

La problématique des faibles doses de rayonnement

H.Nifenecker

18 mars 2010

Cours UIAD 2009-2010

Un juge de paix, la CIPR

C'est en 1928 que des radiologues fondèrent la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) afin de définir les bonnes pratiques qui permettraient de diminuer le nombre et la gravité des maladies professionnelles qui atteignaient les radiologues. La CIPR est devenue la référence en ce qui concerne les normes de protection du public et des travailleurs contre les effets des radiations. Elle est composée d'une commission centrale et de cinq comités : sur les effets des radiations, les doses reçues par irradiation, la protection en médecine, l'application des recommandations de la CIPR, et la protection de l'environnement. La commission centrale comporte 12 membres et un président, cooptés avec un renouvellement obligatoire de 3 à 5 membres tous les 4 ans. Les comités comprennent de 15 à 20 membres. Les biologistes et les médecins sont en majorité, avec une bonne représentation de physiciens.

Par son indépendance, la CIPR a acquis une autorité internationale. Sur le plan scientifique, elle s'appuie sur ses propres expertises et sur les travaux du comité américain BEIR (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation), de l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) et d'autres comités nationaux. Elle édite des recommandations reprises par de nombreuses institutions internationales et de nombreux Etats. Par exemple, les recommandations de la CIPR sont à la base d'une directive de la Commission européenne qui doit impérativement être reprise dans la législation des Etats membres.

La dernière recommandation de la CIPR est la recommandation 103 parue en 2007 (cf:

http://net-science.irsn.org/net-science/liblocal/docs/docs_DIR/CIPR_103.pdf).

Unités de mesure de l'effet des rayonnements sur la santé

Un rayonnement pénétrant dans une cellule peut avoir trois types d'effets : ou bien rien ne se passe, ou bien la cellule meurt à plus ou moins court terme, ou bien des mutations sont induites dans l'ADN. Si, du fait d'une irradiation intense, de nombreuses cellules meurent, des troubles graves peuvent se déclencher dans les tissus et organes de l'individu irradié, allant jusqu'à la mort dans les quelques mois suivant l'irradiation. C'est ce qu'on appelle les effets déterministes des radiations. Pour des irradiations plus faibles les mutations induites dans l'ADN induisent ou non des cancers. C'est le domaine des effets dits probabilistes. C'est de ce dernier domaine qu'il s'agit quand on parle de faibles doses, et c'est à lui que nous allons nous intéresser car c'est le seul qui importe lorsqu'il s'agit des effets sanitaires de l'industrie nucléaire pour le grand public.

En premier lieu, les effets sanitaires des rayonnements sont fonction de la quantité d'énergie reçue. On la mesure en Joule par kilogramme de matière vivante, c'est le Gray. Le Gray correspond à une forte irradiation. Les débits de doses que nous recevons de la **radioactivité** naturelle sont plutôt de l'ordre du milligray par an. Les effets sanitaires dépendent aussi de la nature des rayonnements : par exemple, les rayons **alpha** sont 20 fois plus efficaces que les rayons **gamma** ou **bêta** pour

l'induction d'effets probabilistes à faibles doses. Ils dépendent aussi de la nature des organes irradiés. La « dose équivalente » est supposée mesurer les effets sanitaires des radiations et est évaluée en « Sievert (Sv) ». La façon la plus simple de comprendre ce que signifie le Sievert est de se rapporter à des situations habituelles comme celles indiquées sur le Tableau 1 . Le débit de dose moyen auquel les Français sont soumis est de 3 mSv/an et celui qu'ils reçoivent des radioéléments comme le potassium 40 et le carbone 14 présents naturellement dans leurs tissus est de 0,25 mSv/an¹.

La **radioactivité** moyenne varie fortement d'un endroit à un autre. Ainsi est-elle deux fois plus intense dans le Massif Central et en Corse que dans la région parisienne. Dans certaines régions du monde comme l'Etat du Kerala en Inde et la ville de Ramsar en Iran, elle atteint des valeurs plusieurs dizaines de fois plus importantes qu'en France.

	Dose en millisievert/an
Total Irradiation naturelle moyenne France	3
Total Irradiation naturelle moyenne Ramsar (Iran)	132(max : 250)
Total Irradiation naturelle moyenne Kerala (Inde)	15-75
Doses auto-générées (DARI)	0,25
Radon	2
Rayons cosmiques	0.3
Rayons X médicaux	0.4
Séjour d'un an à 2000 mètres	0.8
Irradiation du public due aux Centrales nucléaires	0.0005
Irradiation moyenne en France due à Tchernobyl dans la première année suivant l'accident	0.05
Limite de dose public CIPR	1
Limite de dose travailleurs	20

Tableau 1

exemples de doses reçues dans différentes situations

voir : <http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?article58>

Relation entre les doses reçues et les effets sanitaires

L'essentiel de nos connaissances concernant la relation dose-effet de l'irradiation provient du suivi médical des survivants de Hiroshima et Nagasaki (HN). Parmi les 86572 survivants de Hiroshima et Nagasaki, 7827 sont morts de cancer entre 1950 et 1990, alors qu'en l'absence de l'irradiation due aux explosions le nombre de cancers attendu était d'environ 7406. Le surcroît de cancers a donc été de l'ordre de 421(Pierce et al., Rad. Res. 146, 1996), soit un surcroît de cancers mortels de 5,6% . La dose moyenne reçue par ces survivants a été estimée à environ 0,1 Sv. En faisant l'hypothèse d'une relation linéaire entre la dose et le nombre de cancers mortels, la CIPR arrive à la relation dite « Linéaire Sans Seuil (RLSS) », où le surcroît de probabilité de développer un cancer mortel du fait de l'irradiation est égal à 0,05 fois la dose en Sievert: $P=0,05 D (Sv)$. Les données justifiant cette

¹ G.Charpak et R.Garwin ont proposé l'unité DARI pour mesurer les doses d'irradiation égale précisément à 0,25 mSv

relation sont données sur la Figure 1 (<http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/larelationlineairesansseuil.htm>).

En réalité, la validité de la RLSS pour de faibles irradiations, inférieures à 100 mSv, est loin d'être prouvée. Il existe une controverse scientifique sur ce sujet que nous examinons avant de discuter de la signification des recommandations de la CIPR

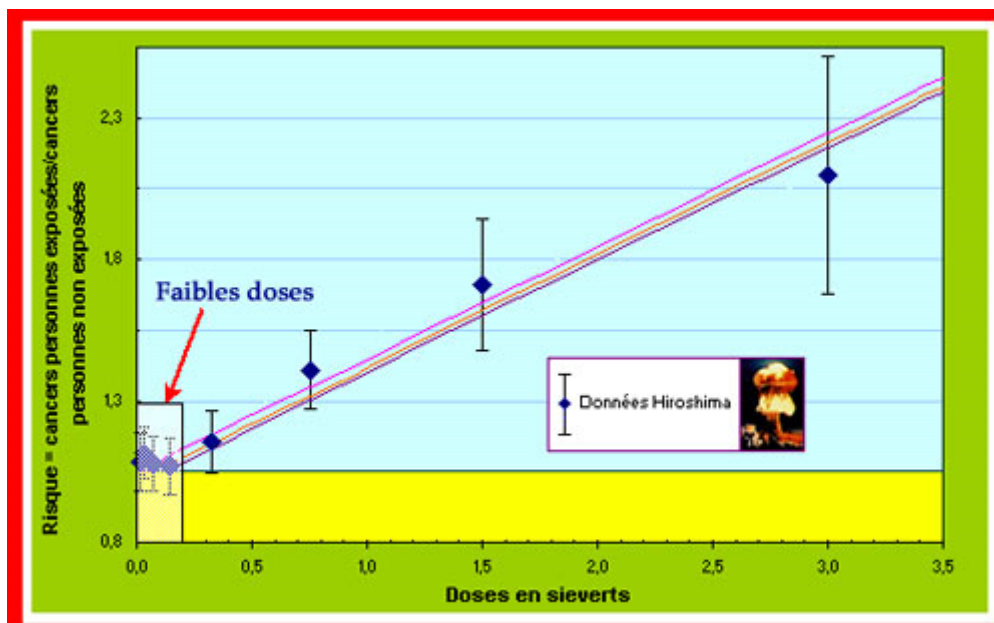


Figure 1

Evolution du risque relatif de cancer solide mortel en fonction de la dose de rayonnement reçu pour les irradiés de Hiroshima et Nagasaki. Le risque relatif est le rapport du nombre de cancer qui se déclarent chez des personnes exposées à celui qui se déclarent chez des personnes non exposées. La ligne droite correspond au calcul de la RLSS. (Pierce et al., Rad. Res. 146, 1996), soit un surcroît de cancers mortels de 5,6%

La controverse sur les faibles doses^{2, 3}

Le domaine qui est à l'origine de la relation RLSS de la CIPR correspond à des doses supérieures à 100 mSv pour les adultes et 50 mSv pour les enfants. Pour des doses plus faibles, la CIPR retient le principe d'une extrapolation linéaire. Le domaine de l'irradiation naturelle est situé entre 1 et 10 mSv, soit en appliquant la RLSS, des probabilités additionnelles de développer un cancer mortel comprises entre 0,0005 et 0,00005. Comparées à la probabilité moyenne d'environ 0,3 de mourir

² Un excellent exposé des éléments de cette controverse peut être trouvé sur Wikipedia:

http://fr.wikipedia.org/wiki/Faibles_doses_d%27irradiation

Les objections à la Loi Linéaire Sans Seuil sont exposées dans le rapport joint des Académies de Médecine et des Sciences:

http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/dose_effet_07_04_05.pdf

³ Voir aussi : « La controverse sur les effets des faibles doses de rayonnements ionisants et la relation linéaire sans seuil »

M. Tubiana, R. Masse, F. de Vathaire, D. Averbeck, A. Aurengo, Radioprotection 2007, Vol 42, N°2, p133

d'un cancer ces chiffres paraissent négligeables. Alors pourquoi cette controverse? pour trois raisons:

1. Parce que les recommandations de la CIPR peuvent se traduire par des dépenses lourdes pour diminuer les doses reçues par les travailleurs ou par le public et qu'il n'est pas toujours évident que ces dépenses ne seraient pas plus utiles dans un autre domaine de la santé publique. Dans les attendus de son rapport n°103, la CIPR se montre d'ailleurs parfaitement au courant de cette problématique économique.
2. Parce que la loi RLSS a été et est encore utilisée pour calculer un nombre de victimes des faibles irradiations. Or une probabilité, aussi faible soit-elle, multipliée par un très grand nombre, donne un très grand nombre. Prenons l'exemple de la **radioactivité** naturelle moyenne de 3 mSv/an. Pour 60 millions d'habitants, on arriverait à 9000 décès annuels; et pour 6 milliards, à 900000. Si on étend le calcul sur une période de 100 ans, on arrive à 900000 décès pour la France et à 90 millions pour le monde. De tels chiffres cités sans précaution paraissent énormes et justifieraient des mesures énergiques, comme de déménager les habitants des zones les plus irradiées (Bretagne, Corse, Massif central, régions de montagne) vers celles qui le sont moins. Ainsi pourrait-on éviter le tiers des décès « théoriques » soit, pour 100 ans pour le monde, environ 30 millions de décès (autant qu'une guerre mondiale!). Mais à quel prix social et économique? D'un autre côté en 100 ans, pour le monde entier, le nombre de décès atteindrait environ 12 milliards! La possibilité d'éviter éventuellement (nous allons voir que ce n'est même pas sûr) 2 à 3 décès prématurés pour mille justifierait-elle un bouleversement aussi important que l'évacuation de la moitié de la planète?
3. Parce que l'étude des effets des faibles doses est un défi scientifique considérable qui mobilise les derniers progrès faits dans la compréhension de la cellule et des relations entre cellules.

Les arguments s'opposant à l'extrapolation de la RLSS aux faibles doses.

Voici quelques arguments avancés pour mettre en doute la validité de la RLSS.

1. Les données sur les leucémies des victimes de HN ne sont clairement pas en accord avec la RLSS, comme on peut le voir sur la Figure 2 . Cette figure représente le risque relatif⁴ de leucémies pour les irradiés de HN. La ligne en gras correspond à la RLSS.
2. L'étude de populations soumises à de fortes doses naturelles ne confirme pas la validité de la RLSS. Le Tableau 2 obtenu grâce à une étude épidémiologique menée pendant 10 ans sur une population de plus de 170000 habitants du Kerala, ne montre pas d'évolution de la mortalité par cancer en fonction de la dose annuelle reçue. Or l'application de la RLSS montre une différence de plus de 10 décès par cancer pour 100000 habitants/an entre les catégories les plus et les moins irradiées, différence qui devrait clairement apparaître.

Niveau de radiations mSv/an	Mortalité par cancer pour 100000 habitants/an	Prévisions RLSS cancers pour 100000 habitants/an
3,2-5,3	35,66+ ⁻ 3	16-26
1,9-3	37,42+ ⁻ 3	9,5-15
0,85-1,5	37,86+ ⁻ 3	4,25-7,5

Tableau 2

⁴ Le risque relatif est le rapport du nombre de leucémies dans le groupe irradié au nombre de leucémies dans un groupe de même taille non irradié.

Mortalité annuelle par cancers ramenée à 100000 habitants en fonction de la dose annuelle reçue. Les valeurs observées sont comparées aux prévisions de la RLSS (Nair, Raghu Ram K. et al., Background Radiation and Cancer Incidence in Kerala, India-Karanagappally Cohort Study, Health Physics: January 2009 - Volume 96 - Issue 1 - pp 55-66).

Une autre étude sur des populations importantes a été faite en Chine dans la région de Yangjiang (voir http://www.ecole.ensicaen.fr/~olory/sfencaen2008/Conferences/metivier_CAEN%20140308.pdf) et ne trouve pas non plus d'augmentation de la mortalité par cancers dans les zones à forte **radioactivité** naturelle (environ 6,4 mSv/an). Des conclusions similaires ont été obtenues dans l'étude menée sur la population de Ramsar (ibidem), en Iran, où les doses auxquelles est exposée la population atteignent 250 mSv/an.

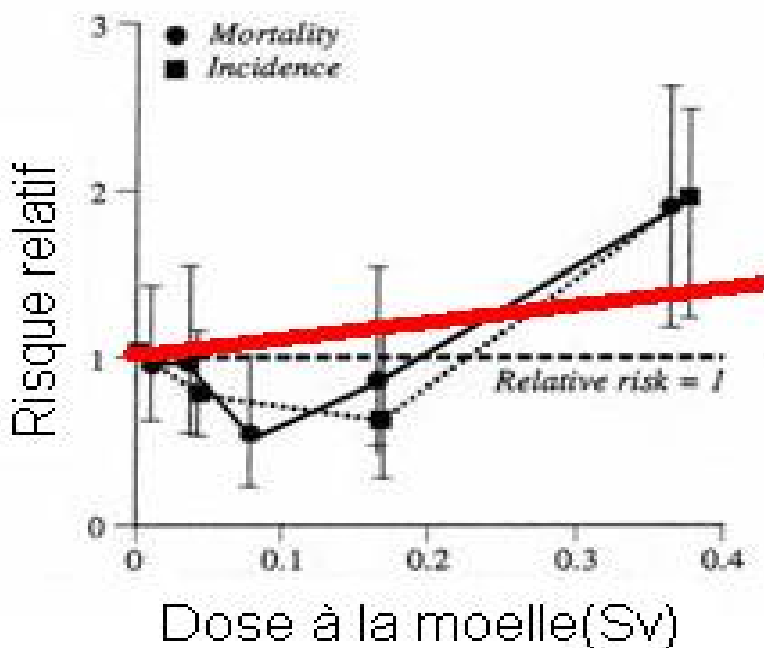


Figure 2

variation du risque relatif de leucémies (mortalité et incidence) des irradiés de HN en fonction de la dose reçue. La droite en gras correspond à la Loi Linéaire sans Seuil. Voir

http://www.ecole.ensicaen.fr/~olory/sfencaen2008/Conferences/metivier_CAEN%20140308.pdf

3. Une des études les plus complètes de la corrélation entre taux de radon⁵ et cancers du

⁵ Le radon est un gaz rare émis lors de la désintégration radioactive de l'uranium et du thorium. En tant que gaz rare il

poumon a été menée par B.Cohen(Cohen BL. [Test of the linear no-threshold theory of radiation carcinogenesis in the low dose, low dose rate region](#) . Health Phys 68:157-174 (1995))sur 270000 maisons américaines et leurs habitants. C'est la plus grande étude épidémiologique sur l'effet de l'irradiation par le radon qui ait été faite à ce jour. Un exemple de résultat est présenté sur la Figure 3. Il est en contradiction évidente avec la loi RLSS

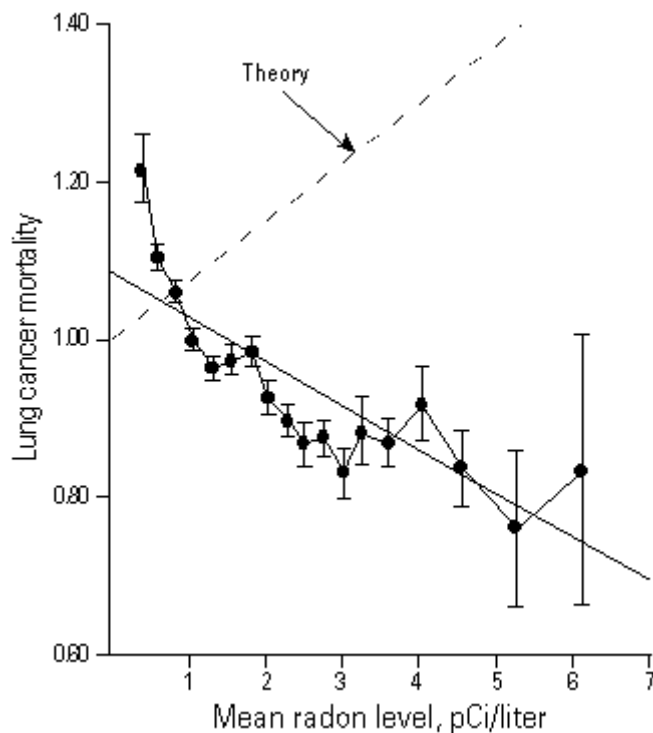


Figure 3

Taux de mortalité par cancer du poumon, en fonction du taux moyen de radon domestique mesurée par B.Cohen. Comparaison entre l'hypothèse linéaire sans seuil (droite pointillée) et les données expérimentales. La contradiction entre les données expérimentales et la RLSS est flagrante.

L'étude de B.Cohen a été fortement critiquée par d'autres épidémiologistes, qui mettent en cause une prise en compte insuffisante de l'influence du tabac. Des études cas-témoin montrent des corrélations parfois positives, parfois nulles entre les taux de radon et le nombre de cancers du poumon(par exemple : Le radon : un agent carcinogène pulmonaire professionnel et domestique B. Melloni, F. Bonnaud <http://www.em-consulte.com/article/157136>). Les études cas-témoin⁶ sont aussi sujettes à critiques sur la méthode, surtout lorsqu'elle font intervenir les souvenirs des cas et

ne séjourne pas dans les poumons mais est un émetteur **alpha** puissant. Si une désintégration se produit au passage dans les poumons les produits de désintégration et leurs descendants sont piégés et de nouvelles irradiations alpha et béta s'ensuivent

- 6 Dans l'espèce, l'étude cas-témoin consiste à suivre un certain nombre de victimes du cancer (les cas) et à remonter leur histoire sur une trentaine d'années et de faire la même chose avec un nombre équivalent de sujets non atteints (les témoins) ayant des caractéristiques aussi proches que possible que celles des cas. Une des difficultés de cette méthode est que les « cas » sont beaucoup plus sensibilisés à tout ce qui, dans leur histoire, pourrait avoir eu un rôle dans le développement de leur maladie.

des témoins. Dans le cas présent, certaines études, toutefois, ont été faites de manière non déclarative (sans faire appel aux souvenirs des sujets) et trouvent une corrélation positive entre teneur en radon et cancers du poumon mais chez les fumeurs uniquement. La question semble donc rester ouverte.

4. Les études des processus de réparation et de mort cellulaire qui menées ces dernières années (Voir par exemple R. Masse, « Les effets sanitaires des radiations », in « L'énergie de demain » p.465, EDP Sciences 2005) montrent que, contrairement à l'hypothèse qui validait la RLSS, leur efficacité dépend de la dose de radiations reçue et de son débit de dose. En effet, l'hypothèse qui a justifié la RLSS était que toute atteinte à l'ADN d'une cellule pouvait, avec une probabilité constante, provoquer un cancer. La probabilité qu'une cellule spécifique soit atteinte étant faible, les probabilités devraient s'ajouter et la loi linéaire sans seuil être valable. Si, comme observé, les processus de réparation et de mort cellulaire qui modulent la probabilité qu'une cellule dont l'ADN a été détérioré soit à l'origine d'un cancer, ont des efficacités dépendant de la dose reçue, la RLSS n'a plus de raison d'être valable. Ceci est d'autant plus vrai qu'on a observé que l'environnement cellulaire joue aussi un rôle dans le contrôle du développement des tumeurs (c'est l'effet 'bystander »). Par ailleurs, le développement des performances des diagnostics de cancer et les politiques de prévention ont montré que de très nombreux cancers de petites tailles ne se développent pas. Des biopsies effectuées sur des victimes d'accident montrent que 30% des hommes âgés de 30 ans présentent un petit cancer de la prostate qui ne se développera sans doute pas (le taux de cancers de la prostate pour l'ensemble de la population masculine était d'environ 0,07% en 2000 selon le rapport « Les causes du cancer en France des Académies de Médecine, des Sciences et d'autres institutions internationales »); des petits cancers de la thyroïde sont observés dans près de 70% des cas qui, eux non plus, ne se développeront que très rarement (taux de cancers de la thyroïde détectés de l'ordre de 3 pour 100000). La genèse des cancers est donc beaucoup plus complexe que ne le supposait l'hypothèse justificatrice de la RLSS.

f) L'interprétation des recommandations de la CIPR

La CIPR a pour priorité de proposer aux autorités politiques un guide pour édicter des règles concernant les limites de dose acceptables pour le public et pour les travailleurs. Même si la validité de la RLSS est mise en doute pour les faibles doses, il n'existe actuellement pas d'alternative claire. La CIPR ne pouvait guère que confirmer la validité normative de la RLSS. C'est ce qu'elle dit clairement page 38 de son rapport 103:

À des doses de rayonnement inférieures à environ 100 mSv par an, l'augmentation de l'incidence des effets stochastiques (probabilistes n.d.e.) est censée se produire, selon la Commission, avec une faible probabilité et proportionnellement à l'augmentation des doses de rayonnement au-dessus de la dose due au fond naturel. L'utilisation de ce modèle, ainsi nommé linéaire sans seuil (RLSS), est considérée par la Commission comme étant la meilleure approche pratique pour gérer le risque dû à l'exposition aux rayonnements et en accord avec le « principe de précaution » (UNESCO, 2005). La Commission considère que le modèle RLSS reste une base prudente pour la protection radiologique aux faibles doses et aux faibles débits de dose (CIPR, 2005d)

Remarquons que la CIPR met la **radioactivité** naturelle entre parenthèse, ce qui montre bien que son objectif est d'ordre réglementaire.

De même, la notion de dose collective garde son utilité dans le même contexte, comme on le trouve p.78 du rapport :

« La dose efficace collective S repose sur l'hypothèse d'une relation dose-

effet linéaire sans seuil (modèle RLSS) pour les effets stochastiques. Sur cette base, il est possible de considérer les doses efficaces comme étant additives. »

Par contre, la CIPR est bien consciente des limites de la RLSS et considère que cette loi n'est pas valable lorsqu'il s'agit de calculer le nombre de décès dus à l'exposition à des doses faibles de radiations. Ceci est clairement exposé page 48 :

« Cependant, bien que le modèle RLSS reste un élément scientifiquement plausible pour son système pratique de protection radiologique, la Commission souligne le fait que des informations biologiques/épidémiologiques qui permettraient de vérifier sans ambiguïté les hypothèses sous-jacentes au modèle RLSS font défaut (voir UNSCEAR, 2000 ; NCRP, 2001). En raison de cette incertitude quant aux effets sur la santé des faibles doses, la Commission estime qu'il est inapproprié, pour les besoins de la santé publique, de calculer le nombre hypothétique de cas de cancers ou de maladies héréditaires qui pourraient être associés à de très faibles doses de rayonnement reçues par un grand nombre de personnes sur de très longues périodes. »

Pour les mêmes raisons la CIPR considère que la notion de dose collective ne peut être utilisée dans le contexte des études épidémiologistes :

« La dose efficace collective est un instrument d'optimisation permettant de comparer des technologies radiologiques et des procédures de protection. La dose efficace collective n'est pas destinée à être un outil pour les études épidémiologiques, et il ne convient pas de l'utiliser dans les projections de risque. Cela provient du fait que les hypothèses implicites dans le calcul de la dose efficace collective (par exemple, lors de l'application du modèle RLSS) impliquent de grandes incertitudes d'ordres biologique et statistique. En particulier, le calcul des cancers mortels reposant sur les doses efficaces collectives résultant d'expositions insignifiantes reçues par des individus en grand nombre n'est pas raisonnable et doit être évité. De tels calculs reposant sur la dose efficace collective n'avaient jamais été envisagés par la Commission, sont très incertains aux plans biologique et statistique, présupposent un certain nombre d'avertissements qui ont tendance à ne pas être rappelés lorsque les estimations sont citées hors de leur contexte, et ne constituent pas une utilisation correcte de cette grandeur de protection. »

Par cette prise de position la CIPR condamne clairement les pratiques consistant à utiliser la RLSS pour « calculer » le nombre de décès, pour des populations importantes, faiblement irradiées, comme, par exemple dans le cas de la catastrophe de Tchernobyl, intégrer les très faibles doses reçues par l'ensemble des européens pendant plusieurs dizaines d'années du fait des retombées de césium 137.

La CIPR est clairement assise entre deux chaises dans son souci de proposer des normes et de tenir compte des récents résultats scientifiques. Pour sortir de cette contradiction, il serait intéressant de se baser sur la valeur de la **radioactivité** naturelle. On pourrait considérer qu'une irradiation supplémentaire représentant une fraction de la dose moyenne due à la **radioactivité** naturelle n'aurait pas de conséquence sanitaire. Dans la pratique la dose efficace limite de 1 mSv/an recommandée par la CIPR pour le public⁷ serait justifiée comme étant le tiers de la dose due à la **radioactivité** naturelle. Les études épidémiologiques comme celles que nous avons citées plus haut semblent conduire à l'idée simple que pour des irradiations supplémentaires inférieures à 3 mSv/an, 'il n'y aurait pas de conséquences sanitaires.

⁷ Pour les professionnels la limite de dose est de 20mSv/an moyennée sur des périodes définies de 5 ans (100 mSv en 5 ans)

