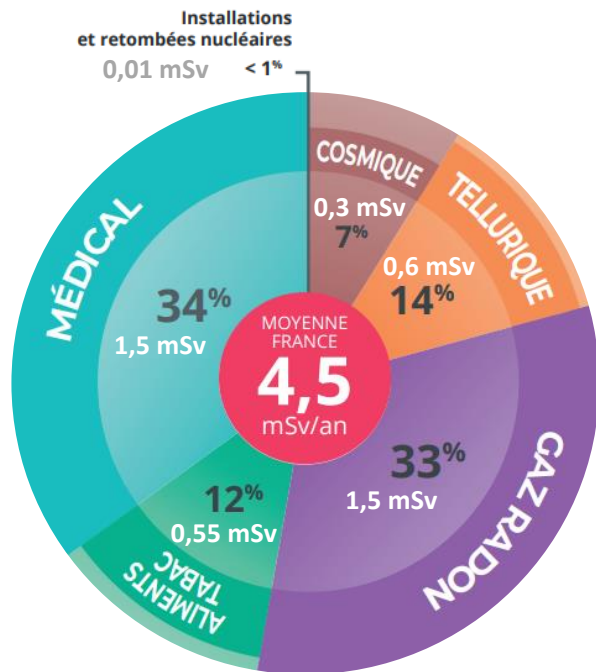


EFFETS SANITAIRES ATTRIBUABLES AUX FAIBLES DOSES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

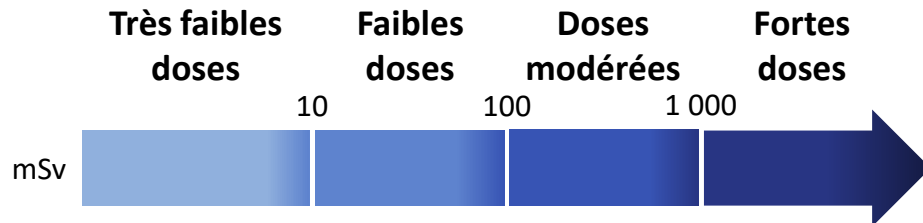
Enora CLERO, Docteur en Epidémiologie (IRSN)

Atelier “Enjeux environnementaux et santé publique”
Volgelsheim, 27 novembre 2024

Exposition aux rayonnements ionisants de la population française



[IRSN, 2021]



Risque sanitaire

Effets stochastiques (effets probabilistes)

- Fréquence augmente avec la dose
- Faibles à moyennes doses
- Modèle sans seuil
- Effets tardifs, non spécifiques :
 - o Cancers
 - o Effets héréditaires



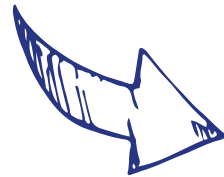
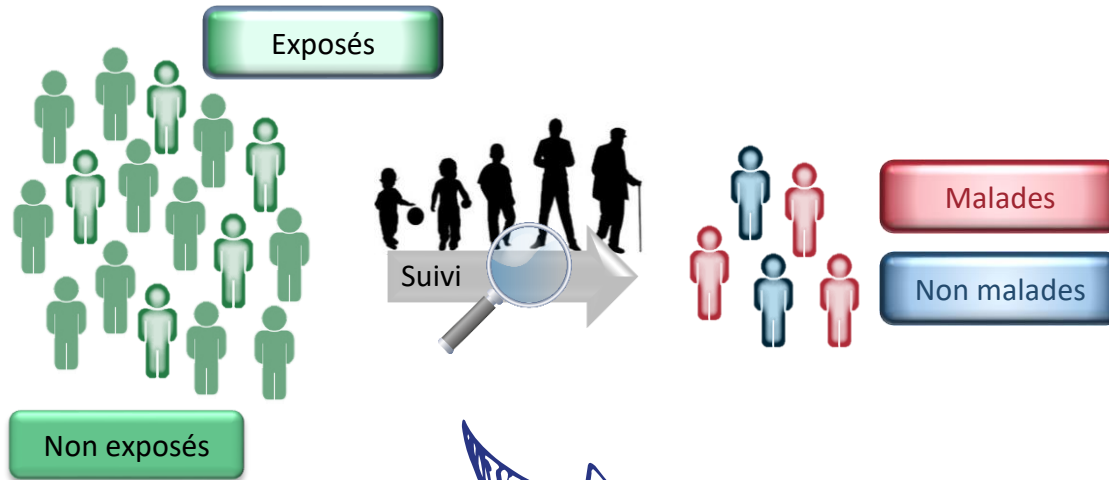
Radioprotection :



Limiter la survenue de ces effets

Epidémiologie des effets des rayonnements ionisants

« Etude de la **fréquence** et de la **répartition** des maladies dans le temps et dans l'espace au sein des populations humaines, ainsi que des **facteurs** qui les déterminent »



Modélisation de la relation
exposition-risque

Discipline adaptée
à l'étude des effets
à long terme

Effets sanitaires ?
Relation dose-effet ?
Séquence temporelle exposition-effet ?
Facteurs modifiants ?



Historique de l'épidémiologie sur les effets des radiations

1950

Médecins **radiologues** (1900-1930)

Peintres de cadrans lumineux, radium (1910-1930)

Irradiations médicales pour affections non malignes, radiodiagnostic (1920-1940)

Survivants des bombes atomiques de **Hiroshima-Nagasaki** (1945)

→ Acquis incontournables
sur les effets radio-induits

1960

Mineurs d'uranium (1940-1990)

1970

Populations exposées aux retombées d'**essais atomiques** (1950-1990)

Travailleurs de l'**industrie du nucléaire** (1950-)

1980

Populations exposées aux **rayonnements naturels**

1990

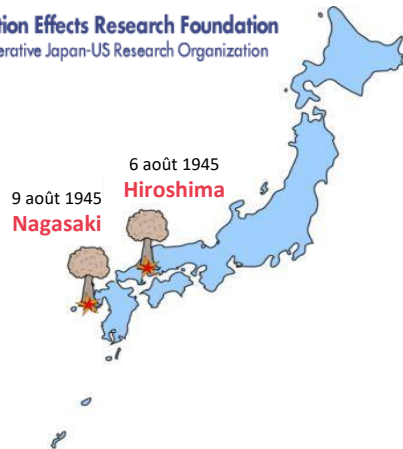
Populations exposées aux retombées de l'accident de **Tchernobyl** (1986)

2010

Enfants exposés aux **scanners**, visée diagnostique (1980-)

Populations exposées aux retombées de l'accident de **Fukushima** (2011)

Etude sur les survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki



Life Span Study (LSS)

Population étudiée (cohorte) : hommes et femmes, tous les âges (+ *in utero*)

86 600 individus avec une dose reconstituée : 80 % des doses ≤ 100 mGy

→ Exposition externe, débit de dose élevé

Suivi de mortalité/incidence depuis 1950's, soit ≈ 70 ans de suivi

Leucémies et cancers solides

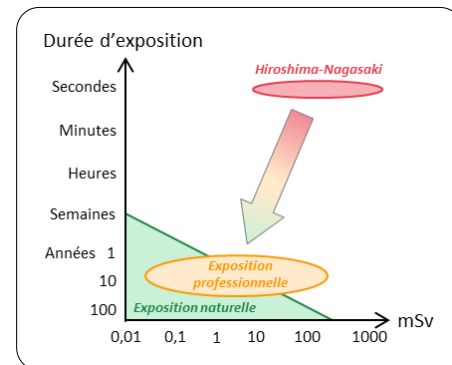
- ❑ Augmentation du risque de **cancers solides** et de **leucémies** avec la **dose** (depuis 1970's pour certains cancers)
- ❑ **Latence** de quelques années (leucémies) à plusieurs dizaines d'années (cancers solides)
- ❑ Risque par unité de dose diminue avec l'**âge à l'exposition**, l'**âge atteint**, le **décalage** depuis de l'exposition
- ❑ Pas d'évidence d'un seuil, mais larges incertitudes en-dessous de 100 mGy

Maladies du système circulatoire

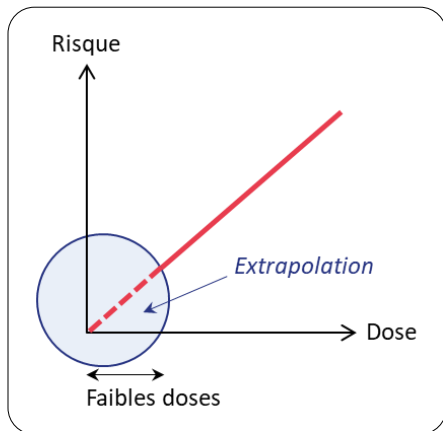
- ❑ Depuis les années 2000, augmentation de la fréquence de **maladies cardio- et cérébro-vasculaires** avec la dose
- ❑ Larges incertitudes en-dessous de 500 mGy

Système de radioprotection

Le **système actuel de radioprotection** repose notamment sur une **extrapolation des connaissances des risques radio-induits** tirées du suivi épidémiologique des survivants des bombardements de **Hiroshima et Nagasaki** qui ont été exposées à des doses aiguës de rayonnements ionisants (RI), délivrées en une seule fois avec un fort débit dose



En raison d'une **incertitude sur les risques sanitaires aux faibles doses et faibles débits de dose**, des **hypothèses** ont été posées [ICRP Publication 103, 2007]



« [...] le système pratique de protection radiologique recommandé par la Commission continuera d'être fondé sur l'hypothèse que, pour des doses inférieures à environ 100 mSv, **un incrément de dose donné produira un incrément directement proportionnel de la probabilité d'induction d'effets cancérogènes ou héréditaires** attribuables aux rayonnements. Ce modèle dose-effet est généralement connu sous le nom de « **linéaire sans seuil** » (LNT). »

« [...] la Commission [...] considère que l'adoption du modèle LNT [...] fournit **une base prudente pour les besoins pratiques de la protection radiologique**, à savoir la gestion des risques en rapport avec l'exposition à de faibles doses de rayonnement. »

Historique de l'épidémiologie sur les effets des radiations

1950

Médecins **radiologues** (1900-1930)

Peintres de cadrans lumineux, radium (1910-1930)

Irradiations médicales pour affections non malignes, radiodiagnostic (1920-1940)

Survivants des bombes atomiques de **Hiroshima-Nagasaki** (1945)

1960

Mineurs d'uranium (1940-1990)

1970

Populations exposées aux retombées d'**essais atomiques** (1950-1990)

Travailleurs de l'**industrie du nucléaire** (1950-)

1980

Populations exposées aux **rayonnements naturels**

1990

Populations exposées aux retombées de l'accident de **Tchernobyl** (1986)

2010

Enfants exposés aux **scanners**, visée diagnostique (1980-)

Populations exposées aux retombées de l'accident de **Fukushima** (2011)

Contexte

- Dès la fin des années 80, des études internationales sur les travailleurs de l'industrie nucléaire ont été mises en place :

1995	Etude 3-pays	Canada, UK, USA
2005	Etude 15-pays	Australie, Belgique, Canada, Corée du Sud, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Japon, Lituanie, Slovaquie, Suède, Suisse, UK, USA
2015	INWORKS	France, UK, USA

- Objectif de ces études : étudier le risque de cancers et de maladies non cancéreuses après des expositions répétées à de faibles doses de RI délivrées à faibles débits de dose sur de longues périodes
 - ❑ *Quelle est la **relation dose-risque** entre les doses cumulées par les travailleurs du nucléaire et la mortalité par cancer solide et par leucémie ?*
 - ❑ *Les relations dose-risque observées chez les travailleurs sont-elles **cohérentes avec** celles observées chez les survivants de **Hiroshima et Nagasaki** ?*
 - ❑ *Quel est l'**apport** de ces résultats par rapport au **système de radioprotection actuel** ?*

INWORKS - International Nuclear Workers Study



US combinée
n = 101 363



UK NRRW
n = 147 872



Cohorte nationale
n = 60 697

- CEA civil
- Orano
- EDF

309 932 travailleurs embauchés au moins un an et surveillés pour une exposition externe aux rayonnements ionisants (dosimètres)



International Agency for Research on Cancer
Centre International de Recherche sur le Cancer

Durée moyenne de suivi	34 ans
Age moyen en fin du suivi	66 ans
Nombre total d'années de suivi (millions)	10,7
Dose cumulée moyenne au côlon (Hp10, exposés)	21 mGy
Nombre total de décès	103 553
- <i>Cancers solides</i>	28 089
- <i>Leucémies (hors leucémies lymphoïdes chroniques)</i>	771

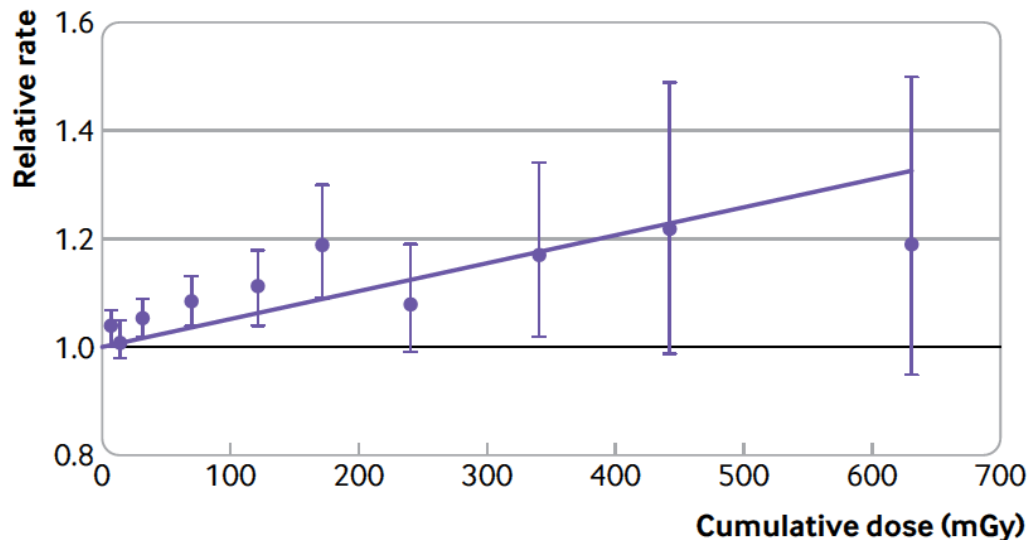



Public Health
England

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

INWORKS : relation dose-risque

Taux relatif de mortalité due à un cancer solide par catégories de doses cumulées au côlon



$ERR/Gy = 0,52 [0,27 ; 0,77]$

Relation toujours significative
lorsque la gamme de doses est
restreinte à < 50 mGy

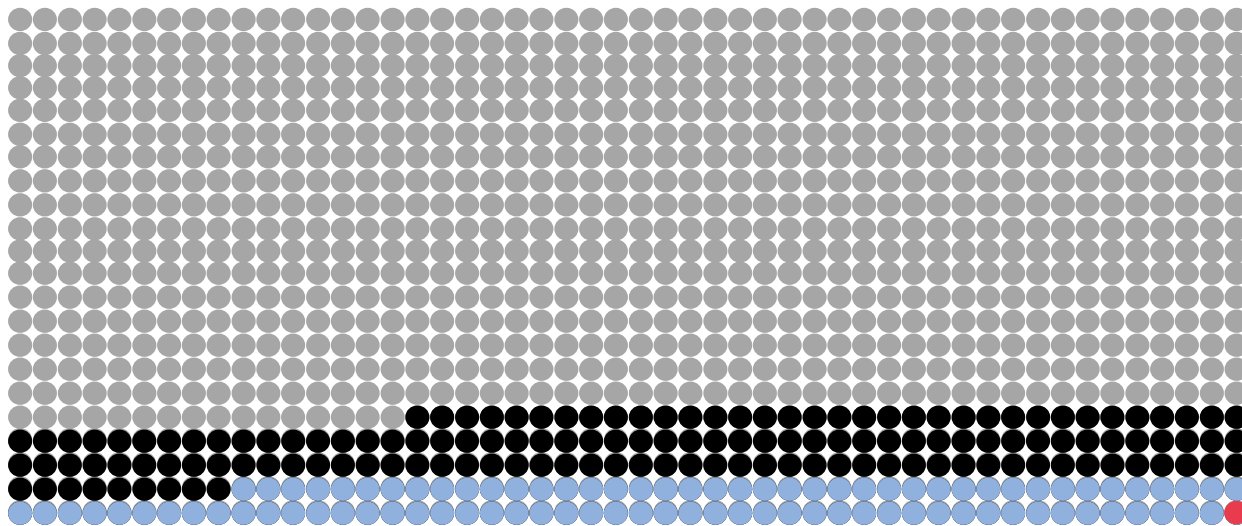
Les barres indiquent les intervalles de confiance à 90 % et la droite représente le modèle linéaire ajusté pour la variation du risque relatif de mortalité par cancer solide en fonction de la dose ; Lag de 10 ans ; Stratification : pays, âge, sexe, cohorte de naissance, statut socio-économique, durée d'emploi, statut de la surveillance neutron.

[Richardson et al. BMJ 2023]

<https://www.bmj.com/content/382/bmj-2022-074520>

INWORKS : ordre de grandeur du risque attribuable

Sur 1 000 travailleurs



334 décès (toutes causes)

dont 91 par cancer solide

dont 1 attribuable à l'exposition aux rayonnements ionisants

(Basé sur la cohorte INWORKS : 309 932 travailleurs suivis pendant 35 ans, 66 ans d'âge moyen en fin du suivi)

[Richardson et al. BMJ 2023]

INWORKS : discussion

■ Principaux résultats [Leuraud et al. Lancet Haematol 2015/2024 ; Richardson et al. BMJ 2015/2023]

- **Relation dose-risque significative** pour la mortalité par cancer solide et leucémie associée à une **exposition externe répétée** aux rayonnements ionisants

Cancers solides :

La relation reste **significative** quand on considère uniquement les doses comprises **entre 0 et 50 mGy**

→ Gain de puissance statistique par rapport aux premières analyses d'INWORKS publiées en 2015 (0-100 mGy)

Leucémies non lymphoïdes chroniques :

La relation reste **significative** quand on considère uniquement les doses comprises **entre 0 et 300 mGy**

- Les **risques attribuables** estimés sont **faibles** : environ 1 % des cancers observés

■ Comparaison avec la Life Span Study (LSS)

- Coefficients de risque **compatibles** avec ceux dérivés des survivants des bombardements atomiques
 - Consolidant l'une des hypothèses sous-jacentes au système de radioprotection actuel qui est l'extrapolation du modèle dérivé de la LSS vers des populations exposées de façon répétée à de faibles doses
 - Suggérant un faible impact du débit de dose

➡ Consolidation des résultats publiés en 2015, nouvelles informations, nouvelles questions

Conclusion : risque de cancer et exposition aux rayonnements ionisants à faibles doses

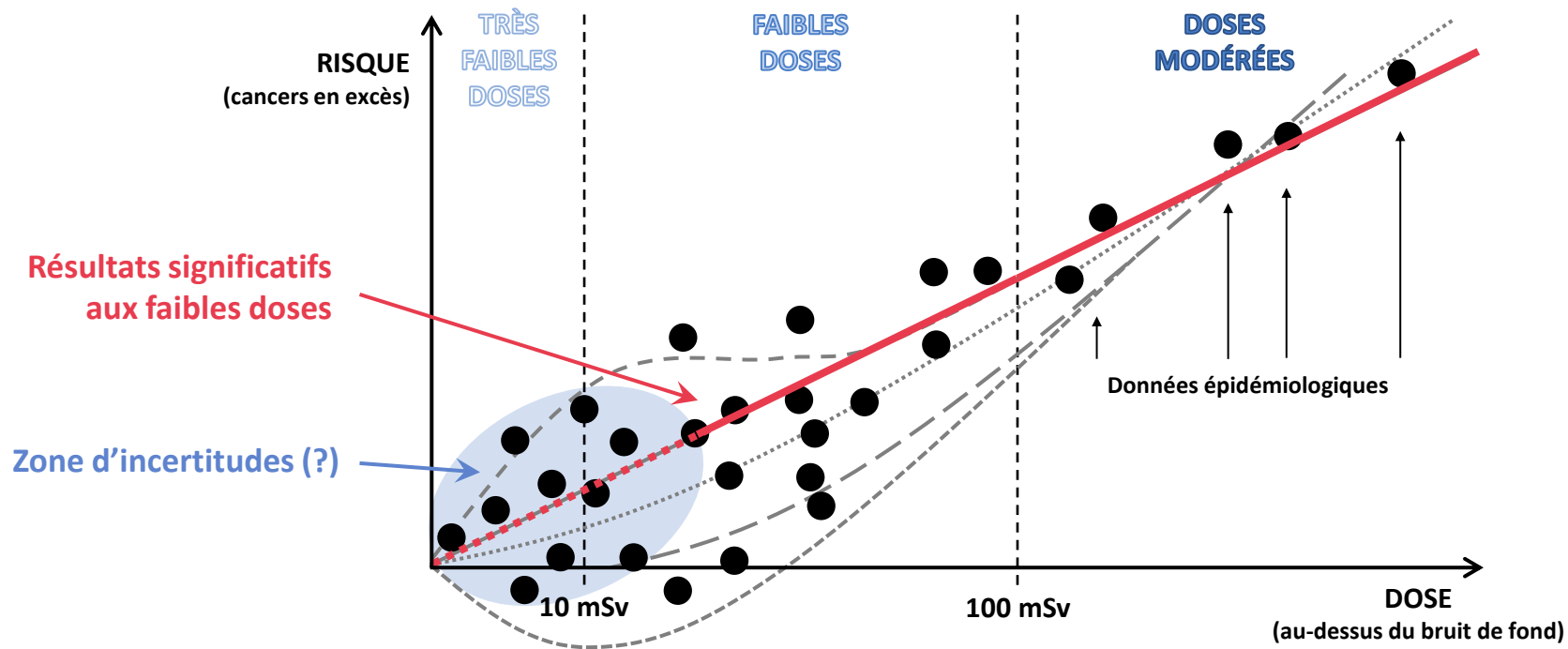
■ Ces 2 dernières décennies, nette **amélioration des connaissances** en ce qui concerne les **risques de cancer** associés aux **faibles doses**

- ❑ Preuves d'un excès de risque de certains cancers à la suite d'une exposition à de faibles doses de rayonnements
- ❑ Preuves d'un risque accru de cancer en cas de doses répétées ou prolongées
- ❑ Absence d'éléments cohérents permettant de déterminer un seuil pour le risque de cancer
- ❑ Une dose faible entraîne un accroissement de risque faible
 - Pour les très faibles doses, le **risque radio-induit** est donc encore **+ faible** et **+ difficilement discernable**, dû à de nombreux autres facteurs de risque environnementaux

■ **Persistance de lacunes** de connaissances et d'**incertitudes**

■ Les études sur les **faibles doses** sont difficiles à concevoir, à mener et à interpréter de manière sûre

Observations épidémiologiques aux faibles doses : relation dose-risque



Discussion sur les risques de cancer aux faibles doses de RI

Connaissances scientifiques - épidémiologie

Ce que l'on sait

- **Consensus** sur l'existence d'une **relation dose-risque au-delà de 100 mSv**
- De + en + de résultats montrent l'existence d'une relation dose-risque à **100 mSv et en-dessous**
- Il n'y a **pas de mise en évidence d'un seuil de dose**

Ce que l'on ne sait pas

- La **forme de la relation** dose-risque aux faibles doses n'est **pas connue** : pas de preuve solide contre la **linéarité** dans l'ensemble, bien que certains sites cancéreux présentent une courbure de la relation dose-risque
- L'**absence d'un seuil de dose** aux très faibles doses n'est **pas démontrée**

Ce que l'on pense

Radiobiologie / épidémiologie

- Le **seuil de dose, s'il existe**, serait inférieur à **quelques dizaines de mSv**
- Les données disponibles ne remettent pas en cause l'utilisation d'un **modèle LNT pour estimer le risque de cancer** associé à l'exposition aux RI

Radioprotection → Gestion du risque

- L'utilisation d'un **modèle LNT** semble être un choix **raisonnable et prudent** (au sens éthique du terme), et **pas** particulièrement **conservateur**
- D'un point de vue pragmatique, aucun autre modèle dose-risque ne semble plus approprié ou justifiable à des fins de radioprotection
- Selon le détriment radiologique, une dose efficace de **10 µSv/an** correspondrait à un **risque** de cancer fatal **inférieur à 1 cas pour un million** de personnes par an

[Laurier et al. Radioprotection 2023]

EFFETS SANITAIRES ATTRIBUABLES AUX FAIBLES DOSES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

Synthèse des connaissances actuelles sur les risques sanitaires des faibles doses de rayonnements ionisants.
Réponse à l'Action TFA.10 du PNGMDR 2022-2026. **Rapport IRSN n°2024-00203.** Mars 2024.



Laurier D, Cléro E, Demoury C, Lauzon A, Lecomte JF. *Chapitre 31 « Rayonnements ionisants ». Environnement et santé publique. Fondements et pratiques, 2e édition.* Presses de l'EHESP. 2023.

Laurier D, Billarand Y, Klokov D, Leuraud K. *Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection.* Radioprotection. 2023; 58(4): 243-260.