

Les effets sur la santé de faibles doses de radiations ionisantes

Nouveaux résultats épidémiologiques et perspectives

Gilbert Eggermont, Louis de Saint-Georges et Hans Vanmarcke *

L'évaluation des effets sur la santé de faibles doses de radiations ionisantes demeure un sujet controversé. À première vue, cette situation semble paradoxale dans la mesure où les données épidémiologiques d'Hiroshima et de Nagasaki de même que des décennies de recherche radiobiologique ont permis d'accumuler des connaissances considérables sur les impacts potentiels sur la santé. Le présent article examine la manière dont la gestion actuelle des risques dans le secteur nucléaire s'efforce de tenir compte des incertitudes et de les intégrer dans une approche prudente.

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ont caractérisé le risque de cancer induit par les radiations ionisantes dès qu'ils ont disposé de preuves épidémiologiques. Aussi, de nombreux systèmes de sécurité sociale ont pris en considération les lésions causées par les radiations ionisantes, non seulement en les indemnisant comme une maladie professionnelle lorsque l'existence de telles lésions ou l'insuffisance de protection sont prouvés, mais aussi en prenant des mesures préventives en faveur des travailleuses enceintes.

Cet article étudie le risque relatif d'une exposition à de faibles doses de radiations ionisantes, telles qu'on les rencontre dans l'environnement, sur les lieux de travail et en médecine, à l'exception des thérapies contre le cancer (lorsque les radiations sont utilisées afin d'éliminer les cellules malignes).

Dans un premier temps, nous analyserons la nature des effets en distinguant les effets stochastiques et non stochastiques (définis plus loin). Les mécanismes biologiques d'interaction avec les radiations seront mis en lumière. Nous nous efforcerons à expliquer les raisons des controverses, les différences de perception, les dynamiques de groupe et les intérêts en jeu. Dans un deuxième temps, nous examinerons les résultats des dernières études épidémiologiques et les perspectives offertes par de nouvelles avancées en biologie moléculaire, en mettant l'accent sur les questions éthiques et les maladies professionnelles. Une attention particulière sera accordée aux risques accrus de l'exposition fœtale. Nous conclurons en nous attachant au défi posé par une exposition multifactorielle.

Les effets biologiques des radiations ionisantes

Il n'existe aucun doute en ce qui concerne les effets sur la santé de fortes doses de radiations ionisantes dans la mesure où l'on dispose dans ce domaine d'une relation dose-réponse claire. Dans le cas de ces effets dits déterministiques, la gravité des effets est directement liée au nombre de cellules endommagées. Les événements ionisants à forte dose sont exceptionnels et sont essentiellement enregistrés lors d'accidents, d'opérations militaires ou encore de traitements médicaux, cas dans lequel les effets dommageables attendus sont destinés à éliminer une tumeur. La politique de radioprotection doit prévenir toute exposition des travailleurs à de fortes doses.

Le problème important posé par l'exposition à de faibles doses de radiations réside dans l'augmentation du risque d'un cancer avec l'augmentation de la dose de radiations. À faibles doses, la probabilité d'un effet – et non sa gravité – est liée à la dose. Quelle que soit la dose absorbée, si un cancer se développe, la gravité de l'effet (l'issue étant fatale dans la moitié des cas) n'est pas en question. En conséquence, ce qui doit être évalué en l'espèce est la probabilité d'occurrence d'un cancer. De tels effets tardifs sont appelés probabilistes ou stochastiques.

On ne dispose pas de données prouvant une fréquence accrue des cancers et autres effets négatifs sur la santé humaine à des doses inférieures à 20 millisievert (mSv, voir encadré p. 20), valeur qui correspond à la limite annuelle qui a été fixée pour les travailleurs et à une dose susceptible d'être délivrée lors d'exams radiologiques médicaux. Certains ont fixé cette valeur à un niveau plus élevé allant jusqu'à 200 mSv, tandis que d'autres estiment qu'une valeur s'élevant à 10 mSv est déjà significative pour une exposition in utero. Cette absence de preuves peut signifier soit qu'il n'y a pas d'effet dommageable à des doses de radiations aussi faibles, soit que les effets sur la santé susceptibles de se déclarer sont trop peu nombreux pour être statistiquement significatifs.

Si l'indicateur de risque pour la santé qu'est la dose efficace est un outil précieux pour de nombreuses applications, il présente un caractère trop indirect et un champ trop limité pour le stress environnemental et l'exposition de patients en radiologie, domaine dans lequel des limites importantes de ce concept ont été identifiées. Des indicateurs biologiques

* SCK-CEN, Centre d'étude de l'énergie nucléaire, Fondation d'utilité publique, Mol, Belgique

sensibles sont actuellement développés, mais les effets biologiques ne renseignent pas nécessairement sur les effets sur la santé.

Une radiation ionisante telle que celle émise par la radioactivité n'est rien d'autre qu'un transfert suffisant d'énergie à un atome cible pour éjecter un électron de l'orbitale, créant ainsi un événement ionisant. La cible de la radiation est toujours un atome. Les atomes ionisés sont ceux qui sont le plus présents dans les systèmes biologiques, tels que l'hydrogène ou l'oxygène. De par la loi de la probabilité, la principale cible est la molécule d'eau qui représente environ 80 % du poids du corps. Lorsque l'eau est irradiée, elle est dissociée et convertie en radicaux libres (Reactive Oxygen Species, ROS). Ce processus est appelé la radiolyse de l'eau. Les radicaux sont hautement réactifs. Ils transmettent leur énergie à leur environnement et endommagent d'autres molécules dont éventuellement l'ADN, la molécule qui contient les données génétiques.

L'ADN ne représente que 1 % de la masse cellulaire totale et n'est de ce fait que peu susceptible d'être exposé à une radiation directe. Cette molécule est cruciale pour la vie de la cellule et tout dommage direct ou indirect provoqué, s'il n'est pas réparé correctement, aura des conséquences dramatiques. Néanmoins, des mécanismes puissants et fiables de contrôle biologique des cellules et de réparation de l'ADN existent. Une molécule d'ADN mal ou non réparé induit un processus génétique actif qui s'efforce de protéger l'organisme en éliminant la cellule endommagée par son suicide programmé, appelé apoptose. Ainsi, seules les cellules échappant à un tel contrôle biologique et à l'apoptose peuvent être transformées (devenir cancéreuses).

Dans plus de 80 % des cas, l'effet de radiations ionisantes entraîne un dommage par l'action des radicaux libres. Toute autre cause produisant des radicaux libres – telle que les UV et des agents chimiques actifs comme les dioxines – engendrera pour l'essentiel les mêmes effets biologiques que les radiations ionisantes.

L'ADN contient les données génétiques, de sorte que tout dommage causé à l'ADN dans une cellule somatique, s'il n'est pas réparé, peut être transmis aux cellules filles. Il est prouvé que les réponses cellulaires peuvent comporter des changements génétiques puisque ceux-ci peuvent continuer de se produire (instabilité génétique) sur des périodes relativement longues et toucher par là plusieurs générations de cellules. Si le dommage affecte des cellules germinales, il importe d'examiner la possibilité d'effets génétiques in utero. D'après les données actuellement disponibles, le nombre des effets génétiques attendus après une exposition chronique à 1 gray (Gy) se situe entre 3 000 et 4 700 pour un million de naissances. Ce nombre est de l'ordre de 0,4 à 0,6 % de l'incidence naturelle des effets génétiques.

En Belgique, la population reçoit en moyenne, au cours de toute une vie, un quart de cette dose du fait des diagnostics médicaux et des radiations naturelles auxquelles elle a été exposée.

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) considère qu'il existe des seuils pour les risques de malformation induits durant l'organogénèse et estime qu'il n'y a pas d'impact significatif sur le QI en cas d'exposition inférieure à quelques dizaines de mGy. Les effets in utero ne sont pas pris en compte durant la phase de pré-implantation (toute première phase) de la grossesse. Des études récentes sur les animaux portant sur l'exposition à des agents chimiques et des radiations de sujets présentant des prédispositions génétiques montrent que des malformations congénitales peuvent survenir du fait de cellules dont l'ADN a été endommagé et mal réparé. Ces cellules ne provoquent pas nécessairement d'avortement spontané. Une incertitude considérable continue de peser sur les effets fœtaux et la prédisposition à développer un cancer ultérieur en raison d'une sensibilité génétique induite par les radiations.

Il existe un grand nombre de maladies pour lesquelles les facteurs génétiques jouent un rôle. Nombre d'études montrent que la radiosensibilité est liée à la prédisposition à développer un cancer du fait de l'histoire génétique des individus. Une irradiation peut entraîner une sensibilité génétique. La biologie moléculaire permet d'analyser l'intégrité du système de réparation de l'ADN incluant les gènes intervenant dans la reconnaissance et la signalisation de la présence de lésions et de gènes gouvernant le processus d'interruption de la division cellulaire en cas d'ADN endommagé. Cette discipline devrait ainsi autoriser la détermination de la radiosensibilité d'individus déterminés. Les gènes réparateurs jouent un rôle important dans le processus de cancérogenèse. La mise au point de tests capables de déceler l'incapacité de ces gènes à prévenir le processus de cancérogenèse pourrait permettre d'identifier les individus présentant des risques plus élevés.

Pour l'instant, la CIPR met uniquement l'accent sur la protection de l'homme moyen et ignore les précautions s'imposant pour les individus susceptibles de présenter une sensibilité génétique.

La réglementation des risques à des faibles doses et le débat social

Sur cette toile de fond de connaissances toujours plus importantes, les controverses scientifiques demeurent normalement cantonnées au niveau académique. Mais l'estimation du risque de cancer en cas d'exposition à de faibles doses, dont les effets n'ont pu être prouvés, continue d'être au cœur des débats qui divisent les experts et groupes d'action. À faibles doses, le risque induit est essentiellement estimé en extrapolant à partir de la courbe dose-effet de fortes doses. Le modèle de relation linéaire sans seuil (RLSS) s'appuie sur l'hypothèse que le risque décroît avec

la dose, tout en assumant par précaution que toute exposition peut générer un certain risque. Il a conduit au développement d'une philosophie de radioprotection cohérente : les pratiques impliquant un recours au nucléaire ne sont autorisées que si elles sont justifiées et, une fois que ces pratiques sont justifiées et autorisées, la protection doit être optimisée dans le strict respect des doses limites admises.

L'avantage de cette démarche réside dans le fait qu'un agent dont le caractère cancérogène est prouvé n'est pas inscrit automatiquement sur la liste noire et peut être utilisé dans des conditions déterminées dès lors qu'il peut en être attendu des bénéfices importants pour la société, notamment en médecine.

Si un agent est suspecté de pouvoir entraîner un cancer, et si une évaluation du risque est jugée nécessaire en vue d'une communication à un public plus large, la perception joue un rôle fondamental pour les profanes comme pour les experts. Les perceptions varient parmi les experts et parmi le public et peuvent être influencées par l'intervention éventuelle de la justice ainsi que d'intérêts économiques. Ces variations compliquent la communication avec le public et le développement des approches des experts. Les informations alarmistes diffusées par les médias et les vues politiques divergentes engendrent souvent des attitudes défensives. De plus, des intérêts considérables sont en jeu dans le nucléaire, tant dans le domaine de l'énergie que dans celui de la médecine (Eggermont, 2003).

Les études de risque indiquent que les radiations ne sont pas hautement cancérogènes, comparées au tabac et à l'amiante. Les études de perception du risque ne font pas apparaître de peur du grand public à l'égard des radiations (Hardeman et Carlé, 2003). On ne note quasi aucune inquiétude face aux doses relativement élevées délivrées lors d'applications médicales ou aux radiations mises en œuvre par l'homme (Vanmarcke *et al.*, 2004). En revanche, on observe une inquiétude réelle envers de faibles risques industriels à long terme, presque virtuels émanant, par exemple, de décharges nucléaires. La population fait preuve de plus de tolérance envers les technologies qui présentent un risque potentiel mais apportent des avantages, qu'envers un risque industriel imposé. Cela ressort également des perceptions différentes des risques de radiations en micro-ondes des téléphones cellulaires, d'une part, et des pylônes pour la téléphonie cellulaire, d'autre part.

Le modèle RLSS ne prétend pas couvrir toute la complexité scientifique du sujet examiné, mais c'est un outil relativement simple qui peut être utilisé à des fins opérationnelles. L'application de l'actuelle réglementation ne pose pas de problèmes majeurs dans un domaine qui requiert la simplicité, la stabilité et la cohérence.

Les résultats d'études épidémiologiques récentes clarifient la question et confirment l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil.

Les avancées récentes en biologie moléculaire contribueront grandement à lever les incertitudes dans le futur. Mais leur mise en œuvre pourra poser des problèmes éthiques s'il vient à être démontré qu'il peut exister une sensibilité génétique des individus aux radiations ionisantes sur les lieux de travail. Les biomarqueurs sont des mesures spécifiques de l'interaction entre un système biologique et un agent environnemental, qui renseigne sur le fait qu'il y a exposition, effet ou sensibilité.

Pour la plupart des experts scientifiques représentés aux Nations Unies, le modèle RLSS demeure le meilleur outil pour appréhender les données et les incertitudes qui y sont associées ; le choix de ce modèle est dicté par une sorte de rationalité prudente et le bon sens. La polarisation des opinions de ceux qui croient et ceux qui ne croient pas aux effets des faibles doses éclipsent les références scientifiques avalisées par les pairs (*peer review*) au niveau international (UNSCEAR, NAS et BEIR¹).

L'Académie française de médecine et certaines organisations médicales professionnelles ont contesté avec vigueur les principes sur lesquels repose la réglementation actuelle (Tubiana *et al.*, 2005), tandis que les milieux scientifiques ayant des vues opposées se sont regroupés en un réseau international, le Comité européen sur le risque de l'irradiation (ECRR)², qui clame qu'il existe des risques significatifs même en présence de doses faibles. L'exposition des travailleurs aux radiations ionisantes pose un problème important dans les domaines de la médecine et du trafic aérien, tandis que les enjeux pour l'environnement se révèlent prédominants pour les centrales nucléaires.

Les frais d'élimination d'anciennes contaminations militaires ont marqué les débats du Congrès des États-Unis sur les risques d'exposition à de faibles doses : la fixation d'un seuil pourrait contribuer à minimiser les coûts et, partant, également se révéler intéressante lors de la mise hors-service de centrales nucléaires civiles dans l'avenir.

L'Académie française semble surtout soucieuse de veiller à ce que les nouveaux développements technologiques dans son secteur ne soient pas freinés par des problèmes de faibles doses. Néanmoins, elle doit faire face, pour les patients et le personnel médical, à des doses déterministiques élevées dans le cadre de nouvelles pratiques telles que la radiologie interventionnelle, où une optimisation basée sur le modèle RLSS pourrait être utile. Le RLSS a conduit au principe du niveau le plus faible raisonnablement possible ("As Low As Reasonably Achievable" – ALARA), qui est aujourd'hui à la base de la radioprotection. Nous tenons à faire valoir que cette politique s'est révélée jusqu'ici utile et fructueuse et plaidons en faveur de son maintien tant qu'on ne disposera pas de données scientifiques fiables appelant à son changement. D'autant qu'il peut être considéré que cette politique s'appuie sur une approche prudente.

¹ UNSCEAR : Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des radiations ionisantes ; NAS : National Academy Sciences, USA ; BEIR : Biological Effects Ionizing Radiation, USA. Voir www.nap.edu/books/030909156X/html.

² Voir www.euradcom.org.

Les nouvelles preuves épidémiologiques confirment l'hypothèse RLSS

La recherche épidémiologique internationale sur les effets sur la santé de radiations ionisantes à faibles doses a progressé grâce aux estimations des doses délivrées aux populations exposées, consignées conformément à des lignes directrices. Deux études ont été récemment publiées, l'une menée par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'OMS (Cardis *et al.*, 2005) et l'autre, à l'initiative de l'Union européenne, sur l'exposition domestique au radon (Darby *et al.*, 2004).

Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des radiations ionisantes (UNSCEAR), la Commission internationale de protection radiologique (CIPR-ICRP) et l'Académie nationale des sciences des États-Unis (BEIR VII) ont passé en revue les progrès scientifiques réalisés à l'échelle mondiale et sont arrivés récemment à la conclusion que l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil demeure la meilleure voie pour évaluer et gérer l'exposition à des radiations ionisantes à faibles doses compte tenu des incertitudes actuelles.

Cette *peer review* scientifique internationale est néanmoins contestée à la fois par l'Académie française des sciences qui dénie les effets des faibles doses, et par un nouveau réseau international de scientifiques qui postule un effet accru des faibles doses (ECRR).

Que nous enseignent ces études épidémiologiques récentes ? Fort de la collaboration avec d'autres instances, le CIRC a conduit une étude sur plus de 400 000 personnes travaillant dans le secteur nucléaire, qui ont été exposées à des radiations ionisantes dans le passé (voir tableau p. 26). Cette étude cohorte a été menée dans 15 pays pour améliorer la précision des estimations directes de risque après une exposition prolongée à de faibles doses et consolider la base scientifique de la protection contre les radiations ionisantes. Elle présente les estimations de risque de mortalité pour tous les cancers, à l'exclusion des leucémies, et pour les leucémies à l'exclusion des leucémies lymphocytaires chroniques, et compare ces estimations avec les estimations établies à partir des données sur les survivants des explosions atomiques.

Le groupe exposé comprenait essentiellement des hommes (90 %) alors que les données récentes sur les cancers de la thyroïde induits par les radiations ionisantes font apparaître une augmentation du risque pour les femmes, notamment pour celles qui ont été exposées à des radiations ionisantes durant leur enfance. La dose moyenne cumulée par la cohorte de travailleurs était faible, c'est-à-dire seulement de 19,4 mSv ; 90 % d'entre eux avaient absorbé des doses inférieures à la dose limite professionnelle antérieure, fixée à 50 mSv.

L'étude du CIRC apporte un complément majeur au suivi continu des données des survivants des explosions atomiques de Hiroshima et Nagasaki. Ses résultats, publiés sous une forme résumée dans le *British Medical Journal*, sont les suivants : "Le risque relatif accru de cancers (autres que des leucémies) et des leucémies est de 0,97 par Sv (intervalle de confiance de 95 % entre 0,4 et 1,97). L'analyse des causes de décès liés ou non au tabac indique que, en dépit de l'action du cofacteur tabac, ce dernier peut difficilement expliquer l'ensemble du risque accru. Le risque relatif accru de leucémie, à l'exclusion des leucémies lymphocytaires chroniques, est de 1,93 par Sv (< 0 à 8,47). Au vu de ces estimations, 1 à 2 % des décès par cancer dans ce groupe de travailleurs peuvent être attribués aux radiations" (Cardis *et al.*, 2005).

Ces estimations, établies à partir de l'étude la plus large jamais réalisée sur les travailleurs du nucléaire, sont plus élevées mais statistiquement compatibles avec les estimations de risque utilisées pour les normes actuelles de protection contre les radiations. D'après les résultats de cette étude, le risque de cancer est légèrement accru, même en cas d'exposition à de faibles doses de radiations, c'est-à-dire à des doses communément absorbées par les travailleurs du nucléaire sur lesquels l'étude a porté.

L'effet conjugué du tabac, considéré lors d'une première approximation, s'est traduit uniquement par une valeur sensiblement plus élevée pour les risques de cancer du poumon (erreur : 0,3 à 4,0/Sv)³. Cette étude est surtout intéressante dans la mesure où elle confirme l'hypothèse RLSS avec un bon niveau de confiance, hormis pour les leucémies, pour lesquelles une hypothèse quadratique a déjà été établie. Pour les tumeurs solides, la mortalité a été estimée deux ou trois fois plus importante que celle obtenue à partir de l'hypothèse linéaire utilisée pour les données de Hiroshima et Nagasaki, donnant un risque de décès par cancer induit par des radiations ionisantes de 1 à 2 %, risque qui demeure faible comparé à celui induit par d'autres carcinogènes.

Le deuxième ensemble de données épidémiologiques concerne les expositions domestiques au radon. Les études épidémiologiques relativement anciennes sur les mineurs, puis les études plus récentes sur les cas de cancer du poumon induits par le radon dans les habitations ont fait l'objet d'analyses communes dans l'UE, aux États-Unis et en Chine.

Les résultats pour l'UE ont été les suivants : "La concentration moyenne de radon mesurée à l'intérieur d'habitations dans le groupe témoin s'est élevée à 97 Bq/m³. Dans les cas de cancer du poumon, la concentration moyenne s'est établie à 104 Bq/m³. Le risque de cancer du poumon a augmenté de 8,4 % (intervalle de confiance de 95 % entre 3,0 % et 15,8 %) pour 100 Bq/m³ (P=0,0007). La relation dose-réponse est apparue linéaire sans seuil et est

³ Plus de 5 000 cas de cancers de la thyroïde ont été observés jusqu'ici dans la jeune population des environs de Chernobyl, qui a été le plus souvent exposée à de fortes doses (~ 1 Gy), mais la mortalité de ce groupe a été moindre que prévue.

Risques de cancers après l'exposition à de faibles doses de radiations ionisantes : étude cohorte menée dans 15 pays

	Nbr. d'équipements	1 ^{ère} année de mise en service	Période d'exploitation	Nbr. de travailleurs	Personnes / années	Décès				
						Toutes causes	Tous cancers sauf leucémie	Leucémie sauf CLL	Dose collective cumulative (Sv)	Moyenne de la dose cumulative individuelle (mSv)
Australie	1	1959	1972 - 1998	877	12.110	56	17	0	5,4	6,1
Belgique	5	1953	1969 - 1994	5.037	77.246	322	87	3	134,2	26,6
Canada	4	1944	1956 - 1994	38.736	473.880	1.204	400	11	754,3	19,5
Corée (du Sud)	4	1977	1992 - 1997	7.892	36.227	58	21	0	122,3	15,5
Espagne	10	1968	1970 - 1996	3.633	46.358	68	25	0	92,7	25,5
Finlande	3	1960	1971 - 1997	6.782	90.517	317	33	0	53,2	7,8
France CEA-COGEMA	9	1946	1968 - 1994	14.796	224.370	645	218	7	55,6	3,8
France EDF	22	1956	1968 - 1994	21.510	241.391	371	113	4	340,2	15,8
Grande-Bretagne	32	1946	1955 - 1992	87.322	1.370.101	7.983	2.201	54	1.810,1	20,7
Hongrie	1	1982	1985 - 1998	3.322	40.557	104	39	1	17,0	5,1
Japon	33*	1957	1986 - 1992	83.740	385.521	1.091	413	19	1.526,7	18,2
Lituanie	1	1984	1984 - 2000	4.429	38.458	102	24	1	180,2	40,7
Slovaquie	1	1973	1973 - 1993	1.590	15.997	35	10	0	29,9	18,8
Suède	6	1954	1954 - 1996	16.347	220.501	669	190	4	291,8	17,9
Suisse	4	1957	1969 - 1995	1.785	22.051	66	24	0	111,2	62,3
USA - Hanford	1	1944	1944 - 1986	29.332	678.833	5.564	1.279	35	695,4	23,7
USA - INEL	1	1949	1960 - 1996	25.570	505.236	3.491	886	26	254,6	10,0
USA - NPP	15	1960	1979 - 1997	49.346	576.682	983	314	19	1.336,0	27,1
USA - ORNL	1	1943	1943 - 1984	5.345	136.673	1.029	225	12	81,1	15,2
TOTAL	154	-	-	407.391	5.192.710	24.158	6.519	196	7.892,0	19,4

CEA-COGEMA : Commissariat à l'Énergie Atomique – Compagnie Générale des Matières Nucléaires ; EDF : Electricité de France ; NPP : Nuclear Power Plants ; INEL : Idaho National Engineering Laboratory ; ORNL : Oak Ridge National Laboratory ; CLL : leucémie lymphocytaire chronique.

* Pas d'information disponible pour permettre la séparation des différents équipements.

Source : Cardis, E., *et al.*, 2005

demeurée significative ($P=0,04$) dans le cadre des analyses cantonnées aux personnes vivant dans des habitations présentant un radon mesuré $< 200 \text{ Bq/m}^3$. En l'absence d'autres causes de décès, le risque absolu de formation d'un cancer du poumon à l'âge de 75 ans serait, dans le cas de concentrations usuelles de radon de 0, 100 ou 400 Bq/m^3 , respectivement de l'ordre de 0,4 %, 0,5 % ou 0,7 % pour les personnes n'ayant fumé à aucun moment de leur vie et environ 25 fois supérieur (10 %, 12 % ou 16 %) pour les fumeurs de cigarettes."

Prises ensemble et non séparément, ces études font apparaître des risques relativement élevés de cancer du fait du radon domestique et indiquent que celui-ci est responsable, notamment pour les fumeurs et ex-fumeurs récents, d'environ 2 % de l'ensemble des décès par cancer en Europe.

D'après les résultats de cette analyse réalisée au sein de l'UE en collaboration avec d'autres instances,

l'estimation du risque induit par une exposition au radon domestique est de 20 000 cancers du poumon par an en Europe. Cela signifie que 2 % du nombre total des cancers en Europe pourrait être lié au radon, ce chiffre étant assorti d'une grande marge d'incertitude. Une fois de plus, les résultats indiquent que des effets pourraient être enregistrés en cas de concentrations relativement faibles, c'est-à-dire de concentrations de 100 Bq/m^3 et plus souvent observables en Europe, qui correspondent à une dose de 2 à 3 mSv/an. Ces résultats attestent que le modèle de linéarité est le plus plausible, y compris à des niveaux d'exposition inférieurs à ceux supposés dans le passé.

Exposition multifactorielle et problèmes éthiques

Le tabac constitue un cofacteur dans les deux études. L'exposition simultanée à différents agents sur les lieux du travail ou dans l'environnement est une

réalité quotidienne qui complique l'analyse des effets de ces agents. L'existence d'effets synergiques a déjà été démontrée dans les mines d'uranium et lors d'expositions aux UV.

Une place plus grande devrait être accordée à la multicausalité dans le cadre de l'évaluation et de la gestion des risques. Une telle prise en compte pourrait avoir des incidences considérables sur l'évaluation des preuves scientifiques quant aux risques encourus. Récemment, le directeur de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) est intervenu dans ce sens : "En cas de multicausalité, il pourrait être observé une sorte de perturbation du réseau, générée par des changements minuscules, quasi imperceptibles, dans de nombreux gènes. L'élimination de cofacteurs environnementaux mineurs pourrait être pertinente, non seulement pour les cancers, mais aussi, comme déjà clairement démontré, pour des affections comme l'asthme" (McGlade, 2005).

Les difficultés de l'évaluation de l'exposition à des radiations, qui ont été examinées plus haut, pourraient être surmontées grâce au recours à des nouveaux moyens technologiques permettant d'identifier l'interaction de gènes dans les processus de développement de maladies. Les causes d'une maladie aussi répandue que le cancer semblent être le résultat d'actions conjuguées de multiples facteurs. La réutilisation d'un facteur co-causal ou d'un facteur interagissant pourrait être d'un grand bénéfice pour la prévention. Aussi cette question est-elle devenue prioritaire pour l'AEE.

Dans ce contexte, il conviendrait de s'attacher moins à la détermination de la causalité de facteurs individuels et de faire porter le gros des efforts sur le développement d'une approche plus prudente prenant en compte nos incertitudes et manques de connaissance.

L'épidémiologie a été la référence historique pour évaluer et gérer les risques. Elle a permis d'identifier les facteurs de risque et les risques d'exposition à ces facteurs. Elle continuera de jouer un rôle majeur à condition d'être soumise à un examen méthodologique scrupuleux, comme par exemple au niveau du CIRC.

De futures évolutions de l'épidémiologie pourraient conduire à mettre en évidence une exposition au travers de techniques de biomarquage empruntées à la biologie moléculaire. Ces évolutions pourraient offrir des indicateurs plus directs de risque. La question de la sensibilité à de faibles doses reste néanmoins une contrainte.

Nombre de pays n'autorisent pas l'utilisation de la génotypie dans le domaine du travail en raison de son caractère incertain et de considérations éthiques. Mais l'étude de certains gènes réparateurs de personnes travaillant dans des centrales nucléaires a déjà permis de recueillir des données sur la sensibi-

lité individuelle de travailleurs exposés au risque de dommages oxydatifs, tels que les fumeurs exposés à des radiations (Aka, 2005).

Conclusions

Les avancées des connaissances relatives aux effets sur la santé de radiations ionisantes confortent l'utilisation de l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil pour l'établissement de la relation dose-effet. Cette approche peut être considérée comme conforme au principe de précaution pour la gamme des doses enregistrées dans le cadre des expositions professionnelles.

Il convient d'attacher une attention particulière à la sensibilité génétique et aux aspects éthiques de la génotypie. Les expositions plus élevées des personnels travaillant en imagerie médicale (radiologie interventionnelle et PET, le cas échéant avec CT) et l'exposition médicale des enfants posent également des problèmes particuliers.

L'exposition des travailleurs n'appartenant pas aux secteurs nucléaire et non nucléaire et aux centres médicaux mais qui sont amenés à y intervenir requiert une gestion et un suivi appropriés. L'optimisation systématique de la protection peut jouer en l'espèce un rôle majeur comme la pratique l'a démontré dans les centrales nucléaires.

Cette pratique montre comment combiner l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil avec une souplé opérationnelle et la protection de la santé. ■

Références

- Aka, P., *Polymorphisms in DNA Repair Genes, DNA Repair Phenotype and Genotoxic Effects in Radiation Exposed Workers*, PhD Thesis, Faculté des Sciences, VUB, Bruxelles, 2005.
- Cardis, E., et al., *Risk of cancer after low doses of ionizing radiation : retrospective cohort study in 15 countries*, BMJ online, publié le 29 juin 2005. <http://bmj.bmjournals.com/cgi/content/full/331/7508/77>
- Darby, S., et al., *Radon in homes and risk of lung cancer : collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*, BMJ online, publié le 21 décembre 2004.
- Eggermont, G., *Stralingsrisico's : onvoldoende gekend of onvoldoende bekend gemaakt ?*, Perceptie van het Stralingsrisico, Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming, Vol. 28, n° 4, 2003.
- Hardeman, F., Carlé, B., *Veiligheid en risicoperceptie. Resultaten van de opiniepeiling 2002 in België*, avril 2003, SCK-CEN, Mol, BLG-938.
- Mc Glade, J., directeur AEE, Conférence annuelle de l'Agence de protection de la santé de GB, <http://org.eea.eu.int/documents/speeches/12-09-2005>
- NAS-BEIR VII, *Health Risk from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, National Academies Press. www.nap.edu/books/030909156X/html
- Tubiana, M., et al., *Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effect of low doses of ionizing radiation*, Académie Nationale de Médecine, Paris, 2005.
- Vanmarcke, H., et al., *"Ioniserende straling" van het Milieu en Natuurrapport Vlaanderen*. www.vmm.be