontrôlée des globules blancs. La leucémie lymphatique aiguë est une leucémie partant d'une dégénération maligne des précurseurs des cellules de lymphocytes.

Leucémie myéloïde aiguë (LMA): en cas de leucémie myéloïde aiguë, on constate une dégénération des cellules myéloïdes, c'est-à-dire des cellules précurseurs des granulocytes et des monocytes de la moelle osseuse.

M

Maladies cardiovasculaires: maladies qui touchent le cœur et les vaisseaux sanguins.

Meta-étude – méta-analyse: une méta-étude est le résumé de plusieurs études planifiées et publiées isolément. Lorsque l'enquête PISA compare le taux de connaissances acquises dans les différents pays, cela correspond à une méta-étude. La méta-analyse est la méthode de calcul utilisée dans ce but. Généralement, elle illustre graphiquement le résultat individuel mais également le poids de chaque étude en comparaison avec le résultat global.

Métastase: tumeur secondaire d'une pathologie maligne.

Millisievert: 1/1000 de 1 sievert. L'exposition moyenne de la population au rayonnement s'élève à 4 millisieverts (mSv) par an.

Modification préleucémique: premier stade d'une modification leucémique cancéreuse définitive.

Morbus Bechterew: cf. *spondylitis ankylosans*.

Mutation: modification du patrimoine héréditaire.

O

Organismes cellulaires (terme ayant plusieurs sens, plutôt «petit organe»): compartiments spécialisés d'une cellule, comme par exemple le noyau cellulaire les mitochondries.

P

Peer-review: Le terme de peer-review (évaluation par les pairs) désigne le contrôle de qualité critique et l'évaluation effectuée par des collègues spécialisés.

Pesticide: substances chimiques éliminant les organismes désagréables ou nuisibles (comme les insectes).

Probabiliste: un comportement qui ne peut pas être prédit avec certitude pour le cas isolé mais seulement avec une probabilité générale. Exemple: les *carcinomes* de la peau apparaissent principalement à la tête et aux mains – donc sur les parties du corps non couvertes par des habits. Les pêcheurs, paysans et personnes fréquentant les solariums sont plus souvent touchés que le citoyen moyen. La probabilité est donc forte que les rayons UV du soleil en sont la cause. Dans le cas isolé, on ne peut cependant pas prédire que telle personne développera un *carcinome*, ni après combien d'expositions au soleil. Contraire: *déterministe*.

Produit de décomposition: dénommé également produit secondaire ou de filiation. Après la décomposition radioactive d'un noyau atomique instable, il se forme un nouveau noyau atomique qui peut être stable ou instable. Il s'agit du produit de décomposition. Si celui-ci est instable, il se décompose à son tour. La décomposition de l'*uranium* entraîne une longue série de produits de décomposition qui ne s'arrête qu'au plomb stable.

R

Radiographie: image radiologique momentanée enregistrée sur une pellicule photographique.

Radioscopie: image radiologique animée sur l'écran.

Radium: élément naturel numéro 88, descendant de l'*uranium*.

Radon: élément naturel numéro 86, descendant du radium ou du thorium. Le radon est un gaz. Il pénètre à travers les fissures de la croûte terrestre et peut se diffuser dans les appartements situés au rez-de-chaussée et dans les caves. Les produits de filiation du radon qui sont eux-mêmes radioactifs exposent les poumons à une dose radioactive lors de l'inhalation du gaz.

Rayons alpha: noyaux d'atomes d'hélium en mouvement rapide. Ceux-ci sont formés de 2 protons et de 2 neutrons. Dans l'univers subatomique, il s'agit d'immenses projectiles qui se cognent partout. Leur portée dans l'air est de quelques centimètres environ. Une feuille de papier suffit à les arrêter. Dans le tissu biologique, leur rayonnement *ionisant* est dense sur une voie très courte (inférieure à 1/10 millimètre).

Rayons bêta: électrons en mouvement rapide. Leur portée est de quelques mètres dans l'air et de quelques centimètres dans l'eau.

Rayons gamma: paquets d'ondes électromagnétiques tels que les *rayons X* mais plus énergétiques et plus pénétrants. Ils atteignent plusieurs centaines de mètres dans l'air et jusqu'à environ 50 cm dans l'eau.

Représentatif: typique et correspondant à la moyenne générale d'un groupe. Exemple: vêtu d'une chemise blanche, d'un costume sombre et d'une cravate discrète, Monsieur Exemple était représentatif des conseillers fiscaux à succès.

S

Sarcome: tumeur maligne (cancer) partant du tissu conjonctif ou de soutien (mésoderme).

Spondylitis ankylosans/maladie de Bechterew: rhumatisme inflammatoire chronique avec raideur des articulations (ici: en particulier des articulations de la colonne vertébrale).

Syndrome de Down (trisomie 21): *mutation* génétique chez l'homme qui se manifeste par la présence de trois copies du *chromosome 21*.

Système lymphatique: élément du système immunitaire du corps. Sert à empêcher la pénétration d'agents infectieux, de particules tierces et d'éléments constitutifs du corps ayant subi un changement pathologique.

T

Toxique: agissant comme un poison.

(Tritium) Industrie de traitement du tritium: traitement des peintures luminescentes, qui, dans le passé, employait le *radium*.

U

Uranium: élément naturel numéro 92. Métal lourd généralement présent partout dans la croûte terrestre. Dans chaque poignée de terre, on trouve de nombreux atomes d'uranium. L'uranium est légèrement instable et se décompose radioactivement. Le *radium* et le *radon* sont, entre autres, des produits de filiation de la décomposition de l'uranium.

8.2 Autres sources

8.2.1 Bases générales

Radiobiologie et radioprotection:

- Annals of the ICRP vol. 37/2-4 (2007). ICRP Publication 103. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2.
- Hall EJ., Giaccia AJ. (2006). Radiobiology for the Radiologist. Edition: 6. Lippincott, Williams & Wilkins.
- Smith J. and Beresford N.A. (2005). Chernobyl: Catastrophe and consequences. Springer-Verlag, ISBN 3-540-23866-2.
- US National Research Council, BEIR VII Report (2006) (BEIR = Biological Effects of Ionising Radiation) Phase 2: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionising Radiation. Chapitre 6: Atomic Bomb Survivor Studies.

Leucémie infantile:

- Alexander FE., Boyle P., Carli P-M. et al. (1999). Population density and childhood leukaemia: results of the EUROCLUS Study. European Journal of Cancer, volume 35, pages 439–444.
- Caughey RW., Michels KB. (2009). Birth weight and childhood leukemia: a meta-analysis and review of the current evidence. International Journal of Cancer, volume 124, pages 2658–70.
- Interdisziplinäre Leitlinie der Deutschen Krebsgesellschaft und der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie: Akute lymphoblastische (ALL) und akute myeloische (AML) Leukämie im Kindesalter: <http://www.uni-duesseldorf.de/awmf/II/025-014.htm>
- Kabuto M., Nitta H., Yamamoto S., Yamaguchi N., Akiba S., Honda Y., Hagihara J., Isaka K., Saito T., Ojima T., Nakamura Y., Mizoue T., Ito S., Eboshida A., Yamazaki S., Sokejima S., Kurokawa Y., Kubo O. (2006). Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. International Journal of Cancer, volume 119, pages 643–650.
- Michaelis J., Schüz J., Meinert R., Menger M., Grigat JP., Kaatsch P., Kaletsch U., Miesner A., Stamm A.,

Brinkmann K., Kärner H. (1997). Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. Cancer Causes & Control, volume 8, pages 167–174.

- McNally R.J., Eden TO. (2004). An infectious aetiology for childhood acute leukaemia: a review of the evidence. British Journal of Haematology, volume 127, pages 243–263.
- Reynolds T. (1998). Causes of childhood leukemia beginning to emerge. Journal of the National Cancer Institute, volume 90, pages 8–10.
- Stillier CA., Kroll ME., Boyle PJ., Feng Z. (2008). Population mixing, socioeconomic status and incidence of childhood acute lymphoblastic leukaemia in England and Wales: analysis by census ward. British Journal of Cancer, volume 98, pages 1006–1011.
- UK Childhood Cancer Study Investigators. (1999). Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. Lancet, Volume 354, Seite 1925–1931.
- Wakeford R., Little MP. (2003). Risk coefficients for childhood cancer after intrauterine irradiation: a review. International Journal of Radiation Biology, volume 79, pages 293–309.

Statistique et épidémiologie:

- Fletcher R. & S. (2007). Klinische Epidemiologie. H. Huber Verlag Bern

8.2.2 Aperçu des principales études épidémiologiques

Sellafield: Black D. (1984). Investigation of the possible increased incidence of cancer in West Cumbria. HMSO. Bihell J. et al. (1994). Distribution of childhood leukaemias and non-Hodgkin's lymphomas near nuclear installations in England and Wales. British Medical Journal, volume 309, pages 501–505.

Downreay: Sharp L. et al. (1996). Incidence of childhood leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma in the vicinity of nuclear sites in Scotland, 1968–93. Occupational and Environmental Medicine, volume 53, pages 823–31.

La Hague: Viel J. et al. (1993). Childhood Leukemia Incidence in the Vicinity of La Hague Nuclear-Waste Reprocessing Facility (France). Cancer Causes & Control, volume 4, pages 341–343. Guizard A. et al. (2001). The incidence of childhood leukaemia around the La Hague nuclear waste reprocessing plant (France): a survey for the years 1978–1998. Journal of Epidemiology and Community Health, volume 55, pages 469–474.

Krümme: Grosche B. et al. (1999). Leukaemia in the vicinity of two tritium-releasing nuclear facilities: a comparison of the Krümmel Site, Germany and the Savannah River Site, South Carolina, USA. *Journal of Radiological Protection*, volume 19, pages 243–252.

Suède: Waller L. et al. (1995). Detection and assessment of clusters of disease: An application to nuclear power plant facilities and childhood leukemia in Sweden. *Statistics in Medicine*, volume 14, pages 561–564.

France: Hatchouel J. et al. (1995). Leukaemia mortality around French nuclear sites. *British Journal of Cancer*, volume 71, pages 651–653.

Canada: McLaughlin J. et al. (1993). Childhood leukemia in the vicinity of Canadian nuclear facilities. *Cancer Causes & Control*, volume 4, pages 51–58.

Etats-Unis: Jablon S. et al. (1991). Cancer in populations living near nuclear facilities. A survey of mortality nationwide and incidence in two states. *Journal of the American Medical Association*, volume 265, pages 1403–1408.

Japan: Yoshimoto Y. et al. (2004). Research on potential radiation risks in areas with nuclear power plants in Japan: Leukaemia and malignant lymphoma mortality between 1972 and 1997 in 100 selected municipalities

l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité nucléaire) www.bmu.de

- BfS: Bundesamt für Strahlenschutz (D) (Office fédéral de la radioprotection) www.bfs.de
- FS: Fachverband für Strahlenschutz (D+CH) www.fs-ev.de et www.fs-ev.ch
- ILK: Internationale Länderkommission Kerntechnik (D) (Comité international de technologie nucléaire) www.ilk-online.org
- ASN: Autorité de Sûreté Nucléaire (F) www.asn.fr
- IRSN: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (F) www.irsn.fr et www.irsn.org
- NRC: Nuclear Regulatory Commission (US) (Commission de la réglementation nucléaire) www.nrc.gov
- EPA: Environmental Protection Agency (US) (Agence pour la protection de l'environnement) www.epa.gov

Recherche sur la leucémie infantile:

- Registre Suisse du Cancer de l'Enfant <http://www.registretumeursenfants.ch>
- Ligue suisse contre le cancer www.liguecancer.ch/fr/index.cfm
- Centre international de Recherche sur le Cancer www.iarc.fr
- Information zu Kinderkrebs (informations sur le cancer de l'enfant) www.kinderkrebsinfo.de

Etudes épidémiologiques sur la leucémie infantile et les centrales nucléaires:

- Etude suisse sur la leucémie infantile et les centrales nucléaires – CANUPIS www.canupis.ch
- Etude allemande sur la leucémie infantile et les centrales nucléaires – KiKK www.kinderkrebsregister.de/info_kikk.html

8.3 Autres liens

Autorités, commissions et organisations spécialisées:

- Bases en matière de rayonnement, de radioactivité et de son de l'Office fédéral de la santé publique <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/index.html?lang=fr>
- Commission internationale sur la protection radiologique www.icrp.com
- IAEA: International Atomic Energy Agency / Agence internationale de l'énergie atomique www.iaea.org
- OMS: Organisation mondiale de la santé www.who.org
- UNSCEAR: United Nation Scientific Committee for the Effects of Atomic Radiation (Commission scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants) www.unscear.org
- OCDE-AEN: Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE www.nea.fr
- IFSN: Inspection fédérale de la sécurité nucléaire www.ensi.ch
- BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (D) (Ministère fédéral allemand de

Impressum

Editeur:

Forum Médecine et Énergie, Case postale,
8040 Zurich, Téléphone +41 43 501 18 50,
www.fme.ch, kontakt@fme.ch

Auteurs:

Dr Karl Ledermann
Prof. Dr Felix Niggli
Dr Serge Prêtre
Dr Jürg Schädelin
Dr Daniel Frey

Rédaction:

Forum Médecine et Énergie, Case postale,
8040 Zurich, Daniel Frey, Eveline Müller

Impression:

NiedermannDruck AG, Rorschacherstrasse 290,
9016 Saint-Gall, Téléphone +41 71 282 48 80,
www.niedermanndruck.ch, office@niedermanndruck.ch

Adresse de commande:

Forum Médecine et Énergie, Case postale,
8040 Zurich, Téléphone +41 43 501 18 50,
kontakt@fme.ch

2^{ième} édition, juillet 2010

Copyright © 2010, Forum Médecine et Énergie

À propos du «Forum Médecine et Énergie»

Depuis 1984, le «Forum médecine et énergie» (FME) s'engage pour une politique énergétique suisse responsable, qui englobe sans préjugé tous les secteurs essentiels de l'énergie. Dans les débats publics sur la question de l'énergie, le FME représente le point de vue de la science, de la recherche et de la médecine, étayé par des informations scientifiques, afin de favoriser la formation d'une opinion aussi objective et rationnelle que possible. 250 médecins dans toute la Suisse font actuellement partie du FME, dont le siège est à Zurich. fme.ch (site en allemand uniquement)

A propos des auteurs

Dr Karl Ledermann

Le Dr Ledermann est spécialiste en chirurgie orthopédique. Il est membre du Forum Médecine et Énergie depuis sa fondation, et a acquis, depuis lors, des compétences considérables dans les domaines qui confinent à l'interface entre médecine et énergie.

Prof. Dr Felix Niggli

Le Prof. Niggli est responsable du département d'oncologie pédiatrique du Kinderspital de Zurich. Il traite les enfants atteints de leucémie et s'investit dans la recherche sur le cancer. En sa qualité de privat-docent de l'Université de Zurich, il est également responsable de la formation pré- et postgraduée des médecins. Felix Niggli assume la charge de vice-président du Groupe Suisse d'Oncologie Pédiatrique (GOPS).

Dr Serge Prêtre

Serge Prêtre possède un diplôme de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich en physique nucléaire expérimentale. Il est également titulaire d'un doctorat de l'EPF de Lausanne. Il a très largement contribué à la mise en place de la division de radioprotection de la DSN (Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires) et a présidé cette dernière pendant plusieurs années. De 1995 à 1999, il a assumé les fonctions de directeur de la DSN (aujourd'hui Inspection fédérale de la sécurité nucléaire).

Dr Jürg Schädelin

Le Dr Schädelin est spécialiste en médecine interne. Il dirigeait le département de recherche clinique de Sandoz et se consacre principalement aux domaines de l'immunologie et des maladies infectieuses. Jürg Schädelin a également été directeur médical du Département d'épidémiologie et de sécurité des médicaments chez Novartis.

Dr Daniel Frey

Daniel Frey gère depuis 2004 le Forum Médecine et Énergie. Il est conseiller indépendant en communication. En sa qualité de membre du directoire, il représente le FME au sein du comité d'experts. Daniel Frey est docteur en histoire.

