

L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution

Olivier Godard, Jacques Lochard

► **To cite this version:**

Olivier Godard, Jacques Lochard. L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution. CECO-995. 2005. <hal-00243007>

HAL Id: hal-00243007

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00243007>

Submitted on 6 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE POLYTECHNIQUE
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe
de précaution**

Olivier GODARD
Jacques LOCHARD

Juin 2005

Cahier n° 2005-019

LABORATOIRE D'ECONOMETRIE

1 rue Descartes F-75005 Paris

(33) 1 55558215

<http://ceco.polytechnique.fr/>
<mailto:labecox@poly.polytechnique.fr>

L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution

Olivier GODARD
Jacques LOCHARD

Juin 2005

Cahier n° 2005-019

Résumé: L'histoire longue de la radioprotection durant le XX^e siècle a porté la construction progressive d'un régime de protection qui a très tôt intégré une attitude de précaution pour tenir compte des risques possibles sur lesquels l'incertitude scientifique demeurerait. Cette attitude s'est par la suite cristallisée sous la forme de plusieurs principes complémentaires: justification de toute exposition, limitation des doses en-dessous de seuils déterminés en fonction de la connaissance de dommages avérés pour la santé humaine, déterministes ou stochastiques, et ALARA pour prendre en compte les risques potentiels associés aux faibles doses. Pour gérer ces risques potentiels, il a fallu sortir du champ strictement sanitaire pour prendre en compte les aspects économiques et socio-politiques. Les efforts de rationalisation formelle à l'aide du calcul économique dans lesquels de grands espoirs ont été mis à une certaine période n'ont pas permis de réaliser les avancées espérées et ont été complétés par des approches pragmatiques visant à associer au maximum l'ensemble des personnels concernés de façon à obtenir effectivement le plus bas niveau d'exposition raisonnablement possible en tenant compte des aspects économiques et sociaux. Cette démarche débouche sur une question ouverte quant aux conditions procédurales et économiques de partage de la responsabilité dans l'engagement dans un certain niveau de risque stochastique résiduel, puisque l'inexistence du risque zéro est désormais reconnue.

Abstract: The story of radioprotection all along the XXth century has carried out the progressive building of a protection regime that, very early, incorporated a precautionary attitude in relation with possible risks for health that were still highly uncertain on a scientific ground. Years after such attitude took the form of several complementary principles: justification of any exposure, limitation of doses exposure below thresholds fixed on the basis of knowledge of proven damage for health, be they deterministic or stochastic, and ALARA in order to take account of potential risks resulting from very small doses. To manage the latter, it has been necessary to go out of the strictly sanitarian domain and integrate economic and socio-political factors. Efforts to reach formal optimisation with the help of cost-benefit analysis, in which strong hopes had been placed at times, did not allow to achieve the expected progress in decision-making and safety and had to be supplemented by pragmatic approaches aimed at involving concerned workers and employees as much as possible in order to reach the lower level of exposure, taking account of economic and social factors. This ALARA approach (procedures and culture) to-day raises an open-ended question about social procedures and economic conditions of sharing a commitment to an accepted exposure to a residual stochastic risk, since zero risk is acknowledged not to exist.

Mots clés : Santé, Radioprotection, Risques, Faibles doses, Principe de précaution

Key Words : Health, Radioprotection, Risks, Small doses, Precautionary principles

Classification JEL: D78, D81, I18

Introduction

La gestion du risque radiologique a une longue histoire qui se compte en décennies. La relecture de cette histoire révèle comment ont été élaborés assez tôt, mais de façon progressive, des principes et une doctrine anticipant largement sur ce qu'est le principe de précaution aujourd'hui (Godard, 2005). C'est ce qui fait que la gestion du risque radiologique peut être vue comme une expérience pilote révélant les difficultés et les conditions de pénétration de démarche relevant du principe de précaution en milieu professionnel. Bien qu'un peu chaotique, cette histoire semble, avec le recul, mue par une sorte de nécessité logique et sociale, qui s'est révélée au rythme des étapes d'un apprentissage collectif parcourues par une communauté de spécialistes d'emblée très internationale. S'il faut résister à la tentation de voir là l'expression d'un déterminisme, d'une évolution nécessaire imposée par la force des choses, ce constat devrait néanmoins renforcer la conviction de chacun quant aux raisons sérieuses de faire une place au principe de précaution dans la prévention des risques en milieu professionnel, au-delà des domaines dans lequel ce principe a été initialement admis : protection de l'environnement, sécurité alimentaire et santé publique.

1. Rappels historiques : de la découverte du risque radiologique aux bases de sa prévention

Les rayons X ont été découverts par Röntgen en 1895. La radioactivité naturelle a, quant à elle, été découverte par Becquerel en 1896, dans les mois qui ont suivi. C'est très rapidement que certains effets négatifs d'une manipulation sans précautions particulières des rayons X ou de la radioactivité naturelle ont été mis en évidence. Dans les semaines qui ont suivi ces découvertes, on trouve déjà mention dans la littérature d'effets pathologiques au niveau de la peau (érythèmes et brûlures) et des yeux (cataractes). 1905 est une date marquante, avec le décès de l'assistant de Thomas Edison ; c'est le premier à être directement attribué à l'utilisation des rayonnements. En effet, Röntgen n'avait pas déposé de brevet autour de sa découverte dans le but explicite qu'elle puisse être utilisée le plus rapidement et le plus largement possible dans le milieu médical. Edison s'était alors immédiatement lancé dans la production de tubes à rayons X.

Au cours des années qui ont suivi, on peut relever de nombreuses publications faisant référence aux pathologies induites par les rayonnements chez les radiologues¹. C'est en 1911 que, pour la première fois, la littérature scientifique mentionne une association possible entre les rayonnements et la leucémie. En 1927 Müller suggère la possibilité d'effets génétiques des rayonnements chez l'homme, en s'appuyant sur des travaux menés sur la drosophile (Abrahamson, 1996). Il s'agit là de la première trace de ce que l'on pourrait appeler les « signaux faibles » qui ont orienté toutes les recherches ultérieures sur les effets plus insidieux des rayonnements.

Parallèlement, la mise en évidence des effets les plus directs, associés à de fortes expositions, avait conduit les radiologues de plusieurs pays à proposer, dès 1915, des recommandations

¹ Il faut garder à l'esprit que les niveaux d'exposition encourus à l'époque étaient très élevés et sans commune mesure avec les niveaux d'exposition actuellement rencontrés dans le milieu médical.

portant sur l'utilisation des rayons X et du radium, notamment pour assurer la protection du personnel médical. Cette mobilisation a abouti à la création de la Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium (actuellement, Commission Internationale de Protection Radiologique ou CIPR), lors du 2^{ème} Congrès International de Radiologie qui s'est tenu à Stockholm en 1928. C'est ainsi que la protection radiologique a été organisée directement à l'initiative des professionnels et qu'elle s'est rapidement située au niveau international.

Dans les années 30, l'accumulation des observations en matière d'effets des rayonnements ainsi que les progrès réalisés dans le domaine de leur mesure permettent d'établir les premières relations quantifiées entre niveaux d'exposition et effets pathologiques. Progressivement émerge également l'idée d'un seuil de dose tolérable pour l'individu, c'est-à-dire d'un seuil en dessous duquel il n'est pas possible de repérer des effets indésirables. Il ne s'agit alors que d'effets dits « déterministes », ceux qu'on observe systématiquement pour les niveaux d'exposition considérés. Fondée sur l'expérience accumulée et les travaux de Mùcheller et de Sievert, la notion de « dose de tolérance » est introduite officiellement par la CIPR en 1934 lors du Congrès International de Radiologie de Zurich. Il s'agit là d'une étape importante de l'histoire de la protection radiologique.

Les années 30 sont également marquées par plusieurs débats concernant les effets indirects des rayonnements, débats précurseurs d'une longue série de polémiques et de controverses qui, sous des formes diverses et à l'occasion d'épisodes très différents, devaient par la suite émailler l'évolution de la radioprotection. Tout d'abord, il y a « l'affaire » des peintres de cadrans lumineux dans l'industrie horlogère. On constate en effet chez ces derniers une augmentation anormale du nombre de cancers de la bouche. Des médecins suggèrent assez rapidement qu'il s'agit d'effets induits par le radium contenu dans la peinture, les peintres ayant l'habitude d'affiner la pointe de leurs pinceaux en la mouillant entre leurs lèvres. La réaction des responsables de l'industrie contre cette thèse est très vive ; pendant de nombreuses années ces derniers cherchent d'une part à minimiser les effets en question et d'autre part à disqualifier ceux qui mettent en cause le radium. Ils finissent cependant par s'incliner devant les faits accumulés et par prendre des dispositions de prévention de ce risque. Cet épisode illustre parfaitement les difficultés et les réticences que rencontre la reconnaissance d'un risque nouveau lorsque se manifestent les premiers signes de son émergence.

Un second débat concerne la remise en cause de l'idée de seuil de tolérance. Quelques chercheurs de l'époque se demandent si n'existent pas d'autres effets que ceux qui avaient été repérés jusqu'alors. Ils mettent en avant les nombreuses incertitudes pendantes et estiment qu'on ne dispose pas encore d'un recul suffisant pour affirmer de façon certaine l'innocuité des rayonnements en dessous de la « dose de tolérance » alors retenue. Cette réflexion et cette mise en cause sont explicites dans un rapport publié en 1931 par la Société des Nations qui synthétise les connaissances de l'époque sur les effets des rayonnements. Le débat sur le seuil et les effets des faibles doses est loin d'être une affaire récente...

Les années 40 marquent un tournant dans la philosophie de la protection. On voit émerger à cette époque l'idée qu'il ne suffit pas de respecter certaines valeurs-seuils de doses pour

assurer une protection efficace ; par prudence, il est jugé préférable de maintenir les expositions aussi bas que possible. C'est dans le cadre du « Projet Manhattan », qui avait pour objectif de mettre au point la bombe atomique aux États-Unis, que s'opère ce basculement. Le responsable des aspects sanitaires du projet et, en particulier, de la protection radiologique des personnels impliqués, un dénommé Stone, avait dès sa nomination demandé à ses assistants de faire la synthèse la plus exhaustive possible des connaissances concernant les risques associés aux rayonnements. La principale conclusion de cette synthèse a été de mettre en évidence deux résultats : les connaissances accumulées depuis le début du siècle permettaient de cerner de façon assez satisfaisante les valeurs d'exposition à partir desquelles on pouvait détecter divers effets déterministes au niveau de la cellule comme au niveau des tissus ; pour les niveaux d'exposition plus faibles, il n'existait aucune certitude quant à l'existence ou à l'absence de problèmes. C'est sur cette base que Stone a défini les nouvelles règles de conduite pour la protection du personnel participant au projet Manhattan : maintenir les expositions aussi bas que possible et, quelle que soit la situation, ne jamais dépasser la dose de tolérance pour les effets déterministes.

On peut considérer que cette approche du risque marque les débuts du principe de précaution dans la gestion du risque radiologique. Il faut aussi en situer le contexte : Stone a défendu une attitude de prudence dans le cadre du projet Manhattan car il convenait absolument d'éviter que les « meilleures têtes » de la physique et de la chimie de l'époque, participant au projet, puissent être affectées de dommages sanitaires qui auraient pu être irréparables.

Dans la foulée de ses choix concernant les incertitudes attachées aux risques associés aux doses inférieures au seuil de tolérance, Stone lança dès le démarrage du Projet Manhattan un programme de recherche ambitieux sur les effets biologiques des rayonnements pour mieux comprendre ce qui se passait en dessous des seuils d'apparition des effets déterministes et pour essayer de lever les incertitudes sur les effets à long terme des rayonnements. Ce programme peut également être considéré comme l'acte de naissance de la radiobiologie qui, avec l'épidémiologie qui se développera après la guerre, a permis de faire progresser de façon considérable les connaissances sur les effets des rayonnements.

La décennie 1940 a été profondément marquée par les deux bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki en 1945. Au-delà des effets destructeurs directs des bombes, la question des effets indirects et à long terme des rayonnements sur la santé des personnes touchées et sur leur descendance est rapidement posée. Comme dans le cas des peintres de cadrans lumineux de la décennie précédente, mais à une tout autre échelle et avec des acteurs très différents, une controverse va se développer et s'installer, pour ne plus cesser jusqu'à nos jours.

2. À la recherche des bonnes valeurs limites

Les réflexions issues du projet Manhattan ont progressivement conduit à l'abandon de la notion de « dose de tolérance », c'est-à-dire d'une dose qui puisse être considérée comme tolérable par les personnes exposées, au profit de celle de « dose maximale permise ». Cette dernière notion a été introduite officiellement en 1949 par le *National Council of Radiation Protection* (NCRP), le comité national chargé aux États-Unis de la protection radiologique. Comme la CIPR ne s'était plus réunie depuis la fin des années trente et

l'ouverture du conflit mondial, le NCRP avait pris le relais et émettait des recommandations s'appuyant sur les nouvelles données disponibles. Il n'utilisait pas le terme « précaution » mais celui de « prudence » pour justifier la nouvelle approche de la dose-seuil. Il y a là une évolution qualitative notable puisque l'on passe de quelque chose que l'on peut tolérer sans danger à quelque chose qui définit le maximum à ne jamais dépasser.

Jusque dans les années 50, la protection radiologique s'est cantonnée au domaine des risques professionnels. Initialement, les premières personnes visées du fait de leur exposition étaient pratiquement toutes des radiologues. Naturellement les patients étaient également exposés aux rayons, mais cette exposition était recherchée comme moyen thérapeutique ; considérée comme oeuvrant pour leur bien, elle était jugée acceptable. Cependant, durant les années 40, le nombre de chercheurs exposés s'est fortement accru et à partir des années 50, la population générale s'est également sentie concernée par les rayonnements ionisants à travers le problème des retombées radioactives des essais nucléaires. Le point fort de cette évolution est la réalisation du test américain sur l'île de Bikini en 1954 et ses prolongements médiatiques et politiques avec l'affaire du *Lucky Dragon*, du nom du navire japonais pris dans les retombées radioactives à proximité du lieu du test. Cet épisode souleva un mouvement d'opinion d'ampleur mondiale suscité tout à la fois par les aspects sanitaires et politiques de l'affaire. Pour la première fois le grand public, par le relais des médias, prit conscience qu'il était lui-même exposé. C'est à partir de cette époque qu'un mouvement international antinucléaire a commencé de se structurer.

La pression médiatique et publique qui suivit l'épisode du test de Bikini finit par porter le débat au niveau des Nations Unies qui créèrent en 1955, le Comité Scientifique des Nations Unies sur les Effets des Radiations Atomiques (UNSCEAR). Ce comité reçut pour mission de suivre au niveau mondial l'évolution de l'exposition de la population aux diverses sources de rayonnement et de réaliser régulièrement la synthèse des connaissances disponibles en matière d'effets des rayonnements sur la santé. À la même époque, le Royaume Uni et les États-Unis chargèrent également des comités scientifiques *ad hoc* de faire le point sur les connaissances et d'en dégager des recommandations pour la protection. Les conclusions de ces différents travaux ont largement conforté la philosophie que Stone avait adoptée au début de la décennie précédente.

Sur le plan scientifique, les années 50 apportent des interrogations nouvelles et persistantes sur le risque d'effets cancérogènes et génétiques à long terme pour les populations exposées, effets qu'on qualifiera de « stochastiques » car ils ne sont repérables, avec le recul, que statistiquement au sein des populations exposées². Compte tenu de l'impossibilité de démontrer alors l'existence de tels effets, faute d'un recul épidémiologique suffisant, mais

² Les cancers en question sont considérés comme des effets stochastiques parce qu'ils se manifestent sous une forme qui n'est pas distinguable des formes standard de cancer ; ils ne sont pas signés, comme peut l'être le mésothéliome, qui est un cancer spécifiquement lié à l'amiante. Il n'est pas possible d'en identifier une cause précise, en particulier l'exposition aux rayonnements ; de la même façon il n'est pas possible de savoir à l'avance quelles personnes seront atteintes au sein de la population exposée. L'apparition de ces cancers dans la population est donc un phénomène complètement aléatoire au niveau individuel. On ne peut les mettre en évidence que par une analyse statistique en se plaçant au niveau de l'observation de l'ensemble de la population exposée à des rayonnements, par comparaison avec une population témoin non exposée. D'où la qualification d'effets stochastiques.

aussi de l'impossibilité symétrique de garantir que de tels risques ne se manifesteront pas à l'avenir, la communauté internationale des radioprotectionnistes choisit d'adopter une attitude de prudence. Elle décide d'introduire une limite de dose pour le public, afin de protéger ce dernier contre les expositions qui pourraient résulter des activités industrielles associées au développement de l'énergie nucléaire qui commence alors à prendre son essor. La valeur adoptée pour le public est 10 fois plus faible que celle recommandée pour les travailleurs. La CIPR écrit dès 1955 dans une de ses publications : « *Compte tenu des preuves incomplètes sur lesquelles reposent les valeurs, et de la connaissance que certains effets des rayonnements sont irréversibles et peuvent se cumuler, il est fortement recommandé de tout mettre en oeuvre pour réduire au plus bas niveau possible l'exposition à tous les types de rayonnements ionisants. La Commission révisera les doses admissibles proposées au fur et à mesure que de nouvelles informations parviendront.* » (ICRP, 1955)

À partir de ce moment-là, les grands principes qui organisent la radioprotection sont mis en place. Les développements ultérieurs ont essentiellement porté sur la mise en oeuvre pratique de cette approche de prudence à la fois pour la manière de quantifier le risque radiologique et pour la définition de la démarche permettant de fixer les niveaux de protection acceptables. Des efforts de recherche considérables, s'appuyant sur les travaux engagés dans le cadre du projet Manhattan, ont été déployés dans la plupart des grands pays à partir des années 50 afin d'essayer d'établir une relation quantitative entre le niveau d'exposition et le risque associé. Progressivement on a ainsi assisté à ce qu'on pourrait appeler : « la construction du risque radiologique ». Cette construction a reposé sur une succession de consensus élaborés par des comités nationaux et internationaux, le principal étant le Comité des Nations Unies déjà mentionné. L'épidémiologie, qui a permis de mettre en évidence des excès significatifs de leucémies, puis de divers types de cancers parmi les populations exposées, en particulier parmi les populations irradiées de Hiroshima et de Nagasaki, a joué un rôle déterminant pour donner une expression quantifiée du risque associé aux rayonnements (Gofman, 1990).

3. Le principe ALARA

Le principe ALARA est l'acronyme de l'expression anglaise *As Low As Reasonably Achievable*. Cette dernière est généralement traduite en français par l'expression « aussi bas qu'il est raisonnablement possible ». Ce nouveau principe a été proposé vers la fin des années 60, pour remplacer la formulation, héritée de Stone, qui demandait de maintenir l'exposition « aussi bas que possible ». La différence peut paraître mince, mais elle dépasse la querelle sémantique. Le nouvel énoncé traduit la prise de conscience que la recherche du risque le plus bas possible, en ignorant toute autre considération conduisait au blocage : le niveau le plus bas possible, c'est celui qui résulte de l'abstention de tout recours à la radioactivité (dont la technologie nucléaire) dans ses différents usages. Tendanciellement, le plus bas possible, c'est le risque zéro... Se donner pour objectif de réduire le risque au niveau aussi bas que possible conduit inévitablement à s'interroger sur le bien fondé des activités qui engendrent ce risque.

Si l'on considère que certaines activités génératrices de risques doivent néanmoins être maintenues, voire développées, compte tenu des avantages qu'elles apportent à la collectivité, il convient alors non de les évincer, mais d'organiser une prise de risque responsable, en

tenant compte de toutes les dimensions qui caractérisent les situations concrètes et des possibilités pratiques qu'elles permettent. C'est ce type de raisonnement qui a conduit en 1977 la CIPR à abandonner la formule initiale « *aussi bas que possible* », pour recommander finalement celle plus nuancée de : « *aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des facteurs économiques et sociaux* » (ICRP, 1977).

Avec cette dernière formulation, il y a en fait une double reconnaissance. D'une part, celle du caractère raisonnable de la démarche et, d'autre part, celle de la nécessaire prise en compte des facteurs économiques et sociaux qui structurent la prise de risque. Ce dernier point est important. Il entérine l'idée qu'en l'absence de certitudes le choix des mesures de protection ne peut pas relever exclusivement de critères sanitaires. On doit aussi faire appel aux considérations économiques et sociales pour définir les niveaux de risque qu'on pourra finalement considérer comme raisonnables. En ouvrant un espace dans lequel il devenait possible d'articuler prudence et organisation de la prise de risque, le principe ALARA a fait basculer la gestion du risque radiologique du champ sanitaire et technique dans le champ sociopolitique.

Tout cela n'est pas allé sans flottement et tâtonnements. Un premier aspect de la réflexion a porté sur la question de la justification. La CIPR a adopté le principe selon lequel une prise de risque n'était justifiée que s'il y avait un bénéfice attendu. C'est le principe de justification des activités. Des risques sans contrepartie, même s'ils sont faibles, ne sont pas justifiables. Ensuite la Commission s'est interrogée sur la question de savoir jusqu'où il convenait de réduire le risque dès lors qu'une activité était justifiée, puisqu'il n'était pas possible de se caler sur l'idée d'un seuil d'innocuité. Comment éviter une prise de risque excessive ? Symétriquement, comment éviter de compromettre la survie de l'activité, si elle est justifiée, par des exigences excessives en matière de protection contre le risque radiologique ? La réponse à cette question n'a finalement abouti qu'après une assez longue maturation. Il a fallu attendre 1977 pour que la Commission propose une réponse sous la forme d'un modèle. (ICRP, 1977). Reprenons les principales étapes de cette maturation.

En 1959, quatre ans après l'introduction de l'hypothèse de prudence, la CIPR écrit : « *L'attitude la plus prudente serait d'admettre qu'il n'y ait ni seuil ni restauration, auquel cas, même de faibles doses accumulées pourraient induire une leucémie chez certains individus prédisposés, et l'incidence pourrait être proportionnelle à la dose accumulée* », et la Commission de conclure : « *... il est donc hautement recommandé de maintenir les doses d'exposition aussi bas qu'il est praticable et d'éviter toute exposition inutile* » (ICRP, 1959). Ce texte introduit des éléments nouveaux. La notion d'exposition inutile implique celle d'exposition utile, c'est-à-dire d'une exposition résultant d'une activité qui procure un bénéfice collectivement sanctionné. On voit ensuite poindre l'idée de proportionnalité du risque qui va déboucher quelques années plus tard, en 1965, sur ce qu'on a appelé la relation « dose-effet » (ICRP, 1965).

Une fois admises l'absence de seuil d'innocuité et la possibilité d'effets stochastiques au côté des effets déterministes, il restait à préciser comment aborder les effets stochastiques potentiels. Dans un premier temps la CIPR a introduit une nouvelle valeur-limite pour ces effets non déterministes. À ce moment, le système de protection devait reposer sur la prise en

compte d'une double limite : celle pour les effets déterministes, qui est restée stable, car établie de façon expérimentale à partir de connaissances bien établies, et celle pour les effets stochastiques, qui est en fait une limite d'acceptabilité du risque reposant sur un jugement de valeur sur ce qui est acceptable pour les individus et la société. En dessous de cette seconde limite, la Commission recommandait de réduire les expositions à un niveau aussi bas qu'il était possible. En 1965, la relation dose-effet pour les risques stochastiques cancérogènes est clairement établie pour des expositions supérieures à 1 Sievert : la probabilité de décès consécutif à un cancer s'accroît alors, pour une personne exposée à cette dose, de 5% par rapport au risque naturel. En dessous de cette valeur, l'incertitude demeure. La Commission prend acte de cet état des connaissances et adopte une position très pragmatique : « *En raison du manque de connaissances sur la nature de la relation dose-effet, la Commission ne voit pas, pour la protection contre les rayonnements, d'autre solution pratique que d'admettre une relation linéaire entre la dose et l'effet ainsi qu'une action cumulative des doses* » (ICRP, 1965).

Par la suite, face à l'impossibilité de trancher sur l'existence ou non d'un seuil en dessous duquel il n'y aurait aucun effet délétère, les différents comités internationaux impliqués dans l'évaluation du risque des rayonnements ont confirmé cette approche de prudence qui prend également en compte un souci de simplification de la gestion du risque : par convention, faute de connaissances qui viendraient appuyer le choix d'autres formes de relations, une relation linéaire et sans seuil est postulée entre le niveau d'exposition et les effets ; elle est obtenue par extrapolation du risque mis en évidence par les études épidémiologiques pour les niveaux plus élevés d'exposition. Un tel choix a fait couler beaucoup d'encre et il reste encore aujourd'hui un objet de débat et de polémique.

Certains contestaient ainsi qu'on puisse organiser la prévention sur la base d'une simple hypothèse non confirmée, ni même étayée empiriquement, d'existence de risques pour de faibles doses. D'autres considéraient au contraire que l'absence de preuve de l'innocuité des activités impliquant une exposition à des rayonnements ionisants devait conduire à remettre en cause le bien-fondé même de ces activités. À cet égard, 1969 fut une date marquante du débat. Deux chercheurs américains, John Gofman et Arthur Tamplin (1970) avaient découvert à partir de travaux épidémiologiques que les risques cancérogènes des rayonnements étaient beaucoup élevés qu'il n'était encore admis à l'époque. Ils se sont alors fait l'avocat d'un moratoire de 5 ans sur la construction de nouvelles centrales nucléaires, ce qui allait contre les projets de l'Agence de l'énergie atomique américaine. Ces deux chercheurs sont restés célèbres pour avoir été les premiers à tirer argument des risques potentiels pour la santé, et des incertitudes concernant le risque radiologique, pour contester la poursuite des activités électronucléaires. Le débat qu'ils ont lancé continue encore aujourd'hui.

Un pas définitif est franchi par la CIPR en 1977. Dans sa publication n°26, elle remplace l'adverbe *readily* adopté en 1965 (*as low as readily achievable*) par celui de *reasonably* ("*as low as reasonably achievable*"). La principale recommandation devient ainsi : « *maintenir les expositions aussi bas qu'il est raisonnablement possible compte tenu des considérations économiques et sociales* » (ICRP, 1977). Cette formulation ne sera plus changée, étant répétée publication après publication jusqu'à nos jours. Il s'agit désormais d'un des principes fondamentaux de la radioprotection qui apporte une réponse pragmatique à la question de la

précaution concernant le risque aux faibles doses d'exposition, là où l'incertitude domine la scène. À vrai dire aucun des travaux postérieurs n'a jamais permis de prendre en défaut l'hypothèse prudente et pratique de linéarité des risques engendrés aux faibles doses. En l'absence de certitudes sur ces effets, la prudence est restée de mise.

Les années qui ont suivi l'introduction du principe ALARA faisaient partie d'une époque fortement marquée par la vague de la Rationalisation des choix budgétaires (RCB) et de l'application de l'analyse coûts-bénéfices aux décisions publiques. Aussi de nombreux efforts ont-ils été déployés pour tenter d'ancrer le principe ALARA dans le cadre de la rationalité et du calcul économiques. C'est d'ailleurs dans ce contexte que le Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN) a été créé en France. L'objectif poursuivi était de construire un cadre décisionnel fondé sur le calcul économique en intégrant autant que possible les dimensions sanitaires et sociales du risque. Le rôle prééminent donné à l'analyse coûts-bénéfices, c'est-à-dire l'extension aux biens non marchands des principes de valorisation monétaire supposés refléter les préférences individuelles des agents économiques (consommateurs, producteurs), a conduit à introduire des concepts difficiles à manier et souvent mal compris en dehors de la profession, comme par exemple « le prix de la vie humaine statistique épargnée », qui intervient dès lors que l'on met en regard la santé et l'évaluation monétaire des ressources à répartir dans un but de protection. De façon symptomatique, à la suite de ces divers développements relevant du calcul économique, la CIPR utilise indifféremment les expressions « principe ALARA » et « principe d'optimisation de la radioprotection » qu'elle considère comme équivalentes. Il en va ainsi également des autorités américaines.

Cependant en France et en Europe, cette volonté de rationalisation économique n'a tenu le haut du pavé que quelques années. Dans le courant des années 80 intervient une évolution importante en ce qui concerne la mise en œuvre de l'idée d'optimisation. Les circonstances ont fait que se s'est développée, parallèlement aux approches fondées sur le calcul économique, une démarche pragmatique de vigilance sur le terrain. Elle reposait sur un ensemble de procédures et d'outils conçus pour amener les acteurs de terrain à s'engager dans une démarche de vigilance permanente pour maintenir dans les installations les expositions aux rayonnements à un « *niveau aussi bas que raisonnablement possible en tenant compte des dimensions économiques et sociales* ». Diverses applications de ces méthodes pragmatiques ont été expérimentées dans différents secteurs industriels et en particulier dans l'industrie électronucléaire.

À cette occasion, partant d'une vision monolithique de la rationalité économique, le milieu des experts et des gestionnaires de la radioprotection s'est en fait converti de façon pragmatique aux approches multicritères. Cela a tout de même pris une bonne quinzaine d'années pour comprendre qu'on n'intègre pas la société dans un modèle, mais qu'on utilise un modèle pour aider la société à prendre des décisions. Le CEPN a largement contribué à cette évolution en France. D'autres équipes ont suivi un cheminement parallèle au niveau international, en particulier celle du NRPB (*National Radiological Protection Board*) en Grande-Bretagne. Les congrès internationaux de radioprotection de l'époque en ont été les témoins, donnant à voir la confrontation nette de deux cultures : abstraite et economiciste d'un côté, pragmatique et procédurale de l'autre côté.

Il ne s'agissait pas d'un débat d'idées déconnecté des enjeux de l'action. La transition a été poussée par les urgences de la situation. Commençaient en effet en France les premiers travaux importants de maintenance des centrales nucléaires qui avaient été mises en service au début de la décennie. Très vite ces travaux de maintenance se sont révélés coûteux en termes d'exposition des intervenants aux rayonnements. Or il fallait faire appel à des travailleurs très qualifiés qui passaient d'une centrale à l'autre. Assez rapidement, ces derniers allaient atteindre des niveaux de doses reçues proches des fameuses limites. Par ailleurs l'accident de *Three Mile Island* (TMI) aux États-Unis a eu pour principale conséquence de déclencher des programmes de travaux de modification pour renforcer la sûreté dans toutes les centrales, travaux généralement coûteux en expositions.

Ainsi, sans même considérer en eux-mêmes les problèmes sanitaires posés aux personnes affectées, la question de l'exposition aux rayonnements des personnels de maintenance confrontait les différentes parties concernées à des questions d'organisation et à des arbitrages économiques difficiles qui pouvaient affecter l'exploitation des centrales. Cela a conduit les responsables de l'époque à adopter rapidement un programme concret de réduction des expositions devant leur permettre de garder la maîtrise de l'exploitation et de la maintenance des centrales.

C'est alors que fut inventée la « procédure ALARA ». Cette procédure consiste à aborder chaque situation d'exposition en anticipant les conditions auxquelles seront finalement confrontés les travailleurs. Pour prévoir les expositions, différentes techniques sont utilisées : mesures *in situ*, retour d'expérience, étude de la dosimétrie de travailleurs qui ont déjà fait des opérations similaires. Une fois la situation future analysée, toutes les actions possibles pour réduire les expositions potentielles sont identifiées puisqu'il s'agit de réduire les expositions à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. Finalement, les actions qui paraissent les plus efficaces (ratio efficacité/coûts) sont retenues.

La procédure ne s'arrête pas là. Au stade de la réalisation effective des chantiers de maintenance ou de renforcement de la protection, le suivi de la protection est organisé très précisément pour faire face à d'éventuelles dérives. Il faut en effet pouvoir détecter rapidement les écarts par rapport à ce qui était prévu et, le cas échéant, suspendre un chantier pour avoir le temps de trouver des actions correctrices. Une fois le chantier terminé, le retour d'expérience doit être organisé pour que les chantiers similaires suivants puissent bénéficier du savoir-faire acquis. Toutes ces procédures ont été formalisées et ont donné lieu à la mise au point de guides pratiques destinés aux différents acteurs intervenant sur les chantiers.

Le risque de cette approche est de provoquer rapidement un retour à des routines qui s'accompagnent d'un abaissement du niveau de vigilance. Il faut en effet souligner la grande difficulté qu'il y a à mobiliser tout un ensemble d'acteurs autour de risques qui ne sont pas avérés, qui n'ont rien de tangible. Les préventeurs avaient aussi à surmonter ce qu'on peut qualifier comme des phénomènes de « dissonance cognitive » résultant du choc des deux logiques associées respectivement aux principes d'optimisation et de respect des valeurs-limites : pour les effets stochastiques, le respect des limites ne vaut pas garantie d'absence de risques. Le personnel s'entend dire à la fois qu'il lui faut être aussi prudent que possible, se

protéger à tout moment, etc., et en même temps, de façon implicite, qu'il n'y a pas de problèmes tant que la valeur limite réglementaire n'est pas dépassée. Pourquoi faire mieux si on est déjà en dessous de la limite ? Pour maintenir la motivation des acteurs à tous les niveaux, s'est alors imposée l'idée qu'il fallait développer une « culture ALARA », en sus du « principe ALARA » et de la « procédure ALARA ». L'élément central d'une telle culture est l'entretien de la vigilance et de la responsabilité des acteurs sur le terrain. Il s'agit d'assurer l'implication active des personnes concernées dans la connaissance et la prévention du risque afin de le ramener à un niveau aussi bas que raisonnablement possible.

C'est ainsi qu'EDF avait lancé un grand programme ALARA au début des années 90. Afin de motiver tous les acteurs concernés, l'entreprise s'est donné pour objectif de diviser les expositions par deux en cinq ans. Un tel objectif ne pouvait pas être déduit d'une analyse coûts-bénéfices, puisque la réalité du dommage n'est pas connue aux faibles doses. C'est l'idée d'un repère quantitatif, donc mesurable, sur une trajectoire d'amélioration à réaliser qui est apparue mobilisatrice pour l'entreprise. Il fallait cependant que l'objectif soit tout à la fois ambitieux et techniquement accessible sans mettre en péril l'activité économique. C'est cette réponse que l'entreprise a jugé nécessaire de donner pour maintenir la mobilisation des différentes catégories de personnel. Cet objectif a effectivement été atteint.

L'expérience a aussi montré qu'on ne pourrait pas soutenir durablement la vigilance de tous en en restant au stade de l'information, pourtant indispensable. En effet dès lors qu'il est admis qu'un risque existe, même aux très faibles doses, mais que l'activité est socialement justifiée, la question se pose des conditions de la prise de responsabilité vis à vis de ceux qui vont s'engager dans l'activité et supporter ce risque. Il ne serait pas moralement acceptable de convier une personne à venir travailler dans une activité qui présente des risques sans lui expliquer la nature et l'importance des risques encourus. Faute d'une telle information, la validité du contrat de travail pourrait être mise en cause. La personne engagée doit connaître l'existence des risques auxquels elle va être exposée.

Cependant, puisque les actions de prévention du risque par la limitation de l'exposition demandent le concours actif et la vigilance des personnels concernés, il n'est guère possible d'obtenir ce concours tout en refusant aux intéressés d'être associés plus en amont, au niveau de l'expertise et à celui de l'engagement stratégique, et non plus seulement à celui de l'exécution, à la détermination du risque accepté et pris. C'est ainsi qu'on en est venu à une mise en partage de la prise de risque en milieu professionnel.

Naturellement l'instauration de cette nouvelle relation autour de la gestion du risque stochastique a fait surgir des questions sur les conditions de la réparation des éventuels dommages réalisés qui, rappelons-le, ne sont attribuables que de façon stochastique, sans qu'un rapprochement causal de type déterministe puisse être fait. L'Organisation internationale du travail (OIT) et l'OMS ont engagé une réflexion sur ce point en s'appuyant sur la notion de « risque attribuable ». Il s'agit d'une approche déjà appliquée aux États-Unis et en Grande-Bretagne pour les réparations dues aux personnes atteintes d'un cancer qui a pu résulter d'expositions passées aux rayonnements émis soit dans le cadre professionnel, soit dans l'environnement domestique ou naturel. La part attribuable du risque refléterait l'ampleur de l'écart statistique de l'incidence des cancers entre une population exposée et une

population qui ne l'est pas. Par exemple si l'écart est de 3 pour un niveau témoin de 30, la part attribuable est dite de 10 %.

Une telle notion marquerait certainement une rupture conceptuelle au regard des pratiques d'indemnisation qui ont cours en France. Elle mérite cependant d'être sérieusement considérée. Que se passerait-il en effet si on étendait à la précaution les principes d'indemnisation valables pour la prévention ? On sait de façon statistique que dans une population standard d'un pays développé environ 25 % des personnes vont décéder d'un cancer. Donc pour 30 000 personnes travaillant dans l'industrie électronucléaire, on peut s'attendre à ce que 7500 meurent d'un cancer. Si l'on applique les concepts d'indemnisation valables pour les risques professionnels avérés, ces personnes ou leurs ayants droits pourraient légitimement revendiquer une indemnisation pleine en alléguant de leur travail dans cette industrie à risque. Un raisonnement analogue vaudrait pour les infirmières qui travaillent dans les services de radiologie. Du point de vue de la collectivité, cette indemnisation systématique ferait exploser les budgets et imposerait aux activités en question des charges à la fois insupportables et indues.

Cette question de la réparation montre bien en quoi les contextes de précaution ne peuvent pas être gérés de la même façon que les contextes de prévention. Quoi qu'on en pense³, la solution de la part attribuable est un signe net et concret de la différence entre contextes de prévention de risques avérés et de précaution face à des risques incertains.

Au terme de cette histoire, le principe ALARA n'est pas resté un concept abstrait ou une référence théorique pour les cercles internationaux d'expertise académique. Il a été mis en pratique dans le domaine de la radioprotection. À cette occasion, il s'est étoffé de démarches pragmatiques, sans pour autant renoncer à l'utilisation de calculs coûts-efficacité. Des réflexions restent à poursuivre pour assurer une plus grande implication de l'ensemble des acteurs qui sont parties prenantes de la prise de risque.

4. Les limites de dose et l'acceptabilité sociale du risque

Avec l'introduction de la notion de dose de tolérance, la philosophie de départ dans les années 30 était de définir de façon objective, à partir de considérations sanitaires propres au domaine, le niveau d'exposition à partir duquel les personnes irradiées étaient susceptibles de développer une pathologie repérable et d'organiser en conséquence les activités de telle sorte que l'on n'atteigne pas ce niveau. Cette philosophie a prévalu jusque dans les années 60 même si elle a évolué lorsque la notion de « dose maximale admissible » a été introduite et qu'entre temps, compte tenu des incertitudes concernant les effets des rayonnements, la tendance avait été de réduire la valeur proposée afin de prendre une marge de sécurité jugée prudente. Cette évolution tenait aussi à la volonté de faire de la « dose maximale » un outil réglementaire.

³ Le refus de remettre en cause l'application, à des contextes de précaution, des principes d'indemnisation adoptés pour des risques professionnels avérés pourrait simplement avoir pour effet un refus de la société d'organiser l'indemnisation des dommages dont l'origine n'est pas scientifiquement identifiée et démontrée.

Un changement important est intervenu lorsque la CIPR a cherché, à partir des années 70, à fonder les limites de dose en référence à l'acceptabilité sociale du risque. Cette approche était rendue possible par le fait que l'on savait désormais donner une expression quantitative du risque en fonction du niveau d'exposition. L'idée qui a été retenue à l'époque a été de comparer le risque associé aux rayonnements pour les niveaux d'exposition couramment rencontrés dans l'industrie ou pour le public avec les autres risques auxquels sont confrontés d'une part, les travailleurs et, d'autre part, les membres du public dans le cadre de différentes activités sociales. Cela a conduit à proposer des valeurs limites qui, compte tenu de la distribution des expositions dans les groupes exposés, pouvaient être considérées comme équivalentes, en termes de risque, pour les valeurs d'exposition moyennes, aux risques acceptés dans les industries les plus sûres, en ce qui concerne les travailleurs, et au risque associé aux transports en commun pour le public. Dès lors, la limite n'était plus directement l'expression d'un critère biologique ou sanitaire mais elle traduisait un critère social fondé sur la comparaison des risques à partir d'une seule dimension, en l'occurrence la probabilité de décès.

Cette approche n'a pas tenu deux décennies. En 1990, la CIPR change de paradigme pour la détermination des limites de dose (ICRP, 1990). Elle s'appuie pour ce faire sur les travaux du *Health and Safety Executive* au Royaume-Uni, auquel elle emprunte le modèle dit de « l'acceptabilité du risque ». Schématiquement ce modèle considère différentes plages de risque qualifiées respectivement d'inacceptable, de tolérable et de négligeable pour l'individu, en se plaçant dans une perspective de comparaison globale des risques du point de vue de la collectivité. Dans ce schéma, la limite de dose est définie comme la frontière entre l'inacceptable et le tolérable. Cette notion de « tolérable » désigne un risque que les individus peuvent supporter, même si ce risque n'est pas désirable à leurs yeux. Cette frontière entre deux catégories de risque est de plus définie comme la frontière séparant le licite de l'illicite sur le plan réglementaire. Malgré une réduction des valeurs nominales des limites pour le public, ce changement de paradigme s'est traduit par un relèvement du niveau de risque pour les travailleurs dans la mesure où la référence n'est plus l'alignement sur les industries les plus sûres, mais le maintien du risque en dessous du seuil à partir duquel le risque devient socialement inacceptable.

Ce changement d'approche des valeurs-limites a eu pour effet de faire de l'application du principe ALARA l'instrument prioritaire de la radioprotection, les limites ne jouant plus qu'un rôle secondaire de garantie quant au fait que le risque individuel restait à un niveau jugé tolérable par la collectivité. L'objectif prédominant est devenu, pour chaque activité particulière, pour chaque source de risque, de maintenir les expositions aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des facteurs économiques et sociaux. C'est seulement lorsque cet objectif est atteint que le risque peut être considéré comme acceptable. Il serait d'ailleurs plus juste de parler de risque accepté, dès lors que les différents acteurs concernés s'engagent de façon volontaire et responsable dans cette démarche.

L'importance attribuée à cette approche procédurale va incontestablement dans le sens d'un partage des décisions sur la prise de risques avec les différentes parties concernées, en particulier les collaborateurs des activités électronucléaires. Dans le même temps, elle peut conduire, au niveau international, à ce qu'une appréciation assez différente soit faite, d'un

pays à l'autre, voire d'un site à l'autre, quant à l'acceptabilité des risques, dès lors que les doses individuelles reçues respectent les doses limites individuelles, qui sont de portée universelle.

Au total, l'exigence de justification de la prise de risque, la définition de valeurs limites pour les doses d'exposition individuelle, définies en fonction de l'acceptabilité sociale du risque stochastique, le postulat d'une relation dose-effet linéaire sans seuil pour ces effets stochastiques, la référence aux considérations économiques et sociales pour déterminer le plus bas niveau « raisonnable » d'émission d'une activité donnée forment le socle de la gestion du risque radiologique aujourd'hui. Ces principes composent une figure pragmatique et très largement procédurale de mise en œuvre d'un principe de précaution proportionné pour guider l'action dans le domaine des faibles expositions.

Conclusion

L'histoire du développement de la protection radiologique est riche d'enseignement au regard du déploiement du principe de précaution. Sur le terrain de l'organisation de l'expertise, la protection radiologique repose sur une organisation originale et relativement efficace au niveau international, avec d'un côté le Comité Scientifique des Nations Unies sur les Effets des Radiations Atomiques, qui est chargé de « dire le risque » et, de l'autre, la CIPR, qui a en charge l'élaboration des principes de protection vis-à-vis de ce risque. Ces institutions ne sont pas sans faiblesses, touchant par exemple les modalités de choix des experts, mais globalement, cette expertise pluraliste, de caractère international, a jusqu'à présent su trouver des consensus sur des concepts et des valeurs qui ont été repris au niveau réglementaire pratiquement par l'ensemble des pays concernés.

Dans la mesure où des incertitudes importantes demeurent quant aux risques créés par les rayonnements ionisants - certains pensent que le risque existe même avec des faibles doses, d'autres qu'il n'existe pas, d'autres enfin pensent que ce peut être encore plus compliqué - il est normal que le débat scientifique perdure et qu'il soit tenu compte de l'existence de ce débat dans la définition des dispositifs de protection. Il est aussi important que ce débat puisse être alimenté par les résultats de recherches venant de tous horizons et que l'ensemble des éléments scientifiques disponibles puisse être pris en compte par ceux qui élaborent les normes par consensus. De ce point de vue, la distribution de l'expertise entre l'expertise positive dédiée à la construction d'une représentation du risque et à son évaluation d'un côté, et celle en charge de l'élaboration des principes et des valeurs seuils est quelque chose d'assez positif.

Il est indéniable que des progrès considérables des connaissances sur le risque des rayonnements ont été réalisés depuis la fin des années 40 et que les incertitudes se sont réduites, sans disparaître pour autant. Actuellement nous avons des connaissances approfondies sur les effets des rayonnements à fortes doses et à doses moyennes. Le seuil de détection d'effets scientifiquement prouvés est passé d'une exposition de 1 à 0,1 sievert, cette dernière valeur correspondant à la limite individuelle de dose sur 5 ans pour les travailleurs. Les niveaux à partir desquels nous voyons apparaître des effets sont ainsi significativement plus bas que les niveaux repérés il y a cinquante ans. Cependant, pour la plage des très faibles

doses, l'incertitude demeure et il est impossible, sur la base des connaissances actuelles, de fixer des principes de protection qui ne relèveraient que de considérations sanitaires scientifiquement établies. C'est pour cette raison que le principe de précaution, présent comme concept sinon comme appellation à un stade précoce de l'histoire de la radioprotection, continue à jouer un rôle déterminant. Quand on est dans un univers structuré par l'incertitude – le domaine des rayonnements ionisants relève d'un tel univers - la gestion relève du principe de précaution. En revanche, lorsque les risques sont bien connus, il suffit de respecter un certain nombre de règles pour se mettre à l'abri du risque. S'il n'existait dans le domaine des rayonnements que des effets déterministes, et si tout était mis en place pour que les valeurs-limites relatives à ce type d'effets ne soient jamais dépassées, alors les travailleurs pourraient travailler en ayant la garantie d'une sécurité totale au regard de ce risque. L'incertitude scientifique quant à la réalisation des effets stochastiques oblige à quitter cet univers de sécurité totale.

S'agissant de la mise en œuvre du principe de précaution, deux aspects méritent d'être soulignés. Le premier est sans doute la prise de conscience très récente du caractère trop réducteur des approches qui visent à mettre en équations la recherche du raisonnable en ne s'appuyant que sur le calcul économique. Cette limite tient à un présupposé intrinsèque à ces calculs, celui de l'existence d'une séparation nette entre décision et exécution, le calcul économique venant à l'appui de la première, tandis que la seconde est alors considérée comme allant de soi ou devant relever d'autres démarches disciplinaires. Au-delà des éléments disponibles dans le champ des techniques du management, une réflexion a été engagée pour tenter de construire une démarche faisant plus largement appel à l'implication directe de l'ensemble des acteurs concernés par le risque, y compris le personnel d'exécution.

Le second point concerne la difficulté éprouvée à changer de logique quand on passe de la prévention de risques avérés à des démarches de précaution visant des risques hypothétiques. Dans le cas des rayonnements ionisants, cette difficulté est manifeste dans le maniement des valeurs limites ou valeurs-seuils. On est passé de la prévention à la précaution tout en gardant la même forme, mais en changeant le fondement. Tous les acteurs qui ont à s'approprier ce repère au quotidien ne parviennent pas à saisir les changements opérés et certains continuent à raisonner sur les valeurs limites « de précaution » comme sur les valeurs limites « de prévention ». Cela peut donner l'illusion qu'il est possible de gérer les situations de précaution comme on le faisait jusqu'alors pour les effets déterministes. Or, ce n'est pas possible, puisque cela conduirait à une remise en cause radicale d'activités pourtant considérées comme socialement utiles. Le principe de précaution doit éviter deux écueils : le déni du risque, d'autant plus tentant que l'incertitude scientifique est importante et durable ; la surenchère catastrophiste, avec son lot de peurs et de stress, qui tend à déboucher sur la remise en cause de toute activité pour laquelle on ne peut exclure la possibilité de risques pour la santé. C'est en cela que le principe de précaution a besoin d'une culture propre, comme celle que la démarche ALARA cherche aujourd'hui à promouvoir.

Références bibliographiques

Abrahamson S. [1996], "70 Years of Radiation Genetics: Fruit Flies, Mice and Humans", *Health Physics*, **71**(5), 624-633.

- International Commission on Radiological Protection [1955], "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", *British Journal of Radiology*, Supplement N°6, London.
- International Commission on Radiological Protection [1959], *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 1*. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection [1965], *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 9*. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection [1977], *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 26*. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection [1990], *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60*. Oxford, Pergamon Press.
- Lochard J., et al. [2000], *La gestion du risque associé aux déchets radioactifs à haute activité et à vie longue*. Rapport CEPN-R-268, Août.
- Lochard J. and C. Schieber [2000], "The Evolution of Radiological Risk Management: An Overview". *Journal of Radiological Protection*, **20**(2), pp. 101-110.
- Lochard J. [2002], De l'expertise formelle à la co-expertise : parcours dans le champ de la protection radiologique, *Revue française d'administration publique*, 'L'administrateur et l'expert', ENA, (103), décembre, pp. 471-481.
- Lochard J. [2003], "Radiation Risk in the Workplace in Perspective". In: *Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation*, Proceedings of an International IAEA/ILO/EC/OECD/WHO Conference, Geneva, Switzerland, 26-30 August 2002, IAEA, pp. 143-152.
- Godard, O. [2005], Le principe de précaution et la proportionnalité face à l'incertitude scientifique, in Conseil d'Etat, *Rapport public 2005 – Responsabilité et socialisation du risque*. Paris, La Documentation française, pp. 377-392.
- Gofman, J.W. [1990], *Radiation-induced Cancer from Low-Dose Exposure: An Independent Analysis*. San Francisco, Committee for Nuclear Responsibility Books, 480 p.
- Gofman, J.W. and A.R. Tamplin [1970], "Low Dose Radiation and Cancer," paper presented Oct. 29, 1969 at the IEEE Nuclear Science Symposium, San Francisco. Published in: *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **NS-17**(1), February, pp. 1-9.
-