

CENTRE D'ETUDE SUR L'EVALUATION  
DE LA PROTECTION DANS LE DOMAINE NUCLEAIRE



**RAPPORT N° 276**

**PROPOSITION D'UNE  
ECHELLE DE CLASSEMENT DES INCIDENTS  
ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES**

---

*Pascal CROÛAIL, Christian LEFAURE*

**Version Février 2003**

**Contrat DGSNR 02/2/43/0002**

SIEGE SOCIAL ET ADMINISTRATIF :

ROUTE DU PANORAMA BP 48 F-92263 FONTENAY AUX ROSES CEDEX

TEL : +33 1 58 35 74 67 FAX : +33 1 40 84 90 34

E-MAIL : [sec@cepn.asso.fr](mailto:sec@cepn.asso.fr) WEB : <http://www.cepn.asso.fr/>

ASSOCIATION DECLAREE CONFORMEMENT A LA LOI DU 1 JUILLET 1901 SIRET : 310 071 477 00031 N° DE TVA : FR60310071477



## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier nos collègues du CEPN pour leur collaboration à l'élaboration de ce rapport, en particulier J. LOCHARD, C. SCHIEBER et JP. DEGRANGE pour leurs conseils et apports méthodologiques, ainsi que D. COLLIN pour sa participation à la rédaction des Annexes du présent rapport.

Nos remerciements vont également aux membres du Groupe de Travail de la DGSNR "Définitions des critères incidents de radioprotection" pour les remarques qu'ils nous ont faites lors de nos réunions de travail et dont nous espérons avoir tenu compte le plus fidèlement possible.



## SOMMAIRE

<b>RESUME</b>	<b>1</b>
<b>1. OBJECTIFS D'UNE ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES</b>	<b>3</b>
<b>2. EVENEMENTS PRIS EN COMPTE PAR L'ECHELLE</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Situations d'exposition non couvertes par l'échelle proposée</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Situations d'exposition couvertes par l'échelle proposée</b>	<b>7</b>
<b>3. POSITIONNEMENT DE L'ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES PAR RAPPORT A L'ECHELLE INES</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Insuffisances de l'échelle INES pour prendre en compte les incidents de radioprotection</b>	<b>9</b>
3.1.1. Inadaptation de la distinction hors site/sur site en dehors du contexte nucléaire et dans le domaine de la radioprotection en général	11
3.1.2. Insuffisances et incohérences de l'échelle INES en matière de radioprotection pour les "impacts hors site"	11
3.1.3. Insuffisances de l'échelle INES en matière de radioprotection pour les "impacts sur site"	12
3.1.4. Incohérences de l'échelle INES en matière de radioprotection entre les "impacts hors site" et les "impacts sur site"	13
3.1.5. Conclusion	13
<b>3.2. Compatibilité de l'échelle proposée avec l'échelle INES</b>	<b>14</b>
<b>4. L'ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES</b>	<b>15</b>
<b>5. METHODE DE CLASSEMENT DE LA GRAVITE D'UN EVENEMENT EN FONCTION DU RISQUE RADIOLOGIQUE INDIVIDUEL POUR UN MEMBRE DU PUBLIC</b>	<b>17</b>
<b>5.1. Introduction</b>	<b>17</b>
<b>5.2. Critères de classement pour les effets stochastiques</b>	<b>17</b>
<b>5.3. Critères de classement pour les effets déterministes létaux</b>	<b>19</b>
<b>5.4. Pondération pour les effets déterministes non létaux</b>	<b>21</b>

<b>6.</b>	<b>PONDERATION DE LA GRAVITE EN FONCTION D'AUTRES CRITERES</b>	<b>23</b>
6.1.	Exposition d'un travailleur	23
6.2.	Exposition collective	25
6.3.	Expositions combinées (membres du public + travailleurs)	25
6.4.	Expositions internes	25
6.5.	Expositions potentielles	26
6.6.	Dépassement de limites autres que les limites d'exposition	26
6.7.	Défaut de culture radioprotection	26
<b>7.</b>	<b>EXEMPLES</b>	<b>27</b>
7.1.	Exemples d'événements de niveau 0 (écarts)	27
7.2.	Exemples d'événements classés au niveau 1 (anomalies)	28
7.3.	Exemples d'événements classés aux niveaux 2 et 3 (incidents, incidents graves)	28
7.4.	Exemples d'événements classés aux niveaux 4 à 6 (accidents, accidents graves)	30
7.5.	Exemples d'événement classés au niveau 7 (accidents majeurs)	32
	<b>ANNEXES</b>	<b>33</b>
<u>Annexe 1</u> :	Méthode et outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition des effets stochastiques en fonction de la dose, du débit de dose, des organes exposés, de l'âge à l'exposition et du sexe	
<u>Annexe 2</u> :	Méthode et outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition des effets déterministes en fonction de la dose et du débit de dose (Modèle du NRPB 1996)	

**LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES**

<b>Tableau 1.</b>	<b>Critères liés à la radioprotection existant dans l'échelle INES</b>	<b>10</b>
<b>Figure 1.</b>	<b>Echelle de communication sur les incidents et accidents radiologiques</b>	<b>15</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>Détermination de l'indice de gravité pour les effets stochastiques (cas des expositions des membres du public)</b>	<b>19</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>Détermination de l'indice de gravité pour les effets déterministes létaux (cas des expositions des membres du public)</b>	<b>21</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>Détermination de l'indice de gravité (cas des expositions des travailleurs)</b>	<b>24</b>





## RESUME

L'échelle proposée dans le présent rapport est une échelle de communication sur la gravité des événements incidentels et accidentels relatifs à l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Comme l'échelle INES<sup>1</sup>, cette échelle est dotée de huit niveaux de classement de ces événements et utilise les mêmes qualificatifs (accident, incident, anomalie, grave, majeur) à des fins de communication avec le public et les médias.

En matière de radioprotection, la gravité d'un événement est considérée - pour l'individu comme étant une fonction directe du risque qu'il encoure (probabilité de développer des effets sanitaires mortels ou non) suite à une exposition incidentelle ou accidentelle aux rayonnements ionisants, - pour la société, cette gravité intègre d'autres facteurs.

L'échelle de gravité proposée s'appuie donc sur l'évaluation du risque radiologique individuel. Un indice de gravité correspondant à une exposition incidentelle ou accidentelle d'un individu du public est déterminé à partir de concepts et méthodes d'évaluation du risque issus du consensus international en matière de relations doses/effets, tant pour les effets stochastiques que pour les effets déterministes.

La gravité de toutes les situations d'exposition possibles, - exposition d'un travailleur, - exposition collective, - exposition potentielle... est déterminée en utilisant un système de pondérations par rapport aux situations qui impliquent une personne du public.

Dans cette échelle, pour communiquer sur la gravité d'un événement, il est proposé de retenir le niveau de gravité le plus pénalisant, si l'on compare :

- la gravité liée à la probabilité d'apparition d'effets déterministes et la gravité liée à la probabilité d'apparition d'effets stochastiques, lorsque l'événement induit ces deux types de risques ;

---

<sup>1</sup> The International Nuclear Event Scale (INES), User's Manual, 2001, AIEA, Vienne, 2001.

- la gravité pour des personnes du public et la gravité pour les travailleurs exposés, lorsque ces deux catégories de personnes sont concernées ;
- la gravité sur l'échelle de radioprotection proposée et celle obtenue par l'utilisation de l'échelle INES, lorsque les dimensions radioprotection et sûreté sont présentes dans l'événement concerné.

## **1. OBJECTIFS D'UNE ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES**

Compte tenu de la grande sensibilité du public aux problèmes de radioprotection, les incidents et les accidents radiologiques font l'objet d'une couverture médiatique importante quelle que soit leur gravité réelle. Il est donc indispensable pour les autorités de radioprotection de disposer d'un outil simple et rapide de communication avec le public qui permette de mettre en perspective les différents incidents et accidents radiologiques en fonction de leur gravité relative.

En matière de protection de l'homme, la gravité d'un événement est une fonction directe du risque encouru par l'individu (probabilité de développer des effets sanitaires mortels ou non) suite à une exposition incidentelle ou accidentelle aux rayonnements ionisants.

Il s'agit donc de proposer un outil qui permette aux experts de prendre en compte ce risque dans ses diverses dimensions et de lui attribuer rapidement un degré de gravité, puis de rendre "lisible" par les médias et le grand public l'estimation quantitative de ce risque en utilisant des termes qualitatifs connus issus du langage courant (accident - incident - grave - majeur...)<sup>2</sup>.

L'objectif n'est pas de communiquer de façon pédagogique sur le risque radiologique en général pour le mettre en perspective avec d'autres risques de la vie courante (tabac, SIDA...).

Pour être efficace, un tel outil doit être non seulement compréhensible et rapide d'utilisation, mais aussi acceptable par les différentes "parties prenantes". Il s'agit, autant que faire se peut, d'éviter les messages diffus et contradictoires.

Pour être crédible, l'outil doit s'appuyer pour l'évaluation de la gravité des incidents ou accidents sur le consensus international en matière de connaissances et d'hypothèses sur les effets sanitaires des rayonnements ionisants et sur les relations doses-effets retenues pour gérer le risque radiologique.

---

<sup>2</sup> Ces termes sont ceux utilisés dans l'échelle INES

Pour être réactif, l'outil doit s'appuyer sur un système permettant de classer un événement très simplement à l'aide de techniques d'évaluation disponibles (logiciels, abaques, synthétisant l'état de l'art en matière de relations doses-effets...).

Pour être compréhensible, l'outil ne doit pas utiliser pour la communication un discours trop technique : il est très difficile pour le grand public de comprendre un discours utilisant le système officiel des unités de doses qui est complexe et très mal connu, d'appréhender la différence entre effets stochastiques ou déterministes et de situer la gravité des événements à partir des relations entre le type de rayonnement, les niveaux d'exposition et les effets.

De plus, l'outil doit aussi permettre de communiquer sur un champ très large d'événements "possibles" correspondant à différents types d'expositions (expositions internes, externes, ...), qui aboutissent à une très grande plage de doses (plus de dix ordres de grandeur !), pouvant être reçues par différents types de populations (travailleurs, public, patients), dans des secteurs d'activités très variables (industriel non électronucléaire, domaine médical, domaine nucléaire).

Un outil de communication est d'ores et déjà utilisé par de nombreuses autorités réglementaires pour des incidents et accidents qui ont une dimension radiologique, il s'agit de l'échelle INES<sup>3</sup>, mais sa pertinence en matière de radioprotection est largement discutée. Suite à une étude bibliographique des échelles de gravité<sup>4</sup>, il est cependant apparu souhaitable de retenir pour un même événement une échelle de communication unique (en nombre de degrés de gravité et en qualificatifs) et plusieurs critères de classification : sûreté nucléaire, radioprotection de l'homme... Chaque événement est classé par les experts sur le ou les critères pertinents au vu de l'événement et le degré de gravité retenu pour la communication correspond à celui du critère le plus pénalisant.

---

<sup>3</sup> L'échelle INES a été conçue essentiellement pour communiquer sur la gravité des événements en matière de sûreté nucléaire ; elle intègre des éléments d'expositions individuelles, mais l'utilisation de cette échelle avec son mode de classification n'est pas satisfaisante en matière de radioprotection (voir chapitre 3 infra).

<sup>4</sup> Cette étude intitulée « Les échelles de gravité : synthèse bibliographique » (D. Rittore, P. Croüail, C. Lefaure. Note CEPN 99/17, décembre 1999) a montré que lorsqu'un événement peut être classé sur plusieurs critères, la communication consiste le plus souvent à attribuer à l'événement la gravité du critère le plus pénalisant. Ainsi sur l'échelle de pollution atmosphérique ATMO, la pollution est quantifiée pour plusieurs polluants : dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, ozone, particules fines... Le polluant qui est jugé le plus sévèrement détermine le degré de gravité de l'événement qui est communiqué au public. Cette même règle est appliquée pour l'échelle de gravité des accidents industriels développée dans le cadre de la Directive Séveso par le Ministère de l'Environnement.

Dans une optique de communication sur des événements qui impliquent plusieurs types de risques (radiologiques et non radiologiques), la démarche adoptée doit pouvoir être généralisable et non spécifique au risque radiologique. Ainsi, dans un événement impliquant l'exposition à des toxiques chimiques et à des rayonnements ionisants, la probabilité de développer des effets sanitaires peut être liée à l'une et l'autre des expositions. Lorsque des relations expositions-risques sont disponibles pour les toxiques chimiques, une classification sur d'autres critères est possible et permet de communiquer sur l'ensemble de ces risques, en retenant à nouveau le critère le plus pénalisant.

Le présent rapport ne concerne que l'évaluation du critère radioprotection de l'homme : la radioprotection de l'environnement ou la protection contre d'autres polluants ou toxiques, par exemple, n'y est pas étudiée.

Enfin, trois autres objectifs ont été fixés à l'outil :

- Prendre en compte, le nombre d'individus exposés lors de l'incident ou de l'accident.
- "Pointer" les événements témoignant d'un défaut de culture radioprotection, et les événements dus à des infractions à la réglementation en vigueur.
- Estimer la gravité d'un risque potentiel c'est-à-dire correspondant à des expositions qui auraient pu survenir si des individus avaient été présents ou présents plus longtemps, lors de la survenue de l'événement.



## **2. EVENEMENTS PRIS EN COMPTE PAR L'ECHELLE**

L'échelle proposée n'est valable que pour caractériser des incidents ou accidents radiologiques, appelés dans le présent rapport des événements. Il convient donc de définir avec précaution ce que l'on peut appeler événement incidentel ou accidentel. D'ores et déjà un certain nombre de situations d'exposition sont exclues de l'application de l'échelle.

### **2.1. Situations d'exposition non couvertes par l'échelle proposée**

La plupart des situations d'expositions aux rayonnements naturels sont par essence non incidentelles (exposition aux rayonnements cosmiques, exposition interne naturelle,...) et n'entrent donc pas dans le champ des événements d'exposition couvert par cette échelle. D'autres types d'expositions aux rayonnements naturels paraissent aussi devoir être exclus en l'état actuel des pratiques et des réglementations mais une évolution du cadre réglementaire pourrait donner un caractère incidentel à certaines situations : il s'agit par exemple de l'exposition au radon dans les habitations, ou des expositions naturelles dites renforcées.

Les expositions professionnelles ou médicales "normales" (c'est-à-dire justifiées, prévues et optimisées) ou maîtrisées (cas des "interventions" par exemple) sont exclues de l'utilisation de l'échelle.

Des événements anciens (retombées dues aux essais nucléaires atmosphériques, à l'accident de Tchernobyl,...) peuvent faire l'objet d'un classement *a posteriori* avec l'échelle de gravité proposée. Les expositions résiduelles correspondantes n'entrent pas *a priori* dans le champ d'utilisation de cette échelle.

### **2.2. Situations d'exposition couvertes par l'échelle proposée**

À l'inverse des cas précédemment évoqués, tous les événements induisant des expositions de nature incidentelle ou accidentelle "ajoutées" aux expositions normales ou maîtrisées ou au bruit de fond existant, et qui interviennent dans les secteurs industriels (électronucléaire ou non) et médical, pourront faire l'objet d'une communication utilisant l'échelle proposée. Les incidents ou accidents radiologiques sur les patients font partie des situations qui devront être couvertes par l'échelle. A ce jour, un travail reste à faire avec les professions médicales pour définir précisément ce que sont ces incidents ou accidents.





### **3. POSITIONNEMENT DE L'ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES PAR RAPPORT A L'ECHELLE INES**

#### **3.1 Insuffisances de l'échelle INES pour prendre en compte les incidents de radioprotection**

L'échelle INES ("International Nuclear Event Scale") a été créée pour faciliter la communication sur les événements qui touchent à la sûreté des installations de l'industrie nucléaire et permettre leur compréhension par les médias et le public. À l'origine (mars 1990), l'échelle INES n'était donc applicable qu'aux événements survenant dans les (ou dus aux) installations nucléaires et qui concernaient la sûreté.

A l'occasion de la révision de l'échelle INES, en 1992, ses concepteurs ont introduit des critères qui permettaient aussi de situer des événements sur leur dimension de radioprotection. Plus récemment encore, en février 2001, une nouvelle version du manuel d'utilisation de l'échelle INES a été publiée par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et l'Agence de l'Energie Atomique (AEN) de l'OCDE. Depuis la refonte de 1992 et plus encore depuis cette publication de 2001, l'échelle devrait, d'après ses concepteurs, "s'appliquer à tous les événements mettant en jeu des matières radioactives (incluant le transport)". Le tableau de la page suivante synthétise les "critères" quantifiés de radioprotection permettant de classer un événement dans l'échelle INES.

L'analyse de ce tableau fait ressortir un certain nombre de difficultés d'interprétation ou de cohérence qui rendent problématique la communication avec cette échelle, dès lors que l'on se situe dans le domaine de la radioprotection. Ce sont ces limites, que nous décrivons ci-après, qui nous ont amené à proposer une rationalité différente de l'échelle INES, tout en restant le plus cohérent possible avec elle (voir 3.3 ci-dessous).

**Tableau 1. Critères liés à la radioprotection existant dans l'échelle INES**

	Critères liés à la sûreté		
	Conséquences à l'extérieur du site	Conséquences à l'intérieur du site	Dégradation de la défense en profondeur
7 Accident majeur	Rejet majeur - Effets étendus sur la santé et l'environnement <b>Pas de valeur pour la dose public</b>		
6 Accident grave	Rejet important - susceptible d'exiger l'application intégrale des contre-mesures prévues <b>Pas de valeur pour la dose public</b>		
5 Accident entraînant un risque hors du site	Rejet limité - susceptible d'exiger l'application partielle des contre-mesures prévues <b>Pas de valeur pour la dose public</b>	Endommagement grave du coeur du réacteur / des barrières radiologiques	
4 Accident n'entraînant pas de risque important hors du site	Rejet mineur - exposition du public de l'ordre des limites prescrites <b>Dose maximale reçue par le public (groupe critique) de quelques mSv ou irradiation &gt; 5 Gy (cas perte de source ou transport)</b>	Endommagement important du coeur du réacteur / des barrières radiologiques / exposition mortelle d'un travailleur <b>Irradiation &gt; 5 Gy d'un ou plusieurs travailleurs</b>	
3 Incident grave	Très faible rejet - exposition du public représentant une fraction des limites prescrites <b>Dose maximale reçue par le public (groupe critique) de quelques dixièmes de mSv ou irradiation de l'ordre de 1 Gy (cas perte de source ou transport)</b>	Contamination grave / effets aigus sur la santé d'un travailleur <b>Irradiation globale de un ou plusieurs travailleurs de l'ordre de 1 Gy Irradiations superficielles du corps de un ou plusieurs travailleurs de l'ordre de 10 Gy</b>	Accident évité de peu - perte de barrières
2 Incident		Dissémination de contamination Importante : Débit de dose > 50 mSv/h (à 1m) <b>Dose à un travailleur supérieure à la limite réglementaire annuelle (Dose efficace &gt; 20 mSv)</b>	Incidents assortis de défaillances importantes des dispositions de sûreté
1 Anomalie			Anomalie sortant du régime de fonctionnement autorisé
0 Evénements en dessous de l'échelle - Ecart	Aucune importance du point de vue de la sûreté		
Evénements hors échelle	Aucune pertinence du point de vue de la sûreté		

### 3.1.1. Inadaptation de la distinction hors site/sur site en dehors du contexte nucléaire et dans le domaine de la radioprotection en général

L'échelle INES distingue les événements "hors du site" (seuls susceptibles de conduire à des niveaux accidentels supérieurs à 4) des effets "sur site". Cette distinction est particulièrement difficile à faire pour de nombreuses installations industrielles non nucléaires et médicales, pour lesquelles il n'y a pas de "zone d'exclusion" des populations. Des membres du public susceptibles d'être exposés aux rayonnements ionisants en conditions incidentelles ou accidentelles, vivent ou travaillent à proximité, voire même à l'intérieur de ces installations. La distinction "hors site/sur site" qui est particulièrement bien adaptée à la sûreté nucléaire, n'est donc pas pertinente dans ces cas. En s'appuyant sur le système de radioprotection et la réglementation qui en est issue, il paraît beaucoup plus intéressant de distinguer le type de personnes exposées (membres du public ou travailleurs) que le lieu d'occurrence de l'incident.

### 3.1.2. Insuffisances et incohérences de l'échelle INES en matière de radioprotection pour les « impacts hors site »

L'échelle INES prévoit pour les conséquences hors site des niveaux de gravité supérieurs à 3 (c'est-à-dire qualifiés au moins d'"incidents graves"), cela est encore une fois tout à fait justifié en matière de sûreté puisqu'il y a une perte de confinement de matières nucléaires qui sortent de l'installation. Mais la volonté de vouloir mettre des critères radioprotection sur la même échelle conduit à surévaluer ou sous évaluer la gravité des incidents radiologiques et à amalgamer des incidents qui sur le plan de la radioprotection sont totalement différents.

Ainsi :

- Sont qualifiés d'incidents graves (niveau 3) des incidents qui conduisent à une dose supérieure à quelques dixièmes de millisieverts pour le groupe critique (pour un incident avec rejet) ; sont qualifiés d'accidents (niveau 4) des événements qui conduisent à une dose supérieure à quelques millisieverts pour le groupe critique (pour un incident avec rejet). Ces incidents correspondent à une probabilité d'occurrence, sur la vie entière, d'un décès par cancer radio-induit respectivement de l'ordre de  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$ ,
- Sont qualifiés d'incidents graves (niveau 3) des incidents qui conduisent à une irradiation globale ("corps entier") supérieure à 1 gray (dans le cas d'exposition à

une source perdue ou à un accident de transport de matières radioactives) ; sont qualifiés d'accidents (niveau 4) des événements qui conduisent à une irradiation globale supérieure à 5 grays (dans le cas d'exposition à une source perdue ou à un accident de transport de matières radioactives). Ces incidents correspondent respectivement à une forte probabilité d'apparition d'un effet déterministe non léthal et à une dose semi-létale (c'est-à-dire que 50% des personnes irradiées à un tel niveau meurent dans les 30 jours).

*Du point de vue de la radioprotection, on ne peut guère justifier que des niveaux de dose - et donc de risque - aussi différents (près de quatre ordres de grandeur les séparent !) soient placés aux mêmes niveaux de gravité sur une échelle de communication. Dans ce cas, l'utilisation de l'échelle INES induit une communication incohérente.*

- Sont inclassables (en dehors du cas des rejets) et amalgamés en dessous du niveau 3 tous les événements qui conduisent à des doses inférieures à 1 Gy reçues par des membres du public.

*Or, les événements occasionnant des doses inférieures à 1 Gy sont les plus probables. L'échelle INES ne permet donc pas de les caractériser et de communiquer de façon pertinente sur la gravité des incidents qui sont les plus fréquents.*

### 3.1.3. Insuffisances de l'échelle INES en matière de radioprotection pour les « impacts sur site »

Les événements ayant un « impact sur site » peuvent, quant à eux, être classés aux niveaux 2, 3, 4 et 5 sur l'échelle INES. Cependant, les critères de radioprotection ne permettent de situer des événements qu'aux niveaux 2, 3 et 4. Ces critères ne concernent que l'exposition des travailleurs. On peut ainsi distinguer :

- les doses supérieures à la limite annuelle réglementaire - incident de niveau 2 - (la valeur de 50 mSv était en vigueur en 1992),
- l'irradiation globale "de un ou plusieurs travailleurs" à une dose supérieure à 1 Gy (effets déterministes non létaux probables) ou à 10 Gy dans le cas d'une irradiation superficielle du corps - incident grave de niveau 3 - et,
- l'irradiation de un ou plusieurs travailleurs à une dose semi-létale (supérieure à 5 Gy) - accident de niveau 4 -.

La plupart des autres critères sont qualitatifs (“endommagement des barrières radiologiques”, “dissémination de contamination”, “effets aigus sur la santé”) et peuvent conduire à des différences d’interprétation et de classement pour des incidents ou accidents aux conséquences sanitaires pourtant similaires.

Certes, les amalgames sont moins flagrants que dans le cas de l’exposition du public, et l’on peut envisager de situer des événements conduisant à des doses inférieures à la limite annuelle de dose des travailleurs sur des niveaux de gravité inférieurs à 2 de l’échelle, sans remettre en cause la logique d’INES. Par contre il est illogique du point de vue du risque radiologique de retrouver au même niveau de gravité toutes les expositions comprises entre la limite annuelle d’exposition et 1 Gy.

#### 3.1.4. Incohérences de l’échelle INES en matière de radioprotection entre les « impacts hors site » et les « impacts sur site »

La possibilité que des membres du public soient exposés lors d’événements « sur site » n’est pas envisageable avec l’échelle INES, pas plus que n’est envisageable la possibilité que des travailleurs soient exposés « hors site ». Or de nombreux incidents concernent à la fois le public et des travailleurs.

Enfin, il faut souligner que l’échelle INES classe au même niveau, c’est-à-dire accident de niveau 4, l’exposition mortelle d’un travailleur (ou l’exposition semi-létale de plusieurs d’entre eux) et une dose de quelques millisieverts qui serait reçue par un ou plusieurs membre(s) du groupe critique de la population. Par définition, au cours d’un tel événement, la dose reçue par le reste de cette population est encore inférieure d’un ordre de grandeur, soit quelques dixièmes de millisieverts. Du point de vue des risques pour la santé des individus, et sur le plan de l’acceptation sociale, il est pourtant bien évident que ces deux événements sont sans commune mesure. En termes de radioprotection, il est donc inacceptable de les mettre au même niveau de gravité.

#### 3.1.5. Conclusion

Compte tenu des divers éléments évoqués précédemment, il apparaît que l’échelle INES est très difficile - voire impossible - à utiliser comme outil de communication avec le public et les médias sur les incidents et accidents de radioprotection hors du domaine électronucléaire, voire dans le domaine électronucléaire dès lors que la sûreté n’est pas en jeu.

### 3.2. Compatibilité de l'échelle proposée avec l'échelle INES

Malgré les difficultés exposées au §3.1. sur une utilisation telle quelle de l'échelle INES, force est de constater qu'elle répond assez bien à certains critères qui sont nécessaires pour faciliter la compréhension par le public et les médias - qui l'ont "adoptée" - d'événements touchant les installations nucléaires. Il est donc apparu très important de ne pas multiplier les outils de communication et de respecter, autant que faire se peut, la même logique que l'échelle INES pour hiérarchiser les événements touchant à la radioprotection.

Pour assurer une certaine compatibilité entre les deux systèmes d'évaluation, et garder ainsi un fort pouvoir communicant au système proposé, le parti a été pris de conserver certaines des propriétés de l'échelle INES, en particulier :

- Recours à **8 niveaux de gravité numérotés de 0 à 7** : il est apparu fondamental d'utiliser un système de classement des événements de radioprotection ayant le même nombre d'échelons que le système INES, pour ne pas apporter un élément de confusion supplémentaire, qui irait dans le sens contraire de l'objectif escompté.
- Utilisation de la **même terminologie dans la qualification des événements** : ainsi, comme dans l'échelle INES, au terme "incident" sont associés les événements classés à un niveau supérieur ou égal à 1. Au terme "accident" sont associés les niveaux supérieurs ou égal à 4. Les événements de niveau 0 sont qualifiés comme étant des "écarts".
- Correspondance du **niveau 2 avec tout dépassement des limites réglementaires** d'exposition aux rayonnements ionisants : ce critère qui est explicitement situé dans l'échelle INES, doit être au même niveau dans l'échelle des événements de radioprotection.

Ces propriétés communes entre les deux systèmes étant acquises, il est préconisé, à des fins de communication sur la gravité d'un événement ayant à la fois des conséquences pour la sûreté des installations et ayant entraîné des expositions des travailleurs ou du public, de retenir la valeur maximale obtenue en utilisant le système de classification INES d'une part, et l'échelle de radioprotection proposée dans ce rapport, d'autre part.

#### 4. L'ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES

La figure suivante représente l'échelle proposée pour communiquer sur la gravité des événements liés à la radioprotection des travailleurs ou du public. Le chapitre 5 décrit la méthode de positionnement d'un événement sur cette échelle de communication.

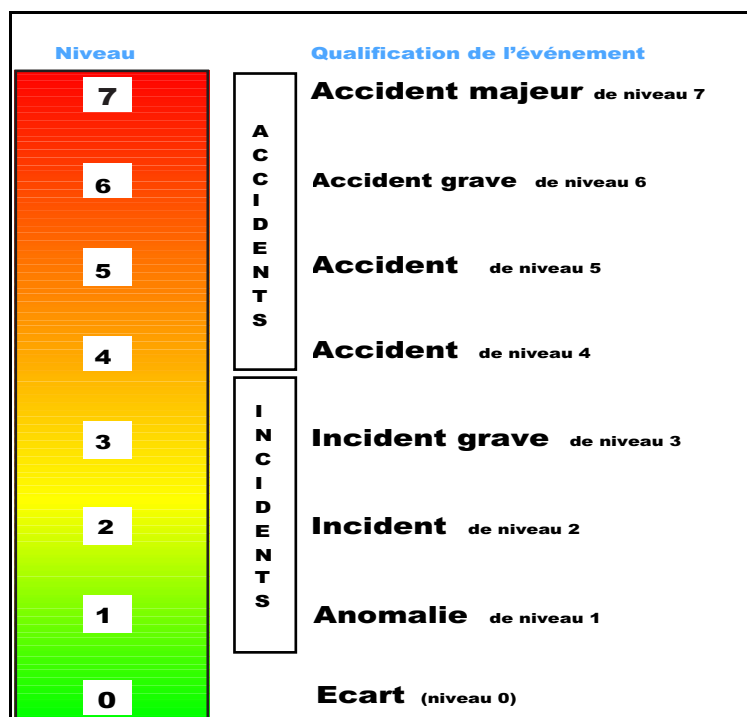


Figure 1. Echelle de communication sur les incidents et accidents radiologiques

- Un événement classé au niveau 0, est qualifié par le terme “**écart**” ; il peut être considéré sans importance du point de vue de la radioprotection .
- Les événements classés aux niveaux 1 à 3 sont des “**incidents**”.
  - un événement classé au niveau 1 est qualifié par le terme “anomalie”.
  - un événement classé au niveau 2 est qualifié par le terme “incident”.
  - un événement classé au niveau 3 est qualifié par le terme “incident grave”.
- Les événements classés aux niveaux 4 à 7 sont des “**accidents**”.
  - un événement classé au niveau 4 est qualifié par le terme “accident de niveau 4”.<sup>5</sup>
  - un événement classé au niveau 5 est qualifié par le terme “accident de niveau 5”.
  - un événement classé au niveau 6 est qualifié par le terme “accident grave”.
  - un événement classé au niveau 7 est qualifié par le terme “accident majeur”.

<sup>5</sup> La précision « de niveau 4 » est faite pour distinguer ces accidents des accidents de niveau de gravité supérieur « de niveau 5 ».





## 5. METHODE DE CLASSEMENT DE LA GRAVITE D'UN EVENEMENT EN FONCTION DU RISQUE RADIOLOGIQUE INDIVIDUEL POUR UN MEMBRE DU PUBLIC

### 5.1. Introduction

Le système proposé permet de classer les événements au cours desquels des personnes ont été exposées aux rayonnements dans des conditions incidentelles ou accidentelles.

Ce chapitre décrit la méthode de classement d'un événement touchant une personne du **public**. Tous les critères de classement des autres événements, par exemple l'exposition d'un travailleur, l'exposition de plusieurs personnes... s'y référeront en utilisant des facteurs de pondération de la gravité retenue pour une personne du public (cf. Chapitre 6). Le cas des patients sera traité ultérieurement (cf. § 2.2).

Le § 5.2. présente la méthode et les critères de classement d'un événement ayant entraîné des expositions aux rayonnements ionisants qui pourraient induire des **effets stochastiques** à moyen ou long terme sur les personnes exposées.

Le § 5.3. présente la méthode et les critères de classement d'un événement ayant entraîné des expositions aux rayonnements ionisants qui pourraient induire des **effets déterministes** à court ou moyen terme sur les personnes exposées.

### 5.2. Critères de classement pour les effets stochastiques

Le risque individuel de décès, défini par la probabilité - sur la vie entière - de développer un **cancer mortel** suite à l'exposition incidentelle ou accidentelle d'un membre du public lors de l'événement considéré, a été retenu comme critère principal permettant d'établir un **indice de gravité**<sup>6</sup>. Pour définir ce risque en fonction du niveau d'exposition, le consensus international consiste à utiliser une relation exposition-risque linéaire et sans seuil.

---

<sup>6</sup> L'Annexe 1 présente la méthode et les outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition des effets stochastiques (ici, les cancers mortels) en fonction de la dose efficace, du débit de dose, des organes exposés, de l'âge à l'exposition et du sexe de la personne exposée. Cette méthode s'appuie sur le consensus international actuel et les recommandations faites par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR).

Par définition et pour rester en cohérence avec l'échelle INES, le risque associé à la limite réglementaire d'exposition individuelle annuelle correspond à un indice de gravité de 2. En France, et dans la plupart des pays, cette limite<sup>7</sup> (somme des doses efficaces reçues par une personne du public) est de 1 millisievert par an. En l'état actuel des connaissances<sup>8</sup>, une dose efficace de un millisievert (dès lors qu'elle a été reçue dans des débits de dose inférieurs à 0,1 Gy/h) correspond (en moyenne, dans la population générale<sup>9</sup>), à une probabilité vie-entière de décès par cancer de  $5.10^{-5}$ .

Il est couramment admis (échelle de Richter, échelle de bruit...) qu'à un accroissement d'un facteur 10 d'un risque on associe un accroissement d'un niveau sur l'échelle de gravité correspondante. Les autres indices de gravité sont donc placés de part et d'autre de l'indice 2 suivant une graduation logarithmique (cf. Figure 2). Dans cette logique, l'indice de gravité 5 est atteint pour une probabilité vie-entière de décès par cancer de 5%, c'est-à-dire pour une dose efficace de l'ordre du sievert.

---

<sup>7</sup> Décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.

<sup>8</sup> Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). Publication n°60, 1990.

<sup>9</sup> Dans certains cas de figures, en particulier dès lors qu'un enfant ou un nourrisson est exposé, il est recommandé de réaliser un calcul de risque plus fin, prenant en compte l'âge et le sexe de l'individu exposé. En effet, l'utilisation de coefficients de risques moyens n'est pas adaptée à toutes les situations (cf. Annexe 1).

Risque individuel (Probabilité vie-entière de décès par cancer)	Niveau de dose indicatif pour les effets stochastiques (dose efficace, Sv)	INDICE de gravité (avant pondération)
5 %	1 Sv	5
0,5 %	100 mSv (0,1 Sv)	4
0,05 %	10 mSv (0,01 Sv)	3
5.10 <sup>-5</sup>	1 mSv (0,001 Sv) = Limite Régl.	2
5.10 <sup>-6</sup>	100 µSv (0,0001 Sv)	1
		0

Figure 2. Détermination de l'indice de gravité pour les effets stochastiques (cas des expositions des membres du public)

### 5.3. Critères de classement pour les effets déterministes létaux

Comme dans le cas précédent, le risque individuel de décès (défini par la probabilité de développer **un effet déterministe léta**<sup>10</sup> suite à l'exposition d'un membre du public, reçue lors de l'événement considéré) a été retenu comme critère principal permettant d'établir un **indice de gravité**. Les effets déterministes sont des effets à seuil, c'est-à-dire qu'en dessous d'un certain niveau d'exposition, ces effets n'apparaissent pas. Au dessus du seuil, la probabilité d'apparition de l'effet croît avec la radiosensibilité des individus. Les relations expositions-effets sont bien connues pour chaque type d'organe : au dessus

10 Exemples d'effets déterministes létaux : syndrome d'irradiation de la moelle osseuse, syndrome d'irradiation pulmonaire, syndrome gastro-intestinal, mort du fœtus.

du seuil, à chaque niveau d'exposition d'un organe, on peut associer une probabilité de développer l'effet<sup>11</sup>.

On appelle dose létale 5 ( $D_5$ ) la dose équivalente à l'organe (exprimée en gray) telle que le taux de décès dans une population uniformément exposée à une dose  $D_5$  soit égal à 5 %<sup>12</sup>. En termes de gravité, une probabilité de décès donnée est toujours aussi grave quelle que soit sa cause : aussi on attribuera l'indice de gravité 5 à 5% de risque de décéder d'un effet stochastique (dose efficace en sievert) ou 5% de risque de décéder d'un effet déterministe (dose en gray à l'organe  $D_5$ )

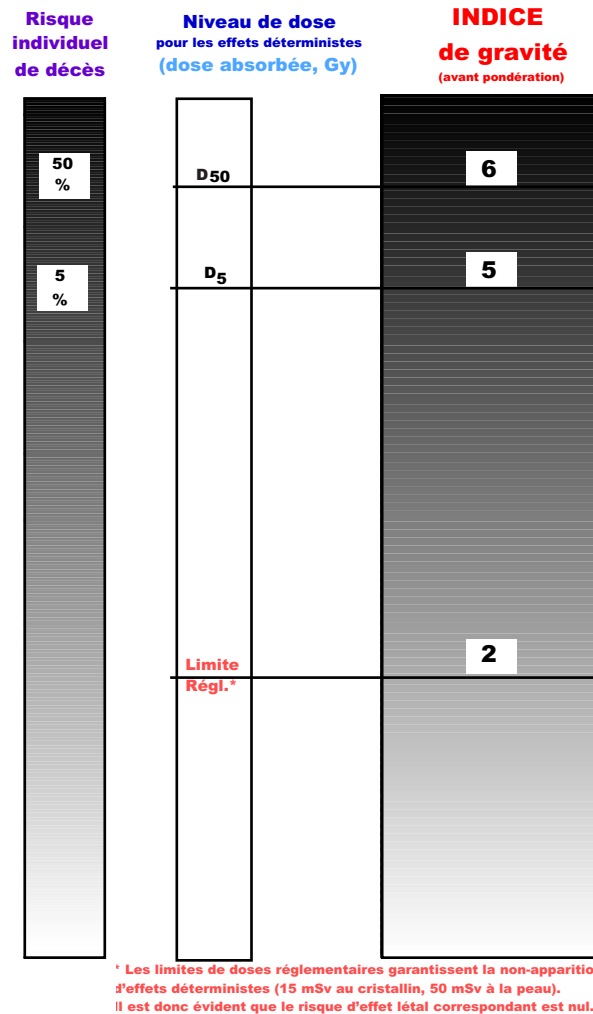
De la même façon, on attribuera à l'événement qui aura exposé un individu à une dose létale 50 ou plus ( $D_{50}$  ou plus) un indice de gravité égal à 6, puisque la gravité augmente d'un niveau lorsque le risque augmente d'un facteur dix. La figure 3 présente les indices de gravité en fonction de la probabilité d'apparition d'un effet létal.

Les niveaux de gravité proposés dans les abaques en Annexe 2 restent indicatifs : en effet, quelle que soit la dose estimée, l'observation clinique d'un effet « l'emporte » sur la probabilité d'occurrence de l'effet liée à la dose pour déterminer l'indice de gravité de l'événement. Ainsi, l'observation d'un effet létal place d'emblée l'événement à l'indice de gravité 6.

---

<sup>11</sup> L'Annexe 2 présente la méthode et les outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition des effets déterministes (létaux et non létaux) en fonction de la dose absorbée, du débit de dose, des organes ou des tissus biologiques irradiés. La méthode préconisée s'appuie sur une des publications les plus récentes dans ce domaine [NRPB, 3].

<sup>12</sup> A cette même dose correspondra donc un taux de survie de 95 %. Ce niveau de dose dépend essentiellement de l'organe ou du tissu irradié, et du débit de dose (cf. Annexe 2).



**Figure 3. Détermination de l'indice de gravité pour les effets déterministes létaux (cas des expositions des membres du public)**

#### 5.4. Pondération pour les effets déterministes non létaux

La gravité d'un événement qui peut conduire à un effet déterministe non léthal est moins importante que celle de l'événement qui peut conduire à un effet déterministe léthal.

Comme dans le cas des effets déterministes létaux, les relations exposition-risque sont bien connues. Pour chaque type d'effet, on connaît donc les doses à l'organe D<sub>5</sub> et D<sub>50</sub> qui induisent respectivement une probabilité de 5 % et de 50 % de développer l'effet.

Pour chaque événement, les abaques fournis dans l'Annexe 2 permettent de déterminer très facilement la probabilité d'apparition de l'effet sur la base de la mesure ou de l'estimation de la dose absorbée et du débit de dose.

L'indice de gravité est alors obtenu en utilisant la figure 3, puis en lui appliquant une sous-pondération qui tient compte de l'effet observé ou probable. Il convient alors de regarder si l'effet est invalidant ou non. En effet, de même que l'on peut considérer comme plus grave un effet léthal qu'un effet non léthal, on considèrera parmi ces derniers comme plus graves ceux qui sont invalidants que ceux qui ne le sont pas.

Les **effets non létaux invalidants**<sup>13</sup> sont des effets irréversibles qui donnent lieu à de fortes altérations des fonctionnalités. Ces séquelles sont invalidantes pour la personne exposée, et la pénalisent fortement dans son comportement physique, ses capacités fonctionnelles et/ou ses relations à autrui.

*L'indice de gravité pour les effets non létaux invalidants sera égal à l'indice de gravité obtenu en appliquant le système décrit au § 5.3. pour les effets déterministes létaux, puis en soustrayant 1 au résultat ainsi obtenu.*

Les **effets non létaux non invalidants**<sup>14</sup> sont des effets dont la réversibilité a généralement été observée. Il convient cependant d'être prudent avec ce type d'effet qui, dans certains cas, peuvent être des effets précurseurs à l'apparition d'autres effets beaucoup plus graves (syndrome prodromique).

*L'indice de gravité pour les effets non létaux non invalidants sera égal à l'indice de gravité obtenu en appliquant le système décrit au § 5.3. pour les effets déterministes létaux, puis en soustrayant 2 au résultat ainsi obtenu.*

---

13 Exemples d'effets non létaux invalidants (selon la classification adoptée) : arrêt provisoire ou définitif de l'ovogenèse, arrêt provisoire de la spermatogenèse, cataracte, fibrose pulmonaire, nécroses, effets tératogènes tel que le retard mental sévère ou la microcéphalie après irradiation fœtale ou embryonnaire.

14 Exemples d'effets non létaux non invalidants (selon la classification adoptée) : vomissements, diarrhées, hypothyroïdie, thyroïdite, brûlures et erythèmes.

## 6. PONDERATION DE LA GRAVITE EN FONCTION D'AUTRES CRITERES

Tous les autres événements d'exposition sont classés à partir d'un système de sur-pondérations ou sous-pondérations sur l'échelle décrite au chapitre précédent concernant les expositions incidentelles et accidentelles des membres du public.

### 6.1. Exposition d'un travailleur

Pour classer les événements ayant entraîné une exposition incidentelle ou accidentelle d'un travailleur<sup>15</sup> (c'est-à-dire non prévue, ou non anticipée au niveau des doses finalement reçues), le système proposé est équivalent mais décalé vers le bas d'un niveau d'indice par rapport à celui qui a été décrit pour classer un événement touchant un membre du public.

Compte tenu du caractère logarithmique de l'échelle proposée, cela revient à placer l'acceptabilité du risque radiologique à un niveau dix fois plus élevé pour les travailleurs que pour les personnes du public. Ce facteur dix est souvent interprété dans les études de perception des risques comme la différence entre "le risque choisi" (par le travailleur) et "le risque subi" (par le public). Cette interprétation n'est pas vraiment appropriée dans le cadre des événements incidentels ou accidentels. Néanmoins, cette logique se retrouve généralement dans la perception sociétale des risques industriels et la CIPR s'en est inspirée pour établir dans sa recommandation 26 des limites de dose annuelles de 5 mSv pour le public et de 50 mSv pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (limites réglementaires révisées depuis).

La figure 4, en page suivante, récapitule la méthode permettant d'établir l'indice de gravité d'un événement touchant un travailleur.

---

<sup>15</sup> Par « travailleur », on entend ici, une personne qui, dans le cadre normal de son activité professionnelle, est amenée à manipuler, à transporter ou à être exposée à la source radioactive à laquelle elle a été exposée lors de l'événement considéré.

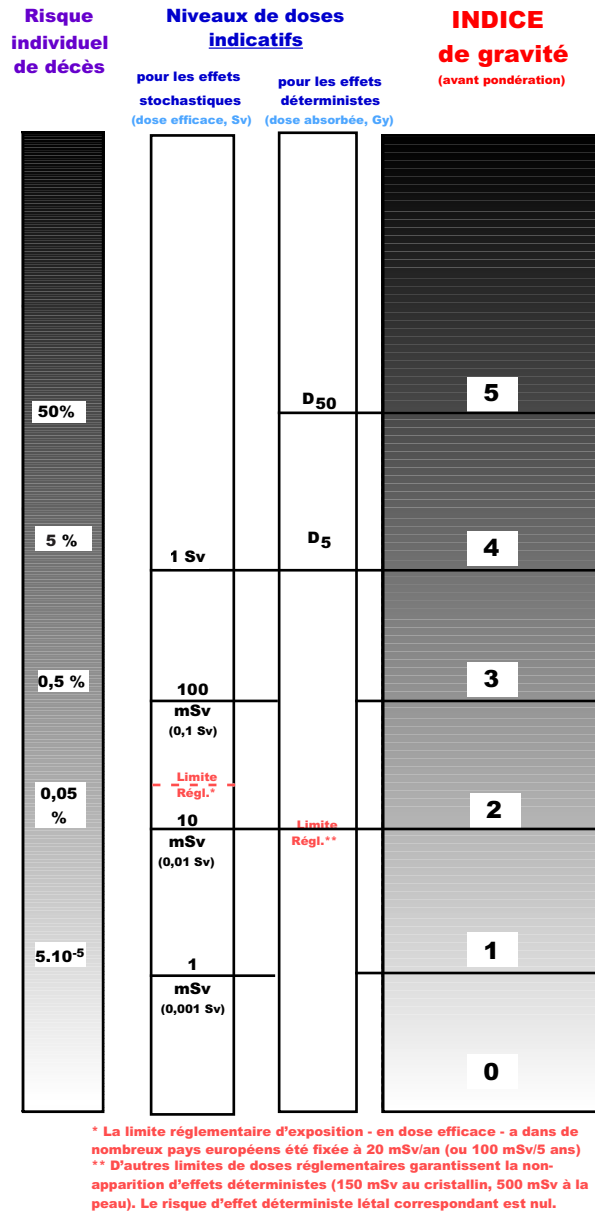


Figure 4. Détermination de l'indice de gravité (cas des expositions des travailleurs)

**Cas particulier :** Lorsque la dose reçue lors de l'événement, comprise entre 1 et 10 mSv, occasionne aussi un dépassement de la limite réglementaire annuelle (20 mSv)<sup>16</sup> compte tenu du « passé dosimétrique » du travailleur exposé, l'indice de gravité (initialement placé à 1) est porté au niveau 2. Cette pondération permet d'assurer la cohérence entre les échelles public et travailleurs d'une part, et entre le système proposé et l'échelle INES d'autre part.

<sup>16</sup> Projet de décret relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants (approuvé lors de la réunion interministérielle du 2 août 2002).



## 6.2. Exposition collective

En cas d'exposition de plusieurs individus, une sur-pondération sera appliquée en fonction du nombre de personnes exposées :

- la sur-pondération de l'indice de gravité initialement obtenu sera de 1, lorsque plus de 10 personnes auront reçu des doses situées dans la même plage de risque.
- la sur-pondération de l'indice de gravité initialement obtenu sera de 2, lorsque plus de 100 personnes auront reçu des doses situées dans la même plage de risque.

Cette sur-pondération ne sera appliquée que pour les indices de risque supérieurs ou égaux à deux (i.e. supérieurs aux limites réglementaires annuelles d'expositions). Par ailleurs, la gravité ne pourra jamais dépasser le niveau 7 (accident majeur), ce qui pourra limiter dans certains cas l'application de la règle de sur-pondération.

## 6.3. Expositions combinées (membres du public + travailleurs)

En cas d'exposition simultanée de personnes du public et de travailleurs, l'événement sera classé dans les deux systèmes d'évaluation présentés ci-dessus. Les éventuelles pondérations pour prendre en compte les expositions collectives de chacun des deux types de populations seront appliquées.

L'indice de gravité maximal obtenu par les deux systèmes de classement (relatifs au public et aux travailleurs) sera utilisé à des fins de communication.

## 6.4. Expositions internes

Les expositions internes (par ingestion, inhalation, ou voie transcutanée) ne font pas l'objet d'un traitement particulier (pas de sur-pondération, par exemple). Cependant, il est difficile d'évaluer rapidement les doses internes car il faut souvent attendre les résultats des examens biologiques. Il sera donc sans doute nécessaire de faire appel à des logiciels de modélisation pour évaluer les expositions afin de classer rapidement un événement dans l'échelle proposée dans ce rapport.

## 6.5. Expositions potentielles

Certains événements, qui n'ont pas donné lieu à des expositions significatives, auraient pu, dans des circonstances légèrement différentes, mais tout à fait réalistes, conduire à des expositions significatives. Ces expositions sont alors appelées expositions potentielles. Si un exploitant, ou l'autorité, juge que la probabilité de se retrouver dans de telles circonstances est suffisamment élevée, il est préconisé d'évaluer les doses qui auraient ainsi pu être reçues (par calcul et utilisation de modèles appropriés) dans ces circonstances. Une fois ces doses évaluées, il est possible de leur faire correspondre un niveau de gravité avec les échelles décrites dans le chapitre 5. Mais, comme il ne s'agit pas d'expositions réelles, une sous-pondération sera alors appliquée. Celle-ci, selon les cas, pourra être de 1 ou 2 niveaux d'indice - et restera à l'appréciation de l'Autorité de Radioprotection.

Lors de la communication du niveau de gravité, il conviendra, le cas échéant, de préciser le caractère potentiel des expositions relatives à l'événement considéré.

## 6.6. Dépassement de limites autres que les limites d'exposition

Dès lors qu'une limite réglementaire autre qu'une limite d'exposition est dépassée lors d'un événement (par exemple dépassement d'une limite de contamination surfacique d'un colis ; dépassement d'une limite de débit de dose dans une zone classée,...), on appliquera une sur-pondération d'un niveau de l'indice de gravité initialement obtenu.

Cette sur-pondération interviendra pour les indices de gravité inférieurs à 2 ( $\leq 1$ ).

## 6.7. Défaut de culture radioprotection

Dès lors que l'Autorité de Radioprotection le jugera pertinent, pour un événement correspondant à un indice de gravité inférieur à 2 ( $\leq 1$ ), elle pourra le surclasser d'un indice pour défaut de culture radioprotection.

## 7. EXEMPLES

Ce chapitre décrit treize événements réels pour lesquels l'utilisation de l'échelle de radioprotection proposée dans ce rapport aboutit à des niveaux de classement couvrant l'ensemble des 7 niveaux de communication sur leur gravité.

### 7.1. Exemples d'événements de niveau 0 (écarts)

*Exemple 1. 2 septembre 2002, France. – Lors d'une intervention consistant à remplacer un groupe déprimogène par un autre, plus puissant équipant un réseau de transfert pneumatique d'échantillons radioactifs et assurant le confinement et la protection biologique des opérateurs, trois soudeurs auraient été contaminés aux pieds et aux mains après avoir ouvert un carter de filtration et déposé un filtre très haute efficacité. Ils essayaient de reprendre une soudure défectueuse en réalisant un balayage à l'argon. Les résultats médicaux pratiqués se sont révélés non significatifs.*

Catégories des personnes exposées : travailleurs

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 0

Pas de défaut de culture radioprotection mis en évidence (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 0

▣ Qualification de l'événement : **Ecart.**

*Exemple 2. 1997, France. – Dans un service de curiethérapie d'un centre hospitalier, au moment de retirer cinq fils d'iridium-192 en place sur un patient (chaque fil de 7 cm, présente une activité de 37 MBq par centimètre), on se rend compte qu'il manque un fil. Recherché dans tout l'établissement à l'aide d'un radiamètre, il est finalement retrouvé dans un sac de linge sale destiné à la blanchisserie. Une aide-soignante a probablement été irradiée au cours du changement de la taie d'oreiller du malade, à une dose très faible inférieure à 50 microsieverts.*

Catégories des personnes exposées : travailleur ou public (à définir selon les habilitations et la formation de la personne exposée aux risques encourus dans le cadre de son activité)

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 0

Pas de défaut de culture radioprotection mis en évidence (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 0

▣ Qualification de l'événement : **Ecart.**

## 7.2. Exemples d'événements classés au niveau 1 (anomalies)

*Exemple 3. 20 août 2002, France. – Détection d'un point de contamination à l'extérieur d'un conteneur de matériel faiblement radioactif expédié par une centrale nucléaire vers une autre centrale pour réutilisation. A leur arrivée dans la centrale destinataire, une contamination surfacique de 850 Bq/cm<sup>2</sup> a été mesurée, contamination qui n'avait pas été détectée à la sortie de la centrale expéditrice malgré des contrôles radiologiques effectués. Aucune contamination, ni du personnel, ni du public, n'est à regretter. On rappelle que la réglementation impose une limite de 4 Bq/cm<sup>2</sup> pour ce type de colis.*

Catégories des personnes exposées : travailleurs et peut-être des membres du public (lors du transport)

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 0

Dépassement d'une limite réglementaire de radioprotection (sur-pondération de +1)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 1

▣ Qualification de l'événement : **Anomalie de niveau 1.**

*Exemple 4. 28 août 2002, France. – Au cours d'une manipulation d'une solution de 148 MBq d'yttrium-90 contenant des impuretés de strontium-90, un opérateur, qui ne parvenait pas à terminer l'opération avec le matériel mis à sa disposition (une seringue munie d'une membrane filtrante et d'une protection biologique) a pris l'initiative d'intervenir sur l'outil et de le sortir de sa protection. Lors de la saisie manuelle de la membrane de filtration, il a reçu une dose équivalente de 147 mSv à la main gauche. On rappelle que la valeur limite réglementaire pour ce type d'exposition est de 500 mSv/an.*

Catégories des personnes exposées : travailleur

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 0

Défaut de culture radioprotection évident (sur-pondération +1)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 1

▣ Qualification de l'événement : **Anomalie de niveau 1.**

## 7.3. Exemples d'événements classés aux niveaux 2 et 3 (incidents, incidents graves)

*Exemple 5. 2001, France. – Au cours d'une expérience de cristallographie, un opérateur désinhibe les sécurités de l'appareil pour réaliser les réglages en présence du faisceau (4000 Gy/h à 40 kV et 20 mA). Un second opérateur, ignorant que l'appareil est resté sous-tension, passe rapidement sa main dans le faisceau pour avvertir l'autre d'un problème d'alignement entre celui-ci et l'échantillon étudié. La durée maximale d'exposition a été estimée à une seconde. La dose maximale (extrémités) a été estimée à 360 mSv.*

Catégories des personnes exposées : public (stagiaire)

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 2 (dépassement de la limite réglementaire du public)

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 2

▣ Qualification de l'événement : **Incident de niveau 2.**

*Exemple 6. 1995, France. - Un opérateur affecté dans une unité de dépollution d'une usine entreprend le nettoyage d'une jauge de densité des liquides de lavage devant être rejetés dans l'environnement. Malgré la signalisation des propriétés radioactives et dangereuses de l'objet (il contient une source de césium-137 de 7,4 GBq), il entreprend de démonter le container et sort la source qu'il manipule, ainsi que le tube collimateur qu'il emporte dans un autre atelier pour le nettoyer à l'air comprimé. La dose reçue à la main lors de cet accident a été estimée par l'Institut Curie, à plus de 25 Gy (occasionnant d'abord un érythème puis un œdème, et enfin une lésion avec épithélite exsudative de 5 cm de diamètre), et sa dose efficace au corps entier à près de 200 mSv.*

Catégories des personnes exposées : travailleur

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 5 (effet déterministe observé) –2 (caractère non léthal non invalidant de l'effet, jugé réversible par les médecins) = 3

Remarque. On obtient également un indice de gravité de 3 si l'on considère la dose efficace au corps entier.

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 3

▣ Qualification de l'événement : **Incident grave de niveau 3.**

*Exemple 7. 1982, France. – Lors d'un contrôle par gammagraphie, au cours de la manœuvre de rentrée de la source dans son projecteur (source scellée d'iridium-192 d'environ 850 GBq), le câble s'est désolidarisé du porte-source. Les opérateurs s'aperçoivent tardivement que la source est restée coincée dans le flexible et parviennent à la faire sortir manuellement en secouant le flexible. Le développement en urgence des dosimètres des trois agents exposés permet d'estimer la dose corps entier reçue par un des opérateurs à 155 mSv, les deux autres étant plus faiblement exposés (moins de 5 mSv). La dosimétrie biologique, effectuée par la suite, a révélé des aberrations chromosomiques et l'opérateur a développé une lymphopénie.*

Catégories des personnes exposées : travailleurs

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 3

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 3

▣ Qualification de l'événement : **Incident grave de niveau 3.**

*Exemple 8. 11 mars 1999, France. – Un technicien d'un service sécurité-radioprotection d'une centrale nucléaire intervient sans autorisation dans une zone rouge (zone où le débit d'équivalent de dose d'irradiation est susceptible de dépasser les 100 mSv/h ; et où l'accès est exceptionnel, restreint par des procédures et autorisations spéciales limitant strictement la durée du séjour) au-dessous de la cuve du réacteur 1, alors à l'arrêt pour maintenance. Il entre dans le puits de cuve pour récupérer des outillages de maintenance et se trouve alors, pendant plus de 3 minutes, à proximité des doigts de gant, instruments de mesure hautement radioactifs, qui étaient mis en place pour vérifier l'étanchéité de la cuve lors du déchargement du combustible. A sa sortie du puits de cuve, il se rend compte (lecture de son dosimètre électronique) qu'il vient de recevoir une dose estimée à 340 mSv. Le développement de son dosimètre passif confirmera une dose de l'ordre de 300 mSv.*

Catégories des personnes exposées : travailleur

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 3\* (\* Dans ce cas, l'utilisation du coefficient de risque correspondant aux fortes dose et forts débits de dose ne changent pas l'indice de gravité)

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle radioprotection : 3

▣ Qualification de l'événement : **Incident grave de niveau 3.**

Rappel : cet événement a été classé au niveau 2 dans l'échelle INES, par les Autorités de sûreté françaises.

Remarque : dans ce cas, le fait que le débit de dose soit supérieur à 0,1 Gy/h ne fait pas changer de plage de risque, ce qui peut arriver dans d'autres cas : en effet, lorsque le débit de dose est supérieur à 0,1 Gy/h, le risque de cancer mortel est multiplié par 2 par rapport au risque résultant d'une même dose reçue dans un débit de dose plus faible.

#### 7.4. Exemples d'événements classés aux niveaux 4 à 6 (accidents, accidents graves)

*Exemple 9. 7 janvier 2002, France. – Incident lors d'un transport de matières radioactives entre la Suède et les Etats-Unis impliquant un colis dont le débit de dose était anormalement élevé (4mSv/h à 25 mètres). Il s'est avéré que les bouchons de deux tubes contenant des pastilles de matière radioactive, 366 TBq d'iridium-192, étaient dévissés : les examens médicaux pratiqués sur des agents de manutention font apparaître que la dose reçue serait de l'ordre de 15 mSv sur deux d'entre eux et que le colis était déjà défaillant lors de son passage à l'aéroport de Roissy (le conducteur de la société aurait reçu une dose de 3,4 mSv). Un mois et demi plus tard, les résultats complémentaires demandés par les Autorités montrent qu'un des deux agents a en fait reçu une dose de l'ordre de 100 mSv.*

Catégories des personnes exposées : public (travailleurs non habituellement exposés, non formés)

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 3

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle de radioprotection : 3

▣ Qualification provisoire de l'événement : **Incident grave de niveau 3.**

Réévaluation de l'indice de gravité à  $T_0+1$ mois : quasiment 4 (le risque correspondant à la valeur de 100 mSv se situe à la frontière entre les indices 3 et 4 ; pour « trancher » entre les deux classements, des informations sur le temps d'exposition, la précision de la mesure,... seraient nécessaires).

▣ Niveau - probable - dans l'échelle de radioprotection (après requalification) : 4

▣ Qualification finale de l'événement : **Accident de niveau 4.**

Rappel : cet événement a été classé au niveau 3 dans l'échelle INES par les Autorités de sûreté suédoises.

*Exemple 10. 30 septembre 1999 – Tokai-Mura, Japon. Un accident de criticité survient dans une usine de conversion de l'uranium dans une cuve contenant une solution nitrique d'uranium enrichi à 18,8% en isotope 235. Il s'est produit suite à des opérations manuelles non prévues (transfert des solutions à l'aide de seaux de 10 litres) par des opérateurs insuffisamment qualifiés. Lors d'un premier pic de puissance, les trois opérateurs situés à proximité de la cuve ont reçu des doses estimées initialement à 17, 10 et 3 Gy, puis réévaluées à 9, 5 et 1,2 Gy (doses évaluées après coup car les opérateurs ne portaient pas de dosimètre). La criticité se poursuit pendant une vingtaine d'heures avant d'être totalement maîtrisée, en vidangeant l'eau refroidissant la cuve par l'extérieur qui jouait le rôle d'un réflecteur de neutrons.*

*L'ensemble des actions de maîtrise de l'accident a nécessité l'intervention de 24 personnes qui ont reçu des doses comprises entre 1 mSv et 48 mSv. Des estimations ont permis de vérifier que les conséquences dans l'environnement étaient faibles et limitées pour l'essentiel à l'irradiation directe par les rayonnements de la cuve. L'opérateur le plus exposé (il tenait l'entonnoir servant au déversement des seaux) est mort le 21 décembre, 2 mois après l'accident malgré des soins extrêmement sophistiqués. Le second qui était initialement considéré comme ayant des "chances de survie raisonnables" est mort en avril 2000.*

Catégories des personnes exposées : travailleurs

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 5, indice relatif aux effets déterministes observés chez les trois personnes exposées (\*), l'indice est inférieur à 3 pour les personnes qui sont intervenues pour rétablir la situation (pour ces personnes il n'est pas du tout évident qu'il s'agisse de doses "maîtrisées" au vu de l'hétérogénéité dans les doses reçues).

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle de radioprotection : 5

▣ Qualification de l'événement : **Accident de niveau 5.**

Rappel : cet événement a été classé au niveau 4 dans l'échelle INES par les Autorités de sûreté japonaises.

Remarque : un événement survenu dans des circonstances similaires, mais qui aurait entraîné l'exposition semi-létale de plus de 10 travailleurs serait qualifié comme **Accident grave de niveau 6.**

*Exemple 11. 27 février 2001 – Bralystock, Pologne. A la suite d'une coupure d'électricité qui provoqua l'arrêt soudain d'un accélérateur linéaire, les traitements par irradiation sur cinq patientes atteintes d'un cancer du sein (quatre d'entre elles après ablation d'un sein), furent repris sans recalibration de l'appareil. L'alerte fut donnée par deux patientes se plaignant d'une sensation de brûlure en fin d'irradiation. Le physicien découvrit alors que les débits de dose étaient 10 à 20 fois plus élevés que ce qui était prévu. Les cinq patientes ont développé dans les mois qui suivirent des nécroses invalidantes profondes, deux présentant une destruction totale des tissus jusqu'au péricarde. Les lésions observées étaient plus sévères chez ces deux dernières patientes témoignant, semble-t-il, d'une détérioration progressive de l'appareil : on estime la dose qu'elles ont reçue à plus de 150 Gy. Sans les soins exceptionnels qu'elles ont reçus à l'Institut Curie, ces deux patientes seraient certainement décédées. Fin 2002, le pronostic vital à moyen ou long-terme restait encore réservé pour quatre des cinq femmes.*

Catégories des personnes exposées : public (patients)

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 5 (dose quasi-létale pour deux patientes au moins, surface du corps < 30% avec des chances de survie après traitement)

Nombre de personnes exposées < 10 (pas de sur-pondération)

▣ Niveau dans l'échelle de radioprotection : 5

▣ Qualification de l'événement : **Accident de niveau 5.**

Remarque : le pronostic vital étant réservé pour deux patientes, cet accident pourrait être reclassé **Accident grave de niveau 6** en cas de décès dont la cause pourrait être directement liée à l'irradiation qu'elles ont subie.



## 7.5. Exemples d'événements classés au niveau 7 (accidents majeurs)

*Exemple 12. Septembre 1987, Goiânia (Brésil) – Deux chiffonniers entrent dans un immeuble abandonné qui a servi à une clinique privée de radiothérapie ; ils y trouvent un appareil abandonné, le démontent, retirent son bouchon de plomb et le ramènent chez eux. Ils enlèvent de l'appareil une capsule qui contient vingt grammes de chlorate de césium en poudre, qu'ils ouvrent, libérant son contenu de césium-137 (51 TBq). La caisse de plomb qui contient le césium non immédiatement dispersé est par la suite vendue à un ferrailleur. La poudre bleue luminescente attire l'attention de la famille et des voisins, et est manipulée, certaines personnes s'en frottant sur le corps... 75 jours après la découverte de la source par les chiffonniers, et au moins quatre personnes étant déjà décédées des suites de leur irradiation, les Autorités sanitaires brésiliennes procèdent au contrôle de près de 112 000 personnes : 249 présentent des contaminations internes et/ou externes importantes, 49 doivent être hospitalisées dont 21 dans des unités de soins intensifs. Trois autres personnes décèdent dans les mois qui suivent. Une personne doit être amputée. 600 personnes restent aujourd'hui soumises à un contrôle médical.*

Catégories des personnes exposées : public

Indice de gravité correspondant aux doses reçues : 6

Nombre de personnes exposées : >100 dont plus de 10 à des niveaux au moins semi-létale (sur-pondération +1)

► Niveau dans l'échelle de radioprotection : 7

► Qualification de l'événement : **Accident majeur de niveau 7.**

Rappel : cet événement a été classé au niveau 7 dans l'échelle INES par les autorités de sûreté brésiliennes.

*Exemple 13. 26 avril 1986 – Tchernobyl, Russie. 32 morts dans les jours et quelques semaines qui ont suivi l'explosion du réacteur parmi les travailleurs qui sont intervenus en urgence, et des lésions dues à l'irradiation observée chez plus d'une centaine d'autres. Dans la population, il est attesté près de 2000 cas de cancers de la thyroïde chez des enfants exposés au moment de l'accident et si cette tendance se poursuit, il pourrait y avoir plus de cas durant les prochaines décades (source UNSCEAR 2000). Les calculs statistiques estiment que l'accident pourrait causer la mort par cancer de plusieurs milliers de "liquidateurs" (source IRSN). Sur les 600 000 liquidateurs (qui doivent être considérés comme des membres du public, compte tenu de leur méconnaissance des risques qu'ils encouraient), environ 10% ont reçu des doses de plus de 250 mSv et 20% des doses comprises entre 100 et 165 mSv.*

Catégories des personnes exposées : travailleurs et public

Indice de gravité correspondant aux doses reçues par les travailleurs : 5

Nombre de personnes exposées : >10 (sur-pondération +1)

Niveau dans l'échelle de radioprotection : 6

Indice de gravité correspondant aux doses reçues par les membres du public : 6

Nombre de personnes exposées : >100 (sur-pondération +1)

Niveau dans l'échelle de radioprotection : 7

► Niveau retenu dans l'échelle de radioprotection : 7 \* (\* valeur maximum entre le niveau obtenu pour les travailleurs et celui obtenu pour les personnes du public)

► Qualification de l'événement : **Accident majeur de niveau 7.**

Rappel : cet événement a également été classé au niveau 7 dans l'échelle INES.



## ANNEXES

- Annexe 1 : Méthode et outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition **des effets stochastiques** en fonction de la dose, du débit de dose, des organes exposés, de l'âge à l'exposition et du sexe.
- Annexe 2 : Méthode et outils disponibles pour le calcul du risque d'apparition **des effets déterministes** en fonction de la dose et du débit de dose (Modèle du NRPB 1996).



## CLASSEMENT DES EVENEMENTS TOUCHANT LES MEMBRES DU PUBLIC\*

	<b>Niveaux de doses indicatifs</b> <small>Effets stoch. Effets détermin. taux dose efficace dose absorbée Sv</small>	<b>INDICE de gravité</b> <small>(avant pondérations)</small>	<b>Pondération</b> sur le nombre de personnes exposées	<b>Pondération</b> sur la gravité des effets déterministes non létaux (invalidants ou non)	<b>Pondérations</b> Autres dimensions
50 %	D50	6	+10 personnes (+1)	Non létal invalidant (-1)	
5 %	D5	5	+10 personnes (+1) +100 personnes (+2)	Non létal non invalidant (-2)	Événement <u>Potentiel</u> <small>Evaluation du scénario d'exposition puis (-1) ou (-2)</small>
0,5 %	0,1 Sv (=100 mSv)	4	+10 personnes (+1) +100 personnes (+2)		
0,05 %	0,01 Sv (10 mSv)	3			
5.10 <sup>-5</sup>	0,001 Sv <small>= Limite Régl. (1 mSv)</small>	2			
5.10 <sup>-6</sup>	0,0001 Sv (=100 µSv)	1			
		0			

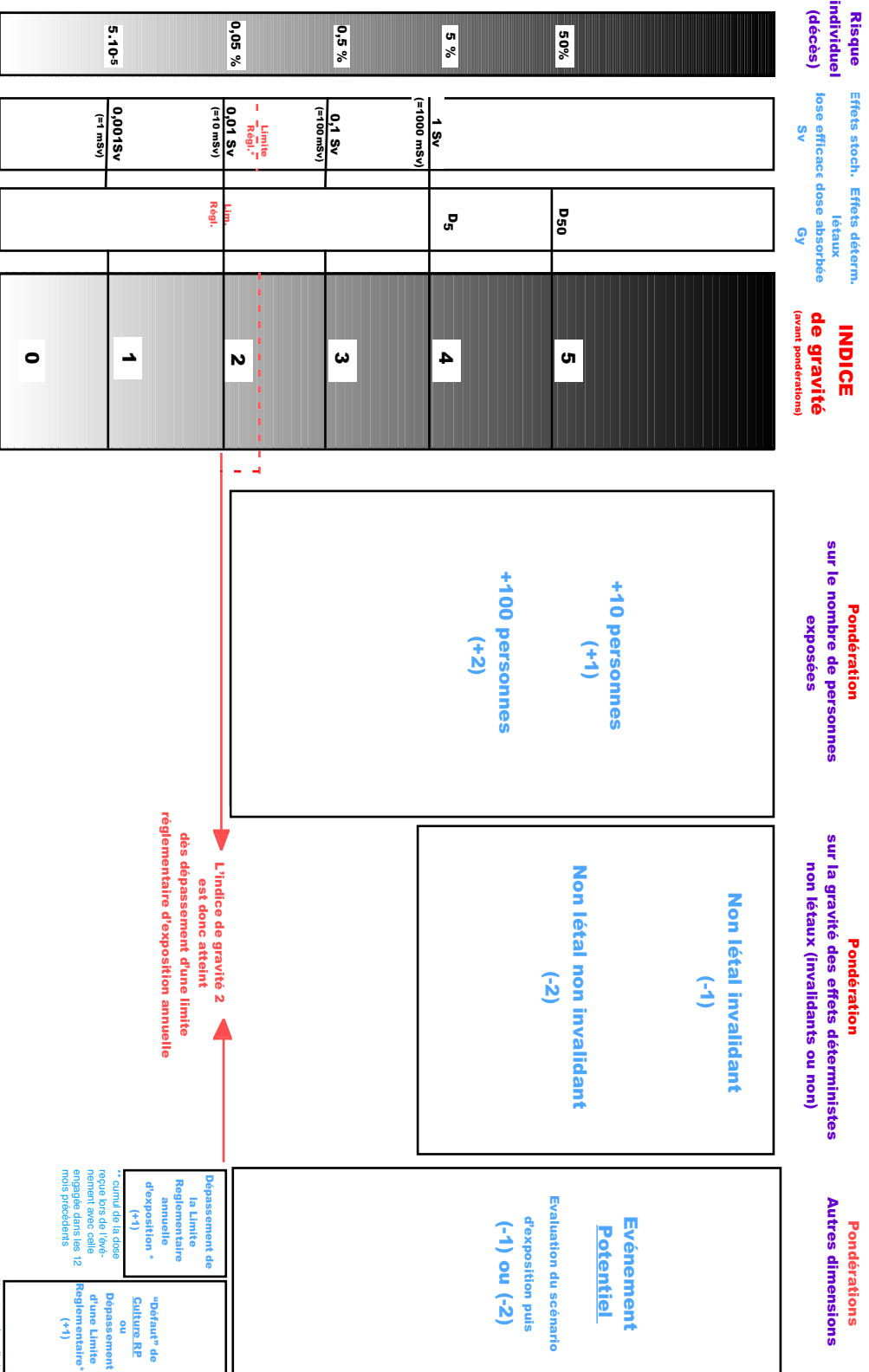
L'indice de gravité 2 est atteint dès dépassement de la limite réglementaire d'exposition annuelle

"Défaut" Culture RP  
ou  
Dépassement de Limite Réglementaire\* (+1)

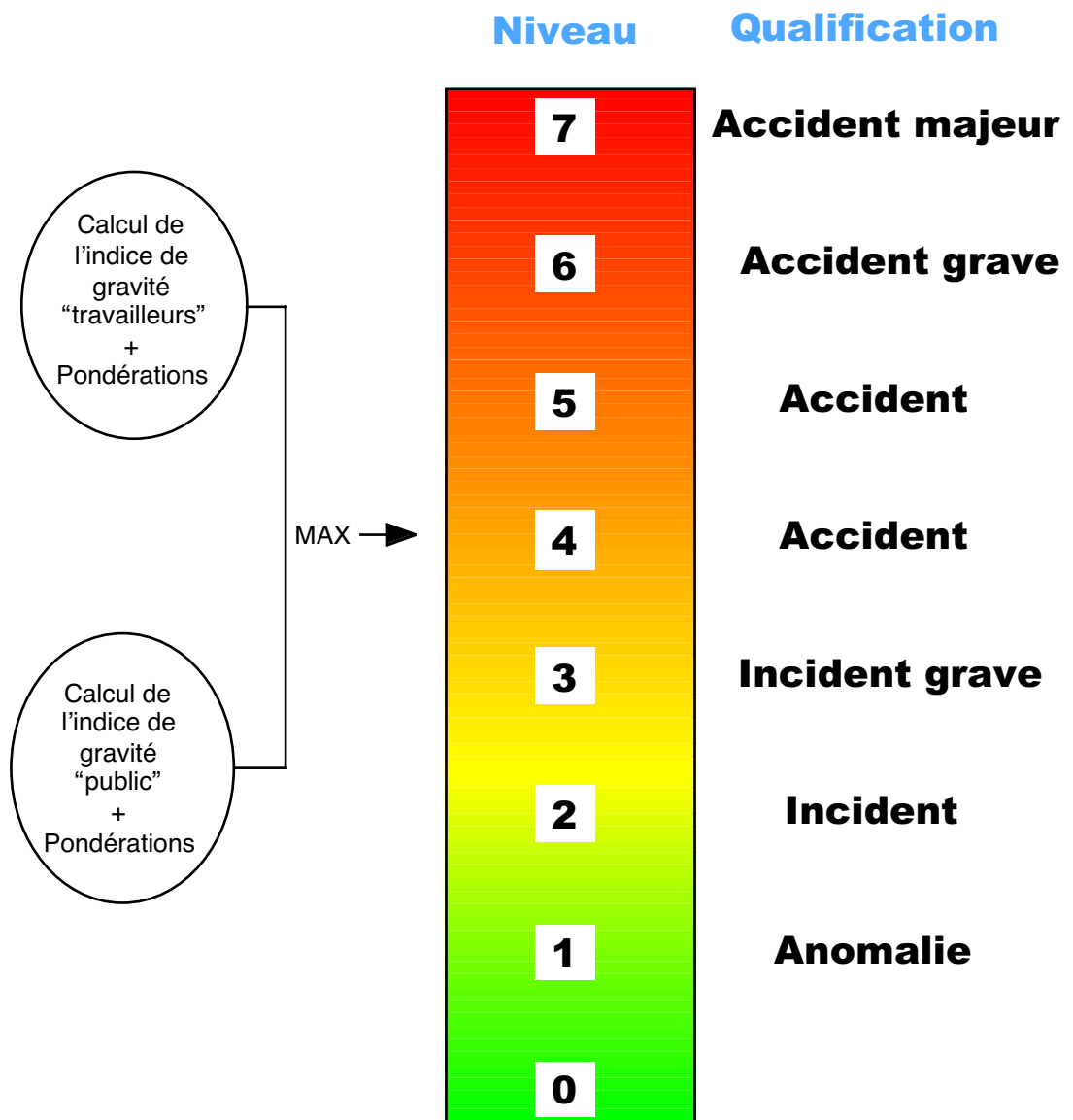
(\*) Dans la plupart des cas, l'indice de gravité d'un événement touchant un **travailleur** peut être déduit de l'utilisation de ce synoptique en soustrayant 1 à l'indice de gravité obtenu



## CLASSEMENT DES EVENEMENTS TOUCHANT LES TRAVAILLEURS











**RAPPORT N° 276**

**PROPOSITION D'UNE  
ECHELLE DE CLASSEMENT DES INCIDENTS  
ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES**

**ANNEXE 1**

**Méthode et outils disponibles pour le calcul du risque  
d'apparition des effets stochastiques en fonction  
de la dose, du débit de dose, des organes exposés,  
de l'âge à l'exposition et du sexe**

---

*Pascal CROÛAIL, David COLLIN, Christian LEFAURE*



## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>RAPPELS SUR L’EVALUATION DU RISQUE D’APPARITION D’EFFETS STOCHASTIQUES</b>	<b>1</b>
1.1.	<b>Origine et nature des effets stochastiques</b>	<b>1</b>
1.2.	<b>Evaluation du risque d'apparition d'effets stochastiques</b>	<b>2</b>
1.2.1.	L'épidémiologie et ses limites	2
1.2.2.	La relation dose-effet de la CIPR	4
1.2.3.	Les autres modèles et les facteurs de variation du risque radiologique	6
<b>2.</b>	<b>LES OUTILS PERMETTANT DE DETERMINER LE RISQUE D’APPARITION D’EFFETS STOCHASTIQUES</b>	<b>11</b>
2.1.	<b>Application du modèle de la CIPR aux cas d'exposition simple en l'absence d'informations fines</b>	<b>11</b>
2.2.	<b>Utilisation de ASQRAD® pour préciser le risque individuel en fonction de l'âge, du sexe, de l'organe irradié, de la dose et du débit de dose.</b>	<b>14</b>
2.2.1.	Présentation du logiciel ASQRAD®	14
2.2.2.	Déroulement des calculs de risque vie entière de mortalité par cancer radio-induit associé à l'exposition d'un individu à un rayonnement de faible transfert linéique d'énergie délivré à faible dose et débit de dose.	15
2.2.3.	Définition des indicateurs de risque vie entière	15
2.2.4.	Risque vie entière de décéder d'un cancer radio-induit	19
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>28</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b>	<b>Probabilité de développer un cancer mortel sur la vie entière en pourcentage par Sievert (CIPR 60)</b>	<b>5</b>
<b>Tableau 2.</b>	<b>Facteurs correctifs du détriment en fonction de l'âge de la personne exposée (moyenne sur les deux sexes confondus)</b>	<b>9</b>
<b>Tableau 3(a)</b>	<b>Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du BEIR [BEIR V, 1990]</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 3(b)</b>	<b>Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer de la CIPR 60 [ICRP, 1991] [ICRP, 1991(a)]</b>	<b>24</b>
<b>Tableau 3(c)</b>	<b>Spécifications des modèles de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du NRPB [NRPB, 1993]</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 3(c)</b>	<b>Spécifications des modèles de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du NRPB [NRPB, 1993]</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 3(d)</b>	<b>Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer de l'UNSCEAR de 1994 [UNSCEAR, 1994]</b>	<b>27</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b>	<b>Variation de la gravité des effets stochastiques en fonction de la dose</b>	<b>3</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>Variation linéaire quadratique de la fréquence d'apparition des effets avec la dose</b>	<b>4</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>Histogrammes cumulés par type de cancer des risques vie entière de décès par cancer radio-induit en fonction de l'âge à l'exposition (Modèle UNSCEAR 2000). <i>Cas de l'homme</i></b>	<b>7</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>Histogrammes cumulés par type de cancer des risques vie entière de décès par cancer radio-induit en fonction de l'âge à l'exposition (Modèle UNSCEAR 2000). <i>Cas de la femme</i></b>	<b>8</b>
<b>Figure 5.1.</b>	<b>Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour un travailleur exposé selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle</b>	<b>12</b>
<b>Figure 5.2.</b>	<b>Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour un travailleur exposé selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle. Doses inférieures à 10 mSv</b>	<b>12</b>
<b>Figure 6.1.</b>	<b>Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour une personne du public exposée selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle</b>	<b>13</b>
<b>Figure 6.2.</b>	<b>Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour une personne du public exposée selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle. Doses inférieures à 10 mSv</b>	<b>13</b>
<b>Figure 7.</b>	<b>Illustration de l'écran de visualisation du logiciel ASQRAD® pour entrer les paramètres de la modélisation du risque de décès par cancer radio-induit dans le cas d'un scénario d'exposition d'un individu</b>	<b>17</b>



## ANNEXE 1

### **METHODE ET OUTILS DISPONIBLES POUR LE CALCUL DU RISQUE D'APPARITION DES EFFETS STOCHASTIQUES EN FONCTION DE LA DOSE, DU DEBIT DE DOSE, DES ORGANES EXPOSES, DE L'AGE A L'EXPOSITION ET DU SEXE**

STOCHASTIQUE : "phénomène ou processus qui relève partiellement du hasard"

Cette annexe a pour but de rappeler sur quel consensus international est fondée l'estimation des risques stochastiques liés aux expositions radiologiques et de fournir (ou décrire) les outils permettant d'effectuer le plus simplement possible cette estimation une fois la dose connue ou estimée.

#### **1. RAPPELS SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE D'APPARITION D'EFFETS STOCHASTIQUES**

##### **1.1. Origine et nature des effets stochastiques**

Les effets cancérogènes résultent de l'interaction de rayonnements ionisants avec la molécule d'ADN des cellules. Ces interactions conduisent à des mutations si les lésions subies par l'ADN ne sont pas ou mal réparées par les systèmes enzymatiques de réparation ; ces mutations peuvent être le phénomène initiateur du développement d'un cancer. Le processus qui mène de l'interaction initiale à l'apparition d'un cancer est particulièrement complexe et long. Les études expérimentales et épidémiologiques ont montré que les premiers cas de cancers radioinduits n'apparaissent que plusieurs années (voire une dizaine d'années) après l'exposition et qu'ils continuent à apparaître de façon très significative plusieurs dizaines d'années après cette exposition.

Ces effets cancérogènes sont de nature probabiliste (on dit aussi stochastique) car au sein d'une population uniformément exposée il est impossible de prédire quels sont les individus qui pourraient développer un cancer radio-induit. En effet en l'état actuel des connaissances, on peut considérer que :

- Lors d'une exposition aux rayonnements ionisants, le dépôt d'énergie dans la cellule, l'organe ou l'organisme entier se fait de manière aléatoire ;

- Tout dépôt d'énergie ne se traduit pas systématiquement par une rupture de brin(s) d'ADN ;
- Et enfin les phénomènes de réparation ou de mutation sont aléatoires tout comme la multiplication de cellules mutées.

Par ailleurs, les effets résultant d'une exposition aux rayonnements ionisants ne sont pas « signés » ; c'est-à-dire qu'en l'état actuel des connaissances, on ne peut pas, sauf dans de très rares cas, distinguer un cancer radio-induit d'un autre cancer.

## **1.2. Evaluation du risque d'apparition d'effets stochastiques**

Même si les études expérimentales sur les lignées cellulaires et sur les animaux sont importantes pour comprendre les mécanismes d'apparition des effets stochastiques, elles ne peuvent en aucun cas, en l'état actuel des connaissances, être la base d'une évaluation quantitative du risque pour l'homme de développer un cancer radio-induit. La science qui a apporté la preuve de l'existence de ce type d'effet est l'épidémiologie<sup>1</sup>. Elle a permis de mettre en évidence des excès, statistiquement significatifs, de décès par cancer dans les populations exposées par rapport à des populations non exposées.

### **1.2.1. L'épidémiologie et ses limites**

En l'état actuel des connaissances, l'épidémiologie permet de démontrer l'existence d'effets stochastiques sur des populations qui ont subi une exposition dite "flash<sup>2</sup>" supérieure à 100 mSv<sup>3</sup> au corps entier (sur ce sujet, cf. en particulier [Wingspread Conference, 1997], [Arlie Conference, 1999], [Pierce, Preston, 2000]). Par contre, du fait des limites intrinsèques des outils statistiques sur lesquels s'appuie l'épidémiologie, il n'est pas possible de démontrer avec certitude l'existence de tels effets pour des expositions plus faibles.

---

<sup>1</sup> Les principales études épidémiologiques disponibles, relatives à l'exposition aux rayonnements ionisants ont porté sur les survivants d'Hiroshima et Nagasaki, les patients traités en radiothérapie et curiethérapie, et certaines populations de travailleurs exposés (en particulier les mineurs exposés au radon).

<sup>2</sup> C'est-à-dire reçue sur une période très brève.

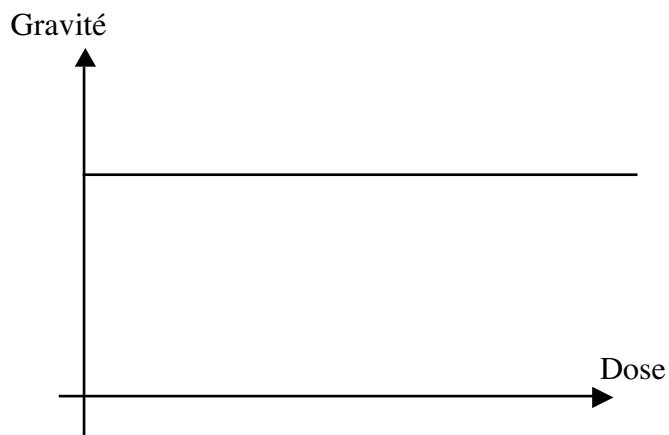
<sup>3</sup> Dans les années 60 la démonstration n'était statistiquement significative qu'au-dessus de 1Sv ; dans les années 70 elle était significative dès 500 mSv ; elle est aujourd'hui significative au dessus de 100 mSv. En cinquante ans, le seuil de l'incertitude a été réduit d'un facteur dix.



L'évaluation quantitative de la probabilité pour un individu de développer un cancer est basée sur l'utilisation de modèles. Une telle évaluation prédictive du risque dans une population repose sur :

- L'étude de l'excès de risque de décès par cancer lié à l'exposition parmi la population exposée ;
- L'ajustement de modèles "exposition - risque" sur la population observée. Ces modèles sont directement dérivés des données épidémiologiques dans des contextes démographiques donnés ;
- L'application du modèle de risque à d'autres situations d'expositions (transfert et extrapolation du risque).

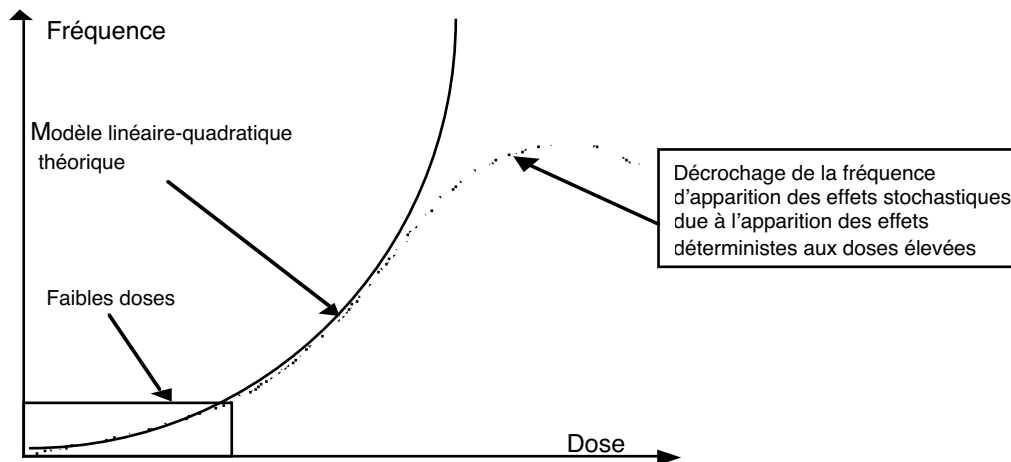
Contrairement à ce qui se passe dans le cas des effets déterministes (voir Annexe 2), la gravité des effets stochastiques est indépendante de la dose reçue (Figure 1), mais la probabilité d'apparition de ces effets augmente avec la dose (Figure 2).



**Figure 1. Variation de la gravité des effets stochastiques en fonction de la dose**

Pour les effets stochastiques, en l'absence de données statistiquement significatives sur un excès de cancers aux très faibles expositions (cf. supra), on fait, par précaution, l'hypothèse qu'il n'y aurait pas de dose seuil au-dessous de laquelle aucun effet n'apparaîtrait.

Pour la plupart des cancers, la relation exposition risque la plus probable serait soit une relation linéaire soit une relation linéaire - quadratique (voir tableaux 3 (a),(b),(c),(d) en fin de cette annexe). La Figure 2 illustre le cas des relations linéaires quadratiques.



**Figure 2. Variation linéaire quadratique de la fréquence d'apparition des effets avec la dose**

Au niveau des faibles doses, la relation correspond à la partie linéaire de la courbe linéaire quadratique. En dessous de 100 mSv, cette courbe correspond à l'extrapolation de l'ajustement effectué de façon statistiquement significative pour des expositions plus élevées.

### 1.2.2. La relation dose-effet de la CIPR

Le modèle retenu par la CIPR<sup>4</sup> à des fins de gestion du risque radiologique se devait d'être simple d'utilisation. Il est donc global, il agrège tous les types de cancers radio-induits possibles pour une population de référence mondiale<sup>5</sup> il ne distingue pas les deux sexes. La relation exposition-risque proposée correspond à une exposition du corps entier.

<sup>4</sup> Ce modèle s'appuie largement sur les publications de l'UNSCEAR (United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) de 1988.

<sup>5</sup> En réalité, il s'agit d'une moyenne de 5 populations de référence : Japon, Porto Rico, Etats-Unis, Royaume-Uni, Chine

Par ailleurs la CIPR, toujours dans une optique de gestion du risque, a estimé qu'il fallait distinguer deux grandes catégories de populations exposées : les travailleurs dont l'âge s'échelonne entre 20 et 64 ans et la population générale ou « public » qui couvre toute la pyramide des âges (0 à 90 ans). De ce fait elle propose deux coefficients de risque pour tenir compte de cette différence.

Enfin la CIPR tient compte de l'effet du débit de dose. En effet, les publications de l'UNSCEAR estiment que le risque aux faibles doses délivrées à des faibles débits de dose est de 2 à 10 fois plus faible que le risque aux fortes doses délivrées à fort débit de dose. Pour des raisons pratiques et à titre conservatoire, la CIPR, comme la plupart des organismes nationaux et internationaux, recommande d'appliquer un facteur de réduction ou **FEDDD<sup>6</sup> égal à 2** lors du calcul du risque radiologique associé à une dose inférieure à **0,2 Gy** ou à un débit de dose de **0,1 Gy/h**. Ce facteur corrige, pour les faibles doses et débits de doses, le coefficient linéique dérivé à partir des observations des populations de référence.

La CIPR obtient ainsi quatre coefficients selon qu'il s'agit de l'exposition des travailleurs ou du public et ce pour des faibles doses et faibles débits ou non (voir Tableau 1).

**Tableau 1. Probabilité de développer un cancer mortel\* sur la vie entière en pourcentage par Sievert (CIPR 60)**

Population exposée	« Forte » dose (>200mSv) <b>OU/ET</b> « Fort » débit de dose (>100mGy/h) % par Sv	« Faible » dose (<200mSv) <b>ET</b> « Faible débit de dose » (<100mGy/h) % par Sv
Travailleurs	8,0	4,0
Population générale	10,0	5,0

\* La CIPR introduit aussi des risques d'apparition de cancers non mortels et des risques d'effets génétiques ; ces autres risques sont proportionnels au risque de cancers mortels puisqu'ils sont aussi linéaires et sans seuil par rapport à l'exposition. Seuls les coefficients de risques de cancers mortels pour les individus exposés ont été retenus ici, puisqu'ils suffisent à déterminer les indices de gravité dans le système de classement proposé.

6 Facteur d'Efficacité de la Dose et du Débit de Dose ; en anglais, DDREF, pour "Dose and Dose Rate Effectiveness Factor"

### 1.2.3. Les autres modèles et les facteurs de variation du risque radiologique

Dès lors que des informations plus fines sont disponibles et que l'on veut estimer plus précisément le risque pour un ou plusieurs individus, il convient de retourner vers les modèles de base décrits dans les publications de l'UNSCEAR, du BEIR (Académie des Sciences des Etats-Unis) voire du NRPB qui présente une synthèse de modèles existants. Tous ces modèles s'appuient sur des études épidémiologiques par type de cancer.

Parmi les hypothèses de base, il convient de mentionner que pour approcher l'excès de risque de décéder d'un cancer radio-induit le modèle peut :

- Soit estimer un excès de risque relatif (l'excès de risque est obtenu comme un pourcentage de la mortalité « naturelle » par cancer dans le pays considéré pour un niveau d'exposition) ;
- Soit estimer un excès de risque absolu (l'excès de risque est un nombre de cancers à ajouter à la mortalité « naturelle » par cancer dans le pays considéré pour un niveau d'exposition).

À ce jour, la très grande majorité des modèles a retenu l'excès de risque relatif.

Nous ne décrivons pas ici tous les modèles, mais les quatre tableaux fournis en fin de cette annexe résument les principales caractéristiques des derniers modèles publiés.

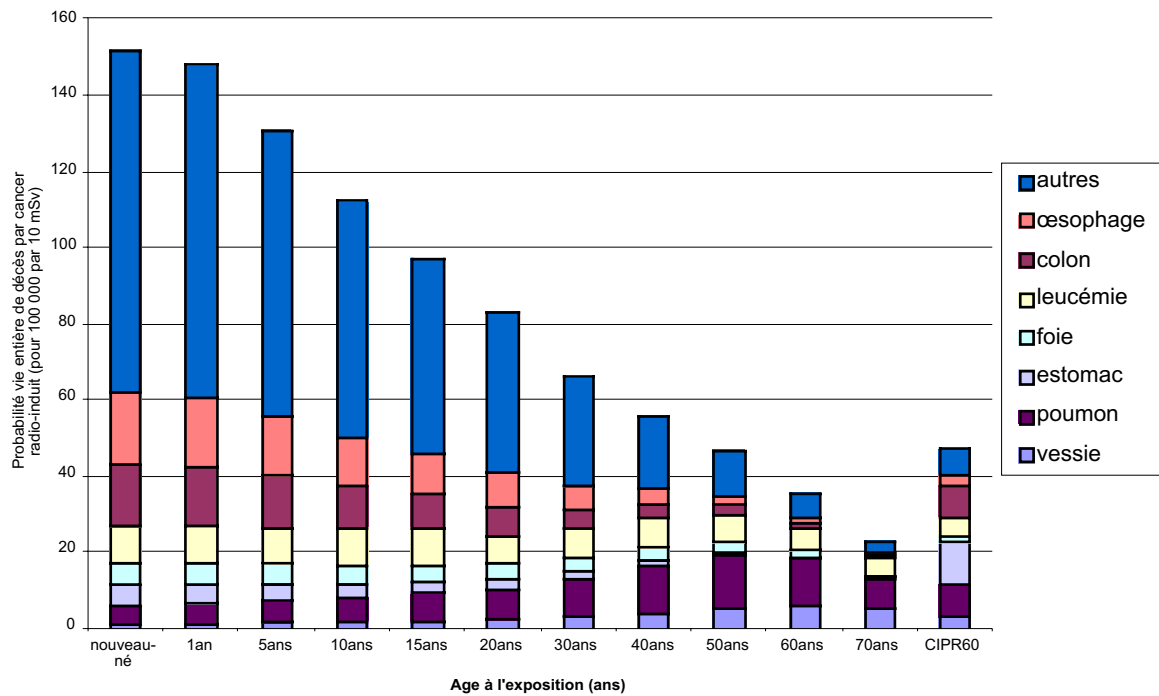
Il paraît par contre intéressant de rappeler l'influence de certains paramètres sur la relation exposition-risque : il s'agit des organes exposés<sup>7</sup> (en particulier si le corps n'est pas exposé uniformément) qui induisent différents sites de cancer, de l'âge à l'exposition et du sexe.

Si l'on utilise le modèle le plus récent de l'UNSCEAR, publié en 2000, les deux graphes (Figures 3 et 4) suivants illustrent bien l'influence de ces trois facteurs.

---

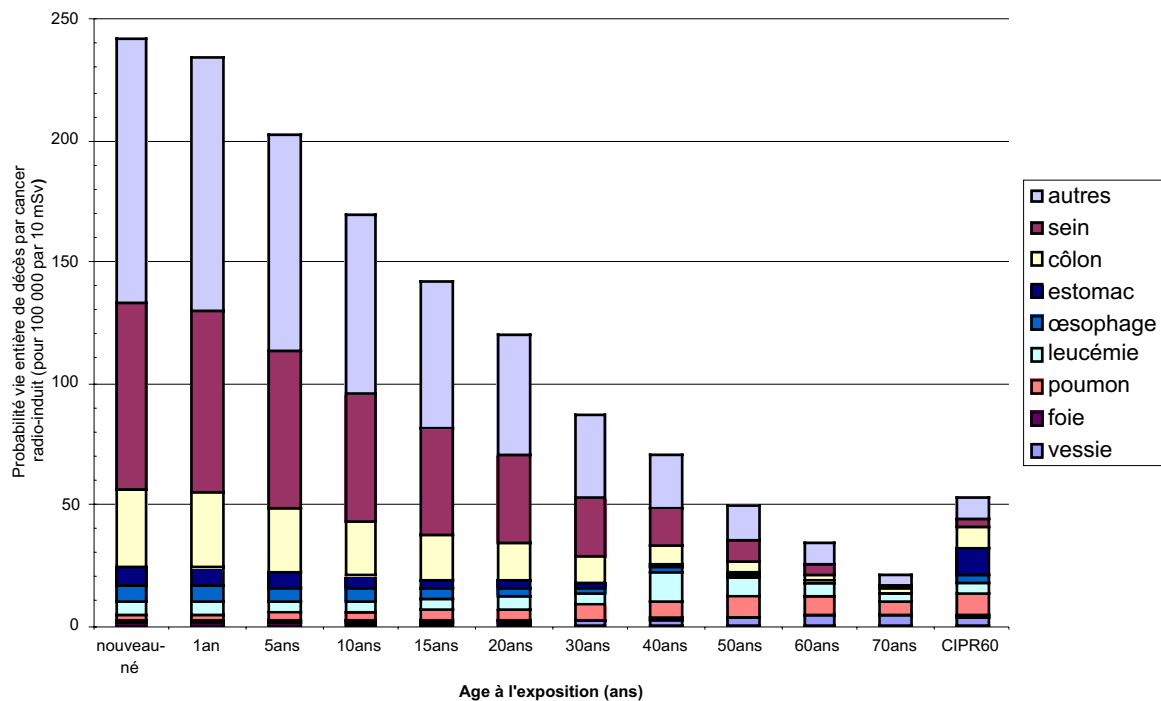
7

On distingue, parmi les cancers radio-induits, les tumeurs solides et les leucémies. Les résultats et les observations des études épidémiologiques montrent que la forme de la relation dose - effet varie en fonction du type de cancer. De plus, parmi les tumeurs solides, il a été mis en évidence une variation de la relation dose-effet en fonction du site du cancer (colon, poumon, thyroïde,...).



**Figure 3. Histogrammes cumulés par type de cancer des risques vie entière de décès par cancer radio-induit en fonction de l'âge à l'exposition (Modèle UNSCEAR 2000 : âge à l'exposition. *Cas de l'homme*)**

*A titre de comparaison, les valeurs retenues dans la CIPR 60 sont indiquées ; Données démographiques : France 1994 ; "dose équivalente à chaque organe" égale à 10 mSv et utilisation d'un FEDDD égal à 2.*



**Figure 4.** Histogrammes cumulés par type de cancer des risques vie entière de décès par cancer radio-induit en fonction de l'âge à l'exposition (Modèle UNSCEAR 2000 : âge à l'exposition. *Cas de la femme*)

*A titre de comparaison, les valeurs retenues dans la CIPR 60 sont indiquées ; données démographiques : France 1994 ; dose équivalente à chaque organe égale à 10 mSv et utilisation d'un FEDDD égal à 2.*

L'analyse des Figures 3 et 4 montre une influence très nette de certains organes : le sein chez la femme, dans une moindre mesure le foie chez l'homme.

On observe aussi le rôle de l'âge à l'exposition puisque la même exposition conduit à un risque sept fois moins élevé chez l'homme de 70 ans que chez le nourrisson de sexe masculin et de dix fois moins élevé chez la femme de plus de 70 ans que chez le nourrisson de sexe féminin. Pour illustrer cet aspect, le Tableau 2 fournit les facteurs correctifs du détriment à appliquer à la relation exposition-risque en fonction de l'âge. Ces facteurs sont issus d'une proposition de la CIPR en 1995 qui n'a pas fait l'objet d'une publication.

**Tableau 2. Facteurs correctifs du détriment en fonction de l'âge de la personne exposée (moyenne sur les deux sexes confondus)**

<b>Age (ans)</b>	<b>Facteur correctif du détriment</b>
1	3
5	2,5
10	2
15	1,5
<i>« adulte »</i>	<i>1</i>
50	0,5
70	0,3

L'utilisation des coefficients nominaux de risque proposés par la CIPR valables pour un "adulte moyen", doit donc se faire avec précaution.

A1.10



## 2. LES OUTILS PERMETTANT DE DETERMINER LE RISQUE D'APPARITION D'EFFETS STOCHASTIQUES

### 2.1. Application du modèle de la CIPR aux cas d'exposition simple en l'absence d'informations fines

L'objectif de ce paragraphe est de proposer un outil simple pour déterminer l'indice de risque qui sera utilisé pour classer un événement d'exposition aux rayonnements ionisants.

Pour ce faire, en s'appuyant sur les relations dose-effet de la CIPR (cf. supra §1.2.2), on utilisera les quatre figures suivantes qui permettent d'évaluer grossièrement la probabilité vie entière de développer un cancer mortel correspondant à la dose corps entier (dose efficace) reçue par la personne exposée.

Les deux premières figures (5.1 et 5.2) concernent des expositions professionnelles. Les deux suivantes (Figure 6.1 et 6.2) concernent les expositions des personnes du public. Dans les deux cas, la première figure permet de situer des individus dont la dose est supérieure ou égale à 50 mSv, et la seconde effectue un zoom pour les doses inférieures.

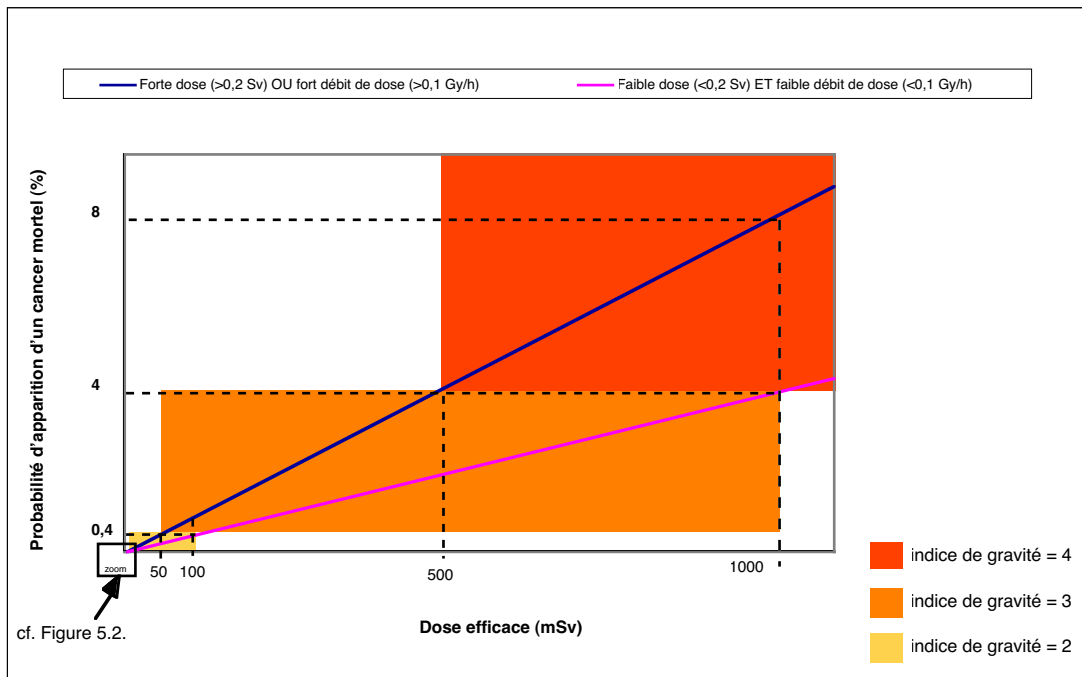
Ainsi dès lors que la dose efficace corps entier est connue, il suffira d'utiliser :

- **la courbe rose** pour les "faibles" doses ( $< 0,2$  Sv) **ET** "faibles" débits de doses ( $< 0,1$  Gy/h)

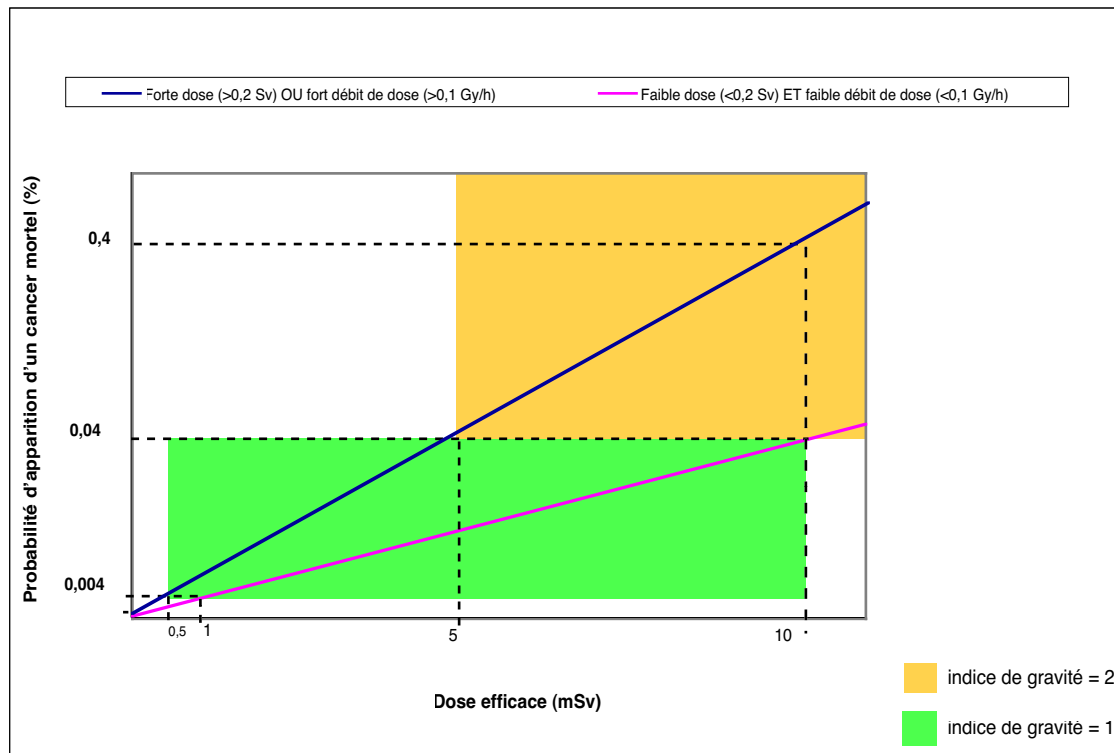
ou

- **la courbe bleue** pour les "fortes" doses ( $> 0,2$  Sv) **OU** "forts" débits de doses ( $> 0,1$  Gy/h),

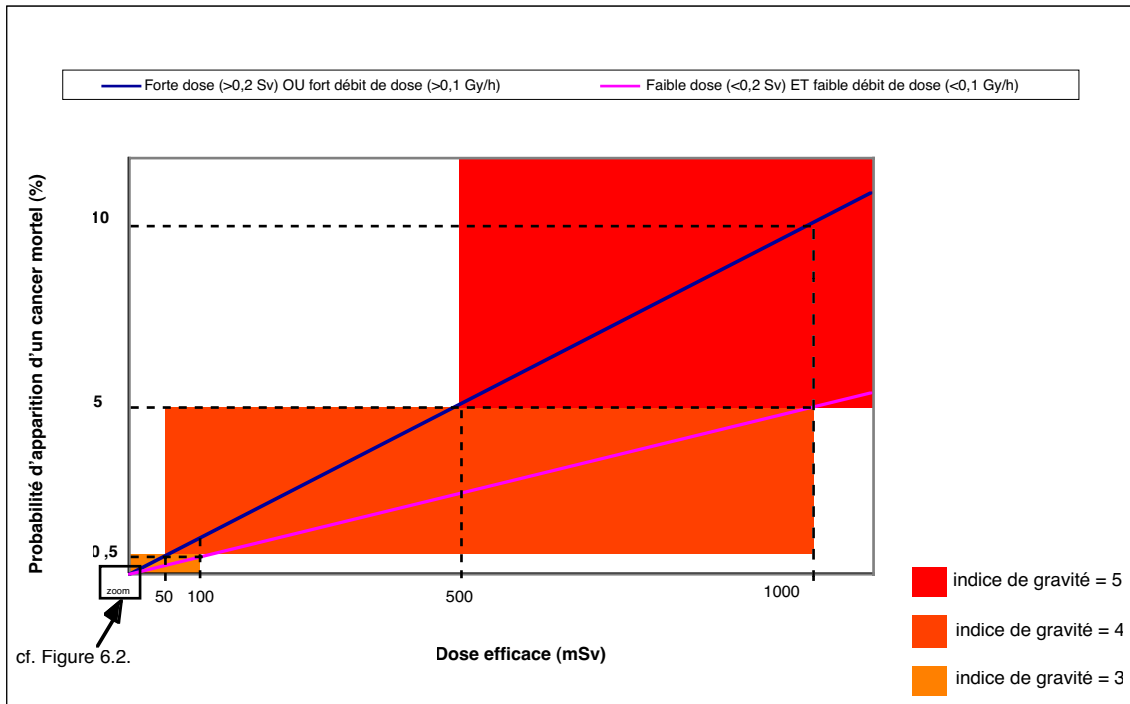
Deux exemples d'utilisation de ces courbes sont présentés ci-après en page A1.14



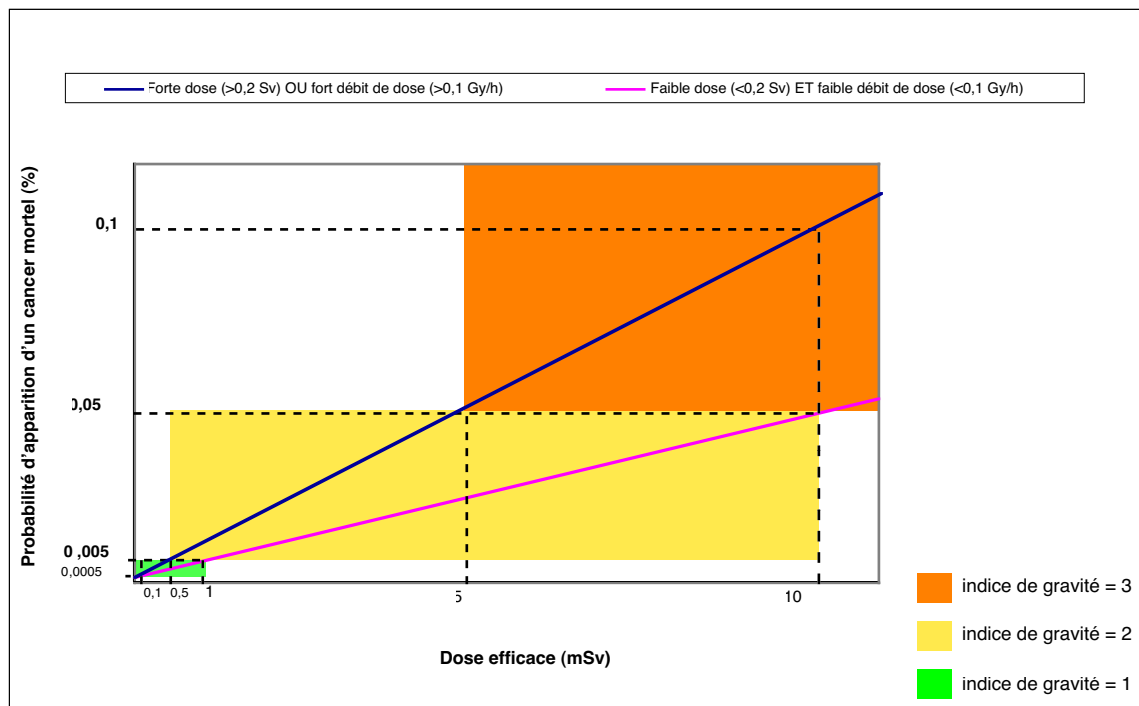
**Figure 5.1. Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour un travailleur exposé selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle**



**Figure 5.2. Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour un travailleur exposé selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle. Doses inférieures à 10 mSv**



**Figure 6.1.** Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour une personne du public exposée selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle



**Figure 6.2.** Probabilité d'apparition d'un cancer mortel en fonction de la dose et du débit de dose pour une personne du public exposée selon le modèle de la CIPR 60 et correspondance avec les indices de gravité de l'échelle. Doses inférieures à 10 mSv

Exemples d'utilisation :

1. Un travailleur reçoit une dose de 600 mSv au corps entier en quelques minutes. Il convient de situer l'événement d'exposition en utilisant la courbe bleue de la Figure 5.1 (l'exposition a eu lieu dans un fort débit de dose supérieur à 100 mGy/h, et la dose reçue est supérieure à 200 mSv) : l'indice de risque correspondant à cet événement est 4.

2. Un membre du public reçoit, de manière incidentelle, une dose corps entier estimée à 2 mSv en quelques jours.

Le débit de dose étant très inférieur à 100 mGy/h, et la dose reçue étant inférieure à 200 mSv, il convient donc de situer l'événement en utilisant la courbe rose de la Figure 6 : l'indice de risque correspondant à cet événement est 2.

## **2.2. Utilisation de ASQRAD® pour préciser le risque individuel en fonction de l'âge, du sexe, de l'organe irradié, de la dose et du débit de dose.**

Il existe par ailleurs des outils plus sophistiqués pour calculer le risque individuel lié à une exposition. L'utilisation de tels outils pourra s'avérer incontournable dans certains cas particuliers (exposition du public représentée par des individus de différentes classes d'âge par exemple). Les paragraphes suivants présentent l'un d'entre eux, le logiciel ASQRAD® (Assessment System for Quantification of Radiological Detriment).

### 2.2.1. Présentation du logiciel ASQRAD®

Le logiciel ASQRAD® a été développé conjointement par le CEPN et le NRPB, avec le soutien de la Commission Européenne, dans le but de fournir une structure générique pour l'étude des mesures de détérioration radiologique<sup>8</sup>. Ce logiciel permet entre autres de quantifier le détérioration associé aux effets somatiques stochastiques pour des expositions délivrées à des individus. Il comporte une base de données démographiques correspondant à différents pays ainsi qu'une sélection de modèles mathématiques de calcul du risque vie entière de cancer radio-induit établis par divers organismes de radioprotection internationaux et nationaux. La particularité de ce logiciel est qu'il a été conçu comme un outil flexible avec lequel l'utilisateur peut modifier les paramètres des modèles.

---

8 Degrange et al., 1997.

2.2.2. Déroulement des calculs de risque vie entière de mortalité par cancer radio-induit associé à l'exposition d'un individu à un rayonnement de faible transfert linéique d'énergie délivré à faible dose et débit de dose.

Comme le montre la Figure 7, le calcul de risque avec le logiciel ASQRAD passe par la sélection (si les paramètres sont définis par défaut) ou par la définition sur un écran de visualisation :

- 1) des paramètres caractérisant le type d'exposition (uniforme au corps entier ou par organe), l'individu (âge à l'exposition et sexe), et la distribution des doses moyennes aux organes considérés par le modèle de risque (ou la dose au corps entier si l'exposition est uniforme au corps entier),
- 2) d'un modèle de risque vie entière, c'est-à-dire l'association des modèles exposition-risque spécifiques par type de cancer et des hypothèses du calcul concernant les méthodes de projection du risque sur la vie entière et de transfert de risque entre populations,
- 3) des données caractérisant l'origine démographique de la population exposée, c'est-à-dire, les taux de mortalité de base pour chaque type de cancer considéré par le modèle de risque vie entière et les taux de mortalité générale, qui sont spécifiés par sexe et par tranche d'âge (le logiciel propose des bibliothèques de données),
- 4) des hypothèses relatives aux périodes de latence et au plateau (durée de l'expression du risque) pour chaque siège de cancer considéré par le modèle de risque vie entière sélectionné, et
- 5) du facteur de réduction d'efficacité de la dose et/ou du débit de dose FEDDD.

2.2.3. Définition des indicateurs de risque vie entière

Les aspects relatifs à la définition du risque vie entière ont reçu une attention considérable dès la fin des années 1980<sup>9</sup>. Dans la mesure où les modèles de risque ajustés aux données épidémiologiques et les coefficients de risque correspondants sont disponibles, il est intéressant de disposer d'indicateurs qui résument le détriment sur la vie entière dû à une exposition aux rayonnements ionisants. Il existe deux types de grandeurs<sup>10</sup> qui ont été utilisées par de nombreux organismes : des grandeurs traduisant l'excès de risque de décès sur la vie

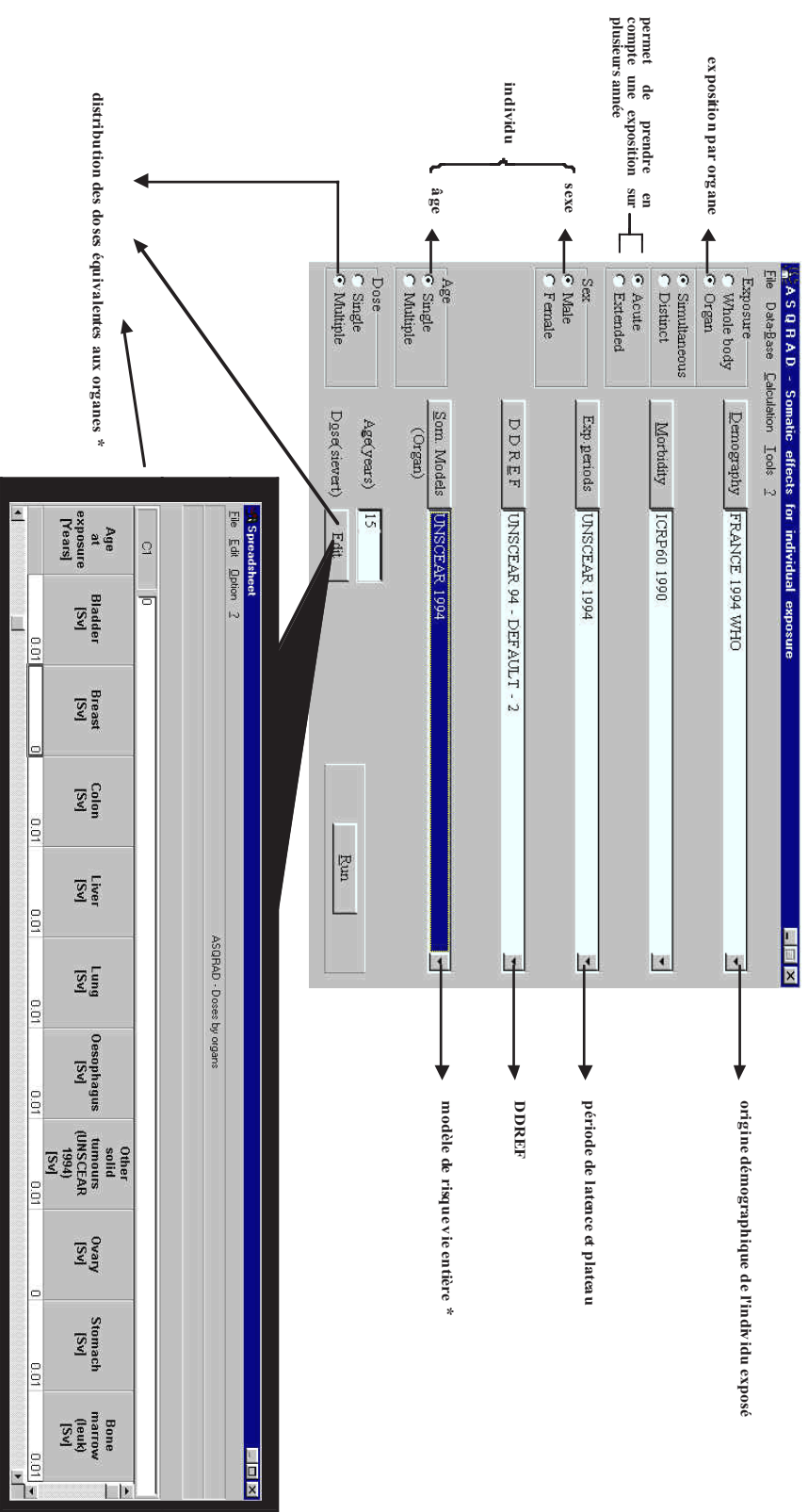
---

9 Pierce et al., 1989.

10 Thomas et al., 1992.

## A1.16

entière et des grandeurs traduisant la réduction de l'espérance de vie. Les calculs de risque vie entière de mortalité par cancer radio-induit effectué avec ASQRAD®, qui sont basés sur des méthodes d'analyse démographique<sup>11</sup>, permettent d'évaluer ces deux types d'indicateurs de risque vie entière. Seul le premier sera décrit ici, puisqu'il s'agit de l'indicateur de risque retenu pour établir le niveau de gravité sur l'échelle.



(\*) Les organes à risque pour lesquels il faut définir la dose équivalente à l'organe correspondant aux types de cancer pour lesquels un modèle exposition-risque spécifique a été établi.

**Figure 7. Illustration de l'écran de visualisation du logiciel ASQRAD® pour entrer les paramètres de la modélisation du risque de décès par cancer radio-induit dans le cas d'un scénario d'exposition d'un individu**





#### 2.2.4. Risque vie entière de décéder d'un cancer radio-induit

Le terme anglais de "risque de décéder d'un cancer radio-induit" est "risk of exposure-induced death" - **REID**. Cette grandeur correspond au risque sur la vie entière pour un individu de sexe "s" et d'origine démographique "pays" de décéder d'un cancer lié à une exposition à l'âge "a". Dans la mesure où plusieurs organes "c" ont été exposés simultanément chacun à des doses moyennes à l'organe "D<sub>c</sub>", le risque total au corps entier, REID<sub>total</sub>, est donné par la somme des risques spécifiques par type de cancer, REID<sub>c</sub>, soit la relation suivante :

$$\text{REID}_{\text{total}} = \sum_c \text{REID}_c$$

Le risque spécifique par type de cancer est égal à la somme cumulée sur la vie entière pour l'individu exposé de l'excès de risque en mortalité par cancer (soit la différence des taux de mortalité, avec et sans exposition) conditionné par sa survie à l'âge considéré. L'expression mathématique du risque vie entière spécifique par type de cancer peut donc s'écrire de la manière suivante :

$$\text{REID}_{s,c}^{\text{mod,pays}}(a_0, D_c) = \int_{a_0}^{\infty} \Delta m_{s,c}^{\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c) \times S_s^{\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c) da \quad (\text{en nombre de cas pour } 100\,000)$$

avec :

$$\Delta m_{s,c}^{\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c) = m_{s,c}^{\text{pays}}(a) \times \Delta \text{RR}_{s,c}^{\text{mod}}(a, a_0, D_c) \quad \text{si le modèle de risque est relatif}$$

$$S_s^{\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c) = \frac{S_s^{\text{mod,pays}}(a, a_0, D_c)}{S_s^{\text{pays}}(a_0)}$$

$$S_s^{\text{mod,pays}}(a, a_0, D_c) = \exp\left\{-\int_0^a m_s^{\text{mod,pays}}(u, a_0, D_c) du\right\}$$

$$S_s^{\text{pays}}(a_0) = \exp\left\{-\int_0^{a_0} m_s^{\text{pays}}(u) du\right\}$$

$$m_s^{\text{mod,pays}}(u, a_0, D_c) = m_s^{\text{pays}}(u) + \Delta m_{s,c}^{\text{mod,pays}}(u|a_0, D_c)$$

où les notations suivantes sont adoptées pour les indices :

**mod** : caractérise le modèle exposition-risque retenu par l'organisme de radioprotection considéré ;

**pays** : caractérise l'origine démographique de l'individu exposé (année de recensement pour les taux de mortalité de base) ;

**c** : caractérise le type de cancer et l'organe/tissu correspondant ;

- s** : caractérise le sexe de l'individu exposé ;  
**\*** : signifie "modifié par l'exposition aux rayonnements ionisants" ;

où les notations suivantes sont adoptées pour les variables :

- a<sub>0</sub>** : âge à l'exposition ;  
**D<sub>c</sub>** : dose équivalente à l'organe ;  
**a** : âge atteint ;  
**u** : âge ;

et où

- $REID_{s,c}^{mod,pays}(a_0, D_c)$  est le risque vie entière de décès par cancer radio-induit qui correspond au modèle de risque "mod" considéré, et qui est spécifique au type de cancer "c" considéré, pour l'individu exposé de sexe "s" et d'origine démographique "pays" ; ces paramètres étant fixés, le REID dépend de l'âge à l'exposition "a<sub>0</sub>" et de la dose équivalente à l'organe "D<sub>c</sub>" ;
- $\Delta m_{s,c}^{mod,pays}(a|a_0, D_c)$  est l'excès de mortalité par cancer radio-induit sachant que l'individu a été exposé à l'âge "a<sub>0</sub>", qui correspond au modèle de risque "mod" considéré, et qui est spécifique au type de cancer "c" considéré, pour l'individu de sexe "s" et d'origine démographique "pays" ; dans le cas d'un modèle exposition-excès de risque multiplicatif (respectivement additif), l'excès de risque relatif  $\Delta RR_{s,c}^{mod}(a, a_0, D_c)$  (respectivement l'excès de risque absolu  $\Delta AR_{s,c}^{mod}(a, a_0, D_c)$ ) peut dépendre de l'âge atteint "a" ou bien de l'âge à l'exposition "a<sub>0</sub>", et dépend de la dose équivalente à l'organe "D<sub>c</sub>" pour le sexe "s" et le type de cancer "c" considérés ;
- $m_{s,c}^{pays}(a)$  est le taux de mortalité<sup>12</sup> de base pour le "pays", le sexe "s" et le type de cancer "c" considérés ; ces paramètres étant fixés, le taux de mortalité dépend de l'âge et il est défini pour une année ou un groupe d'années de recensement ;
- $S_s^{*mod,pays}(a|a_0, D_c)$  est la probabilité conditionnelle de survie à l'âge atteint "a", sachant que l'individu est en vie à l'âge "a<sub>0</sub>", modifiée par l'exposition de l'individu originaire du "pays" considéré, de sexe "s", et qui a été exposé à l'âge "a<sub>0</sub>" à la dose équivalente à l'organe "D<sub>c</sub>";
- $S_s^{*mod,pays}(a, a_0, D_c)$  est la probabilité de survie à l'âge atteint "a" modifiée par l'exposition de l'individu originaire du "pays" considéré, de sexe "s", et qui a été exposé à l'âge "a<sub>0</sub>" à la dose équivalente à l'organe "D<sub>c</sub>" ;

12 Le taux de mortalité spécifique par type de cancer est la probabilité par unité de temps qu'une personne de sexe, d'âge et d'origine démographique donnés décède du type de cancer considéré.

- $S_s^{\text{pays}}(a_0)$  est la probabilité de survie à l'âge à l'exposition " $a_0$ " pour l'individu originaire du "pays" considéré et de sexe "s" ;
- $m_s^{*\text{mod,pays}}(u, a_0 D_c)$  est le taux de mortalité générale à l'âge "u" modifié par l'exposition de l'individu originaire du "pays" considéré, de sexe "s", et qui a été exposé à l'âge " $a_0$ " à la dose équivalente à l'organe " $D_c$ " ;
- $m_s^{\text{pays}}(u)$  est le taux de mortalité générale de base à l'âge "u" de l'individu originaire du "pays" considéré et de sexe "s".

L'indicateur du REID ne donne pas d'indications sur l'âge au décès. Il représente simplement le risque de décéder d'un cancer dû à une exposition particulière plutôt que de décéder de n'importe quelle autre cause. C'est pourquoi, une information un peu plus complète est donnée par la courbe de variation du risque de mortalité par cancer radio-induit en fonction de l'âge atteint "a", donnée par  $\Delta m_{s,c}^{\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c) \times S_s^{*\text{mod,pays}}(a|a_0, D_c)$ . C'est "**la densité de probabilité de l'âge au décès**", normalisée de façon à ce que la surface délimitée par la courbe soit égale au risque vie entière de décéder d'un cancer radio-induit, REID.

Les Tableaux synoptiques 3a, 3b et 3c ci-après répertorient l'ensemble des caractéristiques pour les modèles de risque vie entière développés par les organismes de radioprotection internationaux tels que la CIPR [ICRP, 1991] et l'UNSCEAR [UNSCEAR, 1994]<sup>13</sup>, et par les organismes nationaux tels que le BEIR [BEIR V, 1990]<sup>14</sup> et le NRPB [NRPB, 1993]<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> Le modèle UNSCEAR 1994 est défini dans le logiciel ASQRAD®.

<sup>14</sup> Le modèle BEIR V est défini dans le logiciel ASQRAD®.

<sup>15</sup> Le modèle NRPB 1993 est défini dans le logiciel ASQRAD®.



**Tableau 3(a) : Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du BEIR [BEIR V, 1990]**

Siège de cancer <u>ou</u> "groupe" de cancers (code No 8 de la classification internationale des causes de décès [ICD, 1967])	Données épidémiologiques de base	Dépendance de l'excès de risque relatif, ARR	Forme de la relation dose-réponse	Latence et Plateau	Méthode de projection du risque sur la vie entière	Méthode de transfert de risque entre populations	FEDDD
Leucémie (ICD 204-207)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	(i) âge à l'exposition, $a_0$ (ii) sexe, $s$ (iii) temps écoulé depuis l'exposition, $t$ (iv) dose pondérée, $D$ (en Sv)	Linéaire, $L$ ou Linéaire Quadratique, $LQ$	2 et 27 ans	Multiplicatif $\otimes$ ou Additif $\oplus$	Multiplicatif $\otimes$ ou Additif $\oplus$	Aucun
Cancer du sein (femme) (ICD 174)	<ul style="list-style-type: none"> <li>LSS 1950-85 / M [Shimizu et al., 1987]</li> <li>Canadian Fluoroscopy Study 1950-80 / M [Miller et al., 1989]</li> <li>3 études en incidence [cf. Tableau 4<sup>E</sup>-1 p.208 : BEIR V, 1990]</li> </ul>	ARR( $D, a_0, t$ )	L	10 et 100 ans	Aucune	$\otimes$	Aucun
Cancers du système digestif (ICD 150-159)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	ARR $_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	$\otimes$ constante	$\otimes$	Aucun
Cancers du système respiratoire (ICD 160-163)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	ARR $_s(D, t)$	L	10 et 100 ans	Aucune	$\oplus$ préférable	Aucun
Autres cancers (ICD 140-209 autres que ceux listés ci-dessus)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	ARR( $D, a_0$ )	L	10 et 100 ans	$\otimes$ constante	$\otimes$	Aucun

**Tableau 3(b) : Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer de la CIPR 60 [ICRP, 1991]**

Siège de cancer <u>ou</u> "groupe" de cancers	Données épidémiologiques de base	Dépendance de l'excès de risque relatif, $ARR$ , <u>ou</u> de l'excès de risque absolu, $\Delta AR$ (en $10^{-4}$ PY Sv) <sup>-1</sup>	Forme de la relation dose-réponse	Latence et Plateau	Méthode de projection du risque sur la vie entière	Méthode de transfert de risque entre populations	FEDDD
Leucémie	LSS 1950-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_{s,a0}(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	2 et 40 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Esophage	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_s(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Estomac	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_{s,a0}(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Côlon	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_{s,a0}(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Poumon	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_{s,a0}(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Vessie	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Sein (femme)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_{s,a0}(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Ovaire	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1988]	$ARR_s(D)$ et $\Delta AR_{s,a0}(D)$	L	10 et 100 ans	⊗ constant	⊗ et ⊕ (NIH)	2
Foie	M estimé (fort TEL) [BEIR V, 1990]	Risque vie entière de cancer mortel à faible dose = constante = $0,15 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$					
Thyroïde	M [NCRP, 1985]	Risque vie entière de cancer mortel à faible dose = constante = $0,075 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$					
Surface de l'os	M estimé (1 et fort TEL) [BEIR IV, 1988]	Risque vie entière de cancer mortel à faible dose = constante = $0,047 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$					
Peau	M estimé (1) [ICRP, 1991]	Risque vie entière de cancer mortel à faible dose = constante = $0,02 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$					

**Tableau 3(c) : Spécifications des modèles de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du NRPPB [NRPPB, 1993]**

Siège de cancer <u>ou</u> "groupe" de cancers	Données épidémiologiques de base	Dépendance de l'excès de risque relatif, $ARR$ , <u>ou</u> de l'excès de risque absolu, $AAR$ (en $10^{-4}$ PY Sv) <sup>-1</sup>	Forme de la relation dose-réponse	Latence et Plateau	Méthode de projection du risque sur la vie entière	Méthode de transfert de risque entre populations	FEDDD	
Leucémie (leucémie lymphatique chronique exclue)	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]		$ARR_{a_0,t}(D)$	LQ	2 et 40 ans	Aucune	⊗	Aucun
Sein (femme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Massachusetts Fluoroscopy Study / M [Hrubec et al., 1989]</li> <li>N.Y. Postpartum Mastitis Study / I [Shore et al., 1986]</li> </ul>		$ARR(D, a_0)$ [Stather et al., 1988] [Gilbert, 1985]	L	10 et 100 ans	⊗ constante	⊗	2
Poumon	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]		$ARR_s(D, t)$	L	10 et 100 ans	Aucune	⊗	2
Thyroïde	Rochester Thyms Study / I [Shore et al., 1985]		$AAR(D, a_0)$ [NCRP, 1985]	L	5 et 100 ans	⊕ constante	⊗	2
Os	German patients with intakes of <sup>224</sup> Ra / M [BEIR IV, 1988]		$AAR(D)$	L	2 et 40 ans	⊕ constante	⊗	1
Foie	European patients given Thorotrast [BEIR IV, 1988]		$AAR(D)$	L	20 et 100 ans	⊕ constante	⊗	2
Côlon	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]		$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	⊗ constante	⊗	2

**Tableau 3(c) suite : Spécifications des modèles de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer du NRPPB [NRPPB, 1993]**

Siège de cancer <u>ou</u> "groupe" de cancers	Données épidémiologiques de base	Dépendance de l'excès de risque relatif, $\Delta RR$ , <u>ou</u> de l'excès de risque absolu, $\Delta AR$ (en $10^{-4}$ PY Sv) <sup>-1</sup>	Forme de la relation dose- réponse	Latence et Plateau	Méthode de projection du risque sur la vie entière	Méthode de transfert de risque entre populations	FEDDD
Estomac	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	$\Delta RR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	⊗ constante Additif ⊕	⊗ Additif ⊕	2
Peau	North American children irradiated for ringworm of the scalp / I : [BEIR III, 1980] et [Shore et al., 1984]	$\Delta AR(D)$	L	10 et 100 ans	⊕ constante	⊗	2
Autres - "Remainder"	LSS 1956-85 / M [Shimizu et al., 1987]	$\Delta RR(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	⊗ constante	⊗	2



**Tableau 3(d) : Spécifications des modèles mathématiques de calcul du risque vie entière spécifique par type de cancer de l'UNSCEAR de 1994 [UNSCEAR, 1994]**

Siège de cancer ou "groupe" de cancers	Données épidémiologiques de base	Dépendance de l'excès de risque relatif, $ARR$ , ou de l'excès de risque absolu, $ARR$ (en $10^{-4}$ PY Sv) <sup>-1</sup>	Forme de la relation dose-réponse	Latence et Plateau	Méthode de projection du risque sur la vie entière	FEDDD
Leucémie	LSS 1950-87 / I [Preston et al., 1994]	$ARR_s(D, t)$	LQ	2 et 100 ans	Aucune	Aucun
Œsophage	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Estomac	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Colon	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Foie	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Poumon	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Vessie	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Sein (femme)	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
Ovaire	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré
"Autres" tumeurs solides	LSS 1950-87 / M [Ron et al., 1994]	$ARR_s(D, a_0)$	L	10 et 100 ans	3 méthodes	2 suggéré



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**Arlie Conference, 1999**] Bridging Radiation Policy and Science. Conclusions of the Arlie Conference. Warrenton, Virginie, USA, 1-5 Décembre 1999.

[**BEIR V, 1990**] Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR V). Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. United States National Academy of Sciences, National Research Council. National Academy Press, Washington. 1990.

[**BEIR IV, 1988**] Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR IV). Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters. United States National Academy of Sciences, National Research Council. National Academy Press, Washington. 1988.

[**Degrange et al., 1997**] Degrange J.P., Schneider T., Muirhead C., Haylock R. ASQRAD : un logiciel pour l'évaluation du risque radiologique, Radioprotection. 32(2):237-244. 1997.

[**Hrubec et al., 1989**] Hrubec Z., Boice J., Monson R. and Rosenstein M. Breast Cancer after multiple Chest Fluoroscopies: Second follow-up of Massachusetts Women with Tuberculosis. Cancer Res. 49:229-234. 1989.

[**ICD, 1967**] Eighth Revision International Classification of Diseases. Vol. 1. Public Health Service Publication No. 1639, Washington, D.C. Government Printing Office. 1967.

[**ICRP, 1991**] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1990. ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford, UK. 1991.

[**Miller et al., 1989**] Miller A.B., Howe G.R., Sherman G.J., Lindsay J.P., Yaffe M.J., Dinner P.J., Risch H.A. and Preston D.L. Mortality from Breast Cancer after Irradiation during Fluoroscopic Examination in Patients being treated for Tuberculosis. N Engl J Med. 9;321(19):1285-9. 1989.

[**NCRP, 1985**] National Council on Radiation Protection and Measurements. Induction of Thyroid Cancer by ionising Radiation. NCRP Report No. 80. NCRP, Bethesda, MD, USA. 1985.

[**NRPB, 1993(a)**] National Radiological Protection Board. Occupational, Public and Medical Exposure. NRPB, Chilton, UK. 4(2). 1993.

[**Pierce et al., 1989**] Pierce D.A. and Vaeth M. Cancer Risk Estimation from the A-Bomb Survivors: Extrapolation to Low Doses, Use of relative Risk Models and other Uncertainties. In Low Dose Radiation: Biological Bases of Risk Assessment (K.F. Baverstock and J.W. Stather, Eds.). London, Taylor and Francis. 1989.

[**Pierce, Preston, 2000**] Radiation-Related Cancer Risks at Low Doses among Atomic Bomb Survivors. Radiation Research, Volume 154, N°2, pp.178-186, 2000.

[**Pressat, 1983**] Pressat R. L'analyse démographique. Concepts – Méthodes – Résultats. Presses Universitaires de France, Paris, 1983.

**[Preston et al., 1994]** Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M. et al. Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part III: Leukaemia, Lymphoma and multiple Myeloma, 1950-87. RERF TR/24-92. 1992 and Radiat Res. 137:S68-S97. 1994.

**[Ron et al., 1994]** Ron E., Preston D.L., Mabuchi K. et al. Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part IV: Comparison of Cancer Incidence and Mortality. Radiat. Res. 137:S98-S112. 1994.

**[Shimizu et al., 1987]** Shimizu Y., Kato H., Schull W.J., Preston D.L., Fujita S. and Pierce D.A. Life Span Study Report 11, Part 1. Comparison of Risk Coefficients for Site-Specific Cancer Mortality Based on the DS86 and T65DR Shielded Kerma and Organ Doses. Technical Report RERF TR 12-87. Hiroshima Radiation Effects Research Foundation. 1987.

**[Shimizu et al., 1988]** Shimizu Y., Kato H. and Schull W.J. Life Span Study Report 11, Part 2. Cancer Mortality in the Years 1950-85 Based on the Recently Revised Doses (DS86). Technical Report RERF TR 5-88. Hiroshima Radiation Effects Research Foundation. 1988.

**[Shore et al., 1984]** Shore R.E., Albert R.E., Reed M., Harley N. and Pasternack B.S. Skin Cancer Incidence among Children irradiated for Ringworm of the Scalp. Radiat. Res. 100:192-204. 1984.

**[Shore et al., 1985]** Shore R.E., Woodard E., Hildreth N., Dvoretzky P., Hempelmann L. and Pasternack B. Thyroid Tumours following Thymus Irradiation. J. Natl. Cancer Inst. 74:1177-1184. 1985.

**[Shore et al., 1986]** Shore R.E., Hildreth N., Woodward E., Dvoretzky P., Hempelmann L. and Pasternack B. Breast Cancer among Women given X-ray Therapy for acute Postpartum Mastitis. J. Natl. Cancer Inst. 77:689-696. 1986.

**[Thomas et al., 1992]** Thomas D., Darby S., Fagnani F., Hubert P., Vaeth M. and Weiss K. Definition and Estimation of Lifetime Detriment from Radiation Exposures: Principles and Methods. Health Phys. 63(3):259-272. 1992.

**[UNSCEAR, 1994]** United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York. 1994.

**[UNSCEAR, 2000(a)]** United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Volume I: Sources, United Nations, New York. 2000.

**[UNSCEAR, 2000(b)]** United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Volume II: Effects. United Nations, New York. 2000.

**[Wingspread Conference, 1997]** « Creating a Strategy for Science-Based National Strategy : Addressing Conflicting Views on the Health Risks of Low Level Ionizing Radiation ». Conclusions of the Wingspread Conference, Wisconsin, USA, July-August 1997.

**RAPPORT N° 276**

**PROPOSITION D'UNE  
ECHELLE DE CLASSEMENT DES INCIDENTS  
ET ACCIDENTS RADIOLOGIQUES**

**ANNEXE 2**

**Méthode et outils disponibles pour le calcul  
du risque d'apparition des effets déterministes  
en fonction de la dose et du débit de dose**

**(Modèle du NRPB 1996)**

---

*Pascal CROÛAIL, David COLLIN, Christian LEFAURE*



## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>METHODE DE CALCUL DU RISQUE</b>	<b>1</b>
1.1.	Rappel sur l'origine, la nature et la classification des effets déterministes	1
1.2.	Seuil et fréquence d'apparition des effets déterministes	3
1.3.	Calcul de la probabilité d'apparition de l'effet par le modèle du NRPB	6
1.4.	Variation du seuil de risque en fonction de dose	7
<b>2.</b>	<b>LES ABAQUES PERMETTANT DE DETERMINER LE RISQUE POUR UN EFFET DÉTERMINISTE, UNE DOSE ET UN DEBIT DE DOSE DONNÉS</b>	<b>9</b>
2.1.	<b>Les effets non létaux non invalidants</b>	<b>10</b>
2.1.1.	Vomissements et diarrhées	10
2.1.2.	Hypothyroïdie	12
2.1.3.	Thyroïdite	13
2.1.4.	Brûlure légère de la peau (érythème, œdème)	14
2.2.	<b>Les effets non létaux invalidants</b>	<b>15</b>
2.2.1.	Arrêt de la spermatogenèse	15
2.2.2.	Arrêt de l'ovogenèse	17
2.2.3.	Opacité et cataracte	19
2.2.4.	Fibrose pulmonaire	21
2.2.5.	Brûlure sévère de la peau (ulcération, nécrose)	22
2.2.6.	Retard mental sévère chez le fœtus	23
2.2.7.	Réduction de la circonférence de la tête (microcéphalie)	26
2.3.	<b>Les effets létaux</b>	<b>27</b>
2.3.1.	Le syndrome hématopoïétique	27
2.3.2.	Le syndrome gastro-intestinal	30
2.3.3.	Le syndrome pulmonaire	32
2.3.4.	Mortalité de l'embryon et du fœtus	33
2.4.	<b>Valeurs de <math>D_1</math>, <math>D_5</math>, <math>D_{50}</math> et <math>D_{100}</math> pour les différents effets déterministes létaux et non létaux</b>	<b>36</b>





**LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES**

<b>Figure A :</b>	<b>Variation de la gravité de l'effet en fonction de la dose</b>	<b>3</b>
<b>Figure B :</b>	<b>Construction de la courbe dose-fréquence</b>	<b>4</b>
<b>Figure C :</b>	<b>Pourcentage de la population présentant l'effet</b>	<b>5</b>
<b>Tableau A2.1. :</b>	<b>Valeurs de <math>D_1</math>, <math>D_5</math>, <math>D_{50}</math> et <math>D_{100}</math> pour les différents effets déterministes létaux et non létaux</b>	<b>36</b>



## ANNEXE 2

### **METHODE ET OUTILS DISPONIBLES POUR LE CALCUL DU RISQUE D'APPARITION DES EFFETS DETERMINISTES EN FONCTION DE LA DOSE ET DU DEBIT DE DOSE (Modèle du NRPB 1996<sup>1</sup>)**

DETERMINISTE : "déterminé de manière causale par des événements antérieurs"

#### **1. METHODE DE CALCUL DU RISQUE**

##### **1.1. Rappel sur l'origine, la nature et la classification des effets déterministes**

Lors de l'interaction entre les rayonnements ionisants et l'organisme, le dépôt d'énergie est un processus aléatoire. Cependant, **à un certain niveau de dose**, il peut y avoir un taux important de létalité cellulaire pouvant entraîner des changements tissulaires cliniquement détectables **à court terme** (de quelques heures à un mois après l'irradiation).

La réponse du tissu à une irradiation, qu'elle soit globale ou bien partielle, dépend du taux de survie des cellules qui le constituent et donc de leur radiosensibilité. La destruction d'une quantité importante de cellules, telle qu'elle ne peut être compensée par une prolifération des cellules viables, peut conduire à des altérations anatomiques et/ou fonctionnelles sévères et cliniquement détectables. L'effet pathologique ainsi détecté sera appelé effet déterministe.

La littérature décrit deux types d'effets déterministes :

- Les effets non létaux, c'est-à-dire ceux qui ne mettent pas en jeu le pronostic vital de la personne exposée,
- Les effets létaux, c'est-à-dire ceux qui peuvent entraîner la mort de la personne exposée.

---

<sup>1</sup> NRPB. Risk from Deterministic Effects of Ionising Radiation, Document of the NRPB volume 7 n°3, 1996.

Dans ce rapport, une distinction supplémentaire a été faite afin de subdiviser le groupe des effets non létaux en deux sous-groupes selon qu'ils sont considérés comme invalidants ou non.

Les effets non létaux invalidants sont des effets dont la réversibilité peut s'avérer difficile voire impossible et qui donnent lieu à de fortes altérations de fonctionnalités. Ces séquelles<sup>2</sup> sont invalidantes pour la personne exposée et la pénalisent fortement dans son comportement, ses capacités fonctionnelles et ses relations.

La liste suivante regroupe les principaux effets déterministes en fonction de la classification adoptée. Elle regroupe non seulement les effets pour les personnes exposées mais aussi les effets tératogènes, c'est-à-dire les effets de l'irradiation sur l'embryon et le fœtus durant la grossesse (en italique).

### Les effets non létaux non-invalidants

- Vomissements<sup>3</sup>
- Diarrhées<sup>3</sup>
- Hypothyroïdie
- Thyroïdite
- Brûlures de la peau<sup>3</sup>

### Les effets non létaux invalidants

- Arrêt de l'ovogenèse
- Arrêt de la spermatogenèse
- Cataracte
- Fibrose pulmonaire
- Retard mental sévère*
- Réduction de la circonférence de la tête*

---

<sup>2</sup> Lésion et/ou manifestation fonctionnelle qui persiste après la guérison d'une maladie ou après une blessure (Larousse 2000).

<sup>3</sup> Cet effet non-invalidant peut être, dans certains cas, précurseur et donc annonciateur d'un effet déterministe plus grave.

### Les effets létaux

Syndrome d'irradiation de la moelle osseuse

Syndrome d'irradiation pulmonaire

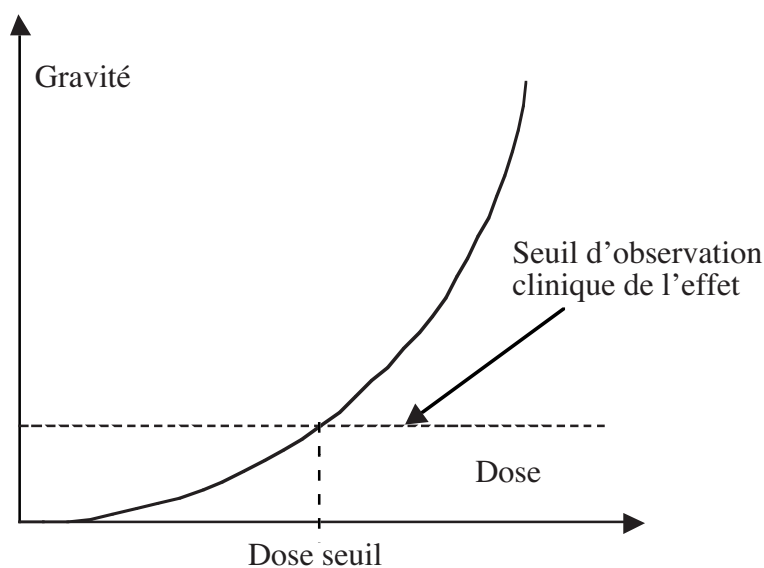
Syndrome gastro-intestinal

*Mort de l'embryon*

### **1.2. Seuil et fréquence d'apparition des effets déterministes**

Il existe aujourd'hui un consensus scientifique sur l'existence de doses seuils au-dessous desquelles les effets déterministes n'apparaissent jamais. La valeur du seuil est spécifique à un effet déterministe.

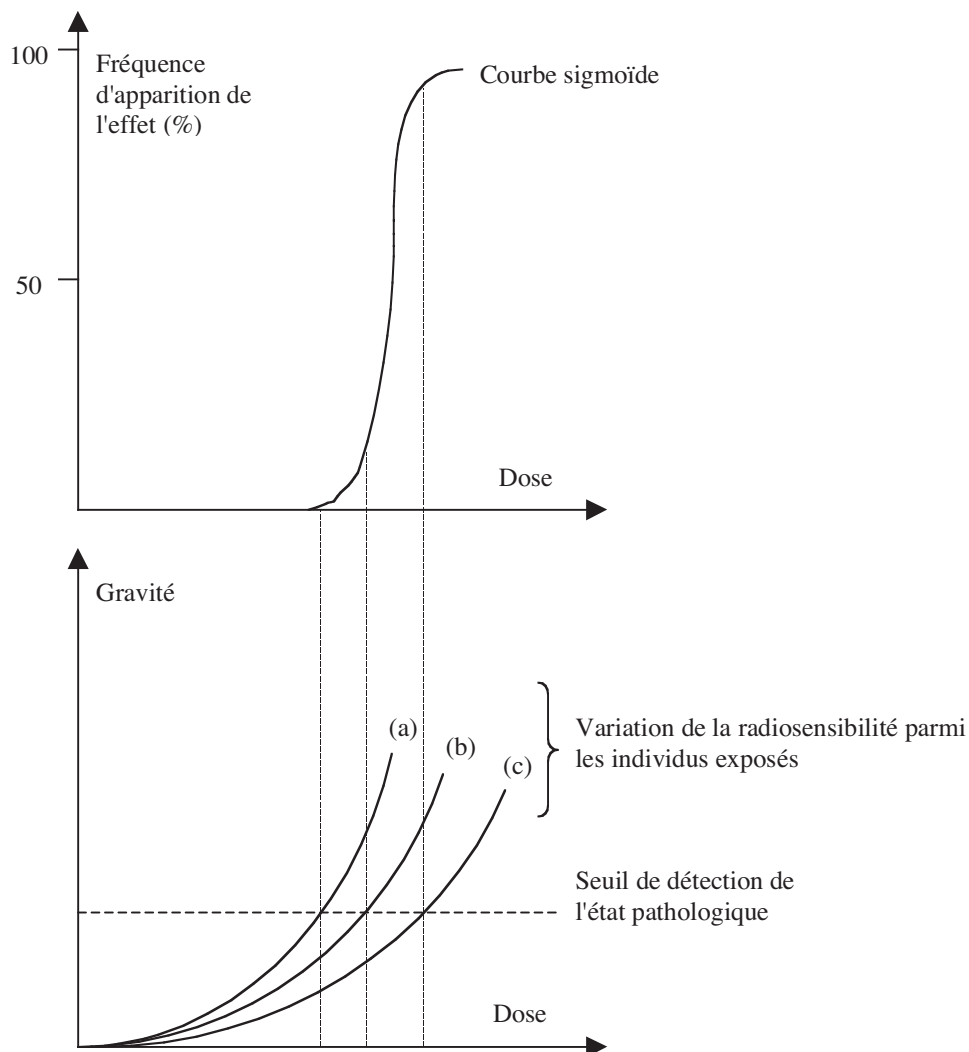
Au-dessous de ce seuil, les altérations morphologiques ou fonctionnelles des tissus sont réversibles. En effet, les cellules souches, demeurées intactes, vont peu à peu repeupler le tissu lésé. Au-delà de ce seuil, la fréquence, le délai d'apparition de l'effet, voire sa gravité augmentent avec à la dose pour une population donnée.



**Figure A. Variation de la gravité de l'effet en fonction de la dose**

À l'échelle d'une population, les effets déterministes ne suivent pas une loi du tout ou rien. La répartition des doses seuil dans une population obéit à une relation sigmoïde (coordonnées linéaires), l'effet devenant plus fréquent au fur et à mesure que la dose augmente, la fréquence tendant vers zéro quand la dose diminue.

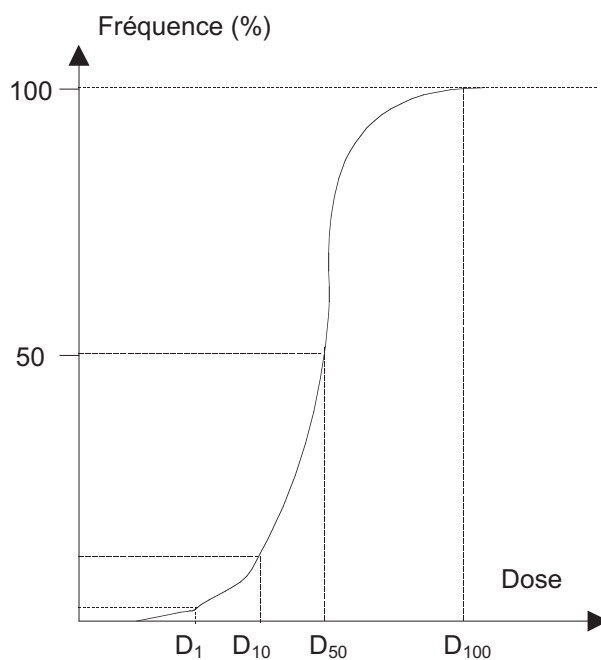
La Figure B, ci-dessous, dans sa partie supérieure, illustre la façon dont la fréquence d'un effet déterministe particulier, défini comme une condition pathologique cliniquement reconnaissable, augmente en fonction de la dose dans une population d'individus de radiosensibilités variables.



**Figure B. Construction de la courbe dose-fréquence**

La partie inférieure de la Figure B représente la relation dose - sévérité (ou dose - gravité) pour une population présentant, pour simplifier, trois niveaux différents de radiosensibilité. Le seuil de détection de l'état pathologique est atteint pour une dose plus faible pour les individus du sous groupe le plus sensible (courbe a) que pour ceux des sous groupes les moins sensibles (courbes b et c).

Sur la partie supérieure de la Figure B, on peut donc définir des valeurs de dose  $D_1$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{100}$  telles qu'un pourcentage de 1%, 10% ou 100% de la population irradiée développe l'effet déterministe considéré.



**Figure C. Pourcentage de la population présentant l'effet**

La valeur du seuil varie selon :

- L'effet considéré qui est directement lié à la radiosensibilité du tissu et/ou de l'organe irradié.
- La distribution de la dose dans le temps autrement dit le débit de dose.

### 1.3. Calcul de la probabilité d'apparition de l'effet par le modèle du NRPB

Le NRPB (National Radiological Protection Board, Royaume-Uni) a publié en 1996 une synthèse sur les effets déterministes et décrit un modèle de calcul du risque qui tient compte de l'ensemble des connaissances disponibles à ce jour.

Dans ce rapport la formulation du risque dans une population exposée est donnée par :

$$R = 1 - e^{-H} \quad (1)$$

où la fonction hasard H est estimée selon :

$$H = \ln 2 \cdot \int \left( \frac{\mathcal{D} dt}{D_{50}(\mathcal{D})} \right)^{\nu} \quad (2)$$

avec

- $\mathcal{D}$  : débit de dose en Sv/h
- $D_{50}$  : dose à laquelle 50 % de la population exposée développe l'effet
- $\nu$  : facteur d'ajustement

équation qui se réduit à :

$$H = \ln 2 \cdot \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^{\nu} \quad (3)$$

lorsque le débit de dose  $\mathcal{D}$  est constant.

La relation entre  $D_{50}$  et le débit de dose  $\mathcal{D}$  en Gy/h est donnée par :

$$D_{50}(\mathcal{D}) = \theta_{\infty} + \frac{\theta_1}{\mathcal{D}} \quad (4)$$

avec

- $\theta_{\infty}$  : valeur en Gy de  $D_{50}$  pour une exposition instantanée (débit de dose infini)
- $\theta_1$  : en Gy<sup>2</sup>/h qui traduit l'augmentation de  $D_{50}$  avec la diminution du débit de dose

**Important** : Les probabilités d'apparition d'effets déterministes données dans la partie 2 de cette annexe ne sont valables que pour les rayonnements à faible transfert linéique d'énergie (TLE) : les photons, par exemple. Pour certains effets et pour les



rayonnements à fort TLE (particules alpha, neutrons),  $D$  doit être remplacée par  $EBR^4 \times D$  dans l'équation (3) et  $\mathcal{D}$  par  $EBR \times \mathcal{D}$  dans l'équation (4). Des valeurs d'EBR [NRPB] à appliquer pour les rayonnements de plus fort TLE (particules alpha, neutrons) sont données en partie 2 de cette annexe.

Les valeurs des paramètres utilisés sont celles recommandées par le NRPB. Les tableaux et figures dans la partie 2 de cette annexe correspondent à ces valeurs des paramètres. Si d'autres valeurs plus récentes ou plus consensuelles, devaient finalement être retenues, il conviendrait de refaire les calculs de risque correspondants. Ceci ne remettrait pas en cause les principes d'élaboration des échelles évoqués précédemment.

#### **1.4. Variation du seuil de risque en fonction du débit de dose**

Comme on peut le constater dans le détail des calculs du risque décrits ci-dessus, le débit de dose influence la fréquence d'apparition d'un effet déterministe dans une population irradiée mais également le niveau du seuil.

Le seuil absolu, pour un effet déterministe précis, est donné dans les tables (NRPB) pour un débit de dose infini ( $D_\infty$ ) ou dose "flash". Une diminution du débit de dose, pour une dose constante, conduit à l'abaissement :

- du seuil absolu,
- de la fréquence d'apparition de l'effet considéré,
- une augmentation du temps de latence entre l'exposition et la manifestation clinique de l'effet.

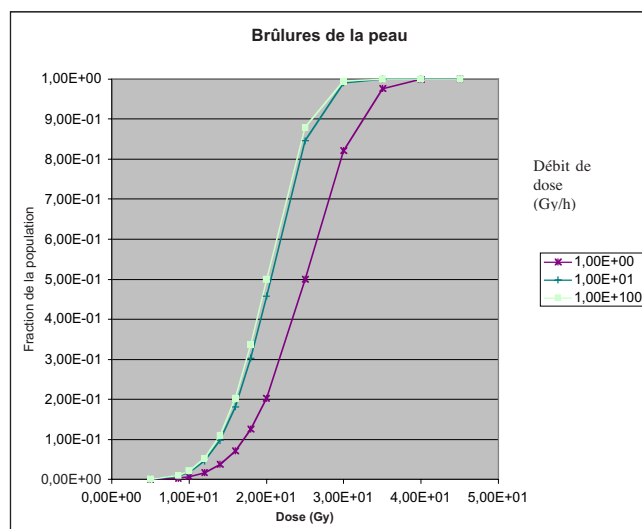
D'où l'intérêt d'avoir des abaques montrant la fréquence d'apparition d'un effet donné pour une dose et un débit de dose précis.

---

<sup>4</sup> EBR : Efficacité Biologique Relative

## A2.8

Exemple : Si on considère l'effet brûlure de la peau, on obtiendra  $D_{10} = 13,7$  Gy pour un débit de dose infini mais pour un débit de dose de 1 Gy/h la probabilité d'apparition de l'effet dans 10% de la population correspond à une dose de 17,2 Gy environ ( $D_{10} = 17,2$  Gy).



Le graphique ci-contre montre la variation de la fréquence d'apparition d'une brûlure de la peau dans la population en fonction de la dose et du débit de dose (ici 1, 10 et 100 Gy/h).

## **2. LES ABAQUES PERMETTANT DE DETERMINER LE RISQUE POUR UN EFFET DETERMINISTE, UNE DOSE ET UN DEBIT DE DOSE DONNES**

Les courbes et les tableaux qui leurs sont associés, présentés dans ce rapport, permettent de déterminer le risque (i.e. la probabilité d'apparition d'un effet déterministe donné, touchant un organe donné) pour un individu en fonction de la dose reçue et du débit de dose auquel il a été exposé.

Afin de faciliter le passage des informations concernant l'exposition aux niveaux de gravité sur l'échelle, les zones correspondantes aux probabilités d'apparition des effets retenues pour l'échelle sont colorées de façons différentes.

Ainsi la zone où la probabilité d'apparition de l'effet est inférieure à 1 % n'est pas colorée.

La zone où la probabilité d'apparition de l'effet est supérieure ou égale à 1 % et inférieure à 5 % est colorée en jaune.

La zone où la probabilité d'apparition de l'effet est supérieure ou égale à 5 % et inférieure à 50 % est colorée en orange clair.

La zone où la probabilité d'apparition de l'effet est supérieure ou égale à 50 % est colorée en orange foncé.

Le choix de mettre en évidence les niveaux de risque  $D_5$  et  $D_{50}$  provient du fait qu'ils sont utilisés comme bornes dans le système proposé dans ce rapport pour déterminer l'« indice de risque » d'un événement d'exposition. Un tableau récapitulatif donne les valeurs de  $D_1$ ,  $D_5$ ,  $D_{50}$ , et  $D_{100}$  pour les différents types d'effets déterministes au § 2.4.

## 2.1. Les effets non létaux non invalidants

### 2.1.1. Vomissements et diarrhées

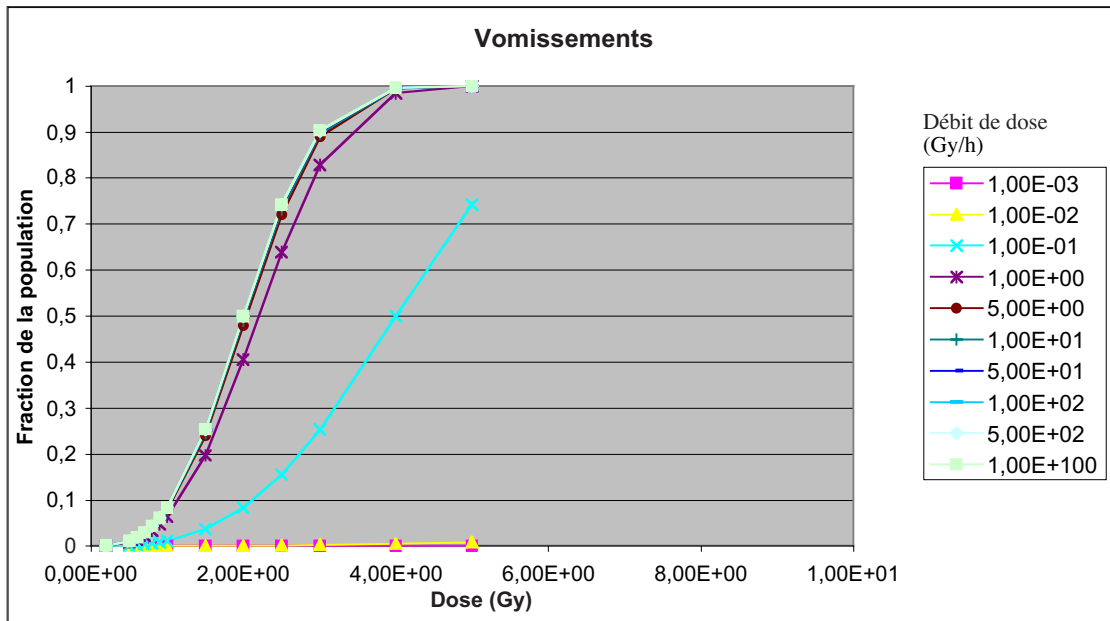
Ces deux effets font partie d'un groupe de symptômes associés appelé "**phase prodromique**" du syndrome de radioexposition aiguë. Cette phase regroupe les symptômes d'effets gastro-intestinaux aigus (anorexie, nausées, vomissements, diarrhées, douleurs intestinales, et salivation) auxquels peuvent s'ajouter des symptômes nerveux (fatigue, maux de tête, apathie et transpiration). Cette phase est transitoire et intervient après un temps de latence d'environ deux heures après une brève irradiation (seuil  $\approx 0,5$  Gy) de l'abdomen.

#### Vomissements

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (alpha)	$D_1$ Gy
2	0,2	3	-	0,49

Dose (Gy)	2,00E-01	5,00E-01	6,00E-01	7,00E-01	8,00E-01	9,00E-01	1,00E+00	1,50E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00	4,00E+00	5,00E+00
1,00E-03	6,73E-10	1,05E-08	1,82E-08	2,88E-08	4,31E-08	6,13E-08	8,41E-08	2,84E-07	6,73E-07	1,31E-06	2,27E-06	5,38E-06	1,05E-05
1,00E-02	5,21E-07	8,14E-06	1,41E-05	2,23E-05	3,33E-05	4,75E-05	6,51E-05	2,20E-04	5,21E-04	1,02E-03	1,76E-03	4,16E-03	8,10E-03
1,00E-01	8,66E-05	1,35E-03	2,34E-03	3,71E-03	5,53E-03	7,86E-03	1,08E-02	3,59E-02	8,30E-02	1,56E-01	2,54E-01	5,00E-01	7,42E-01
1,00E+00	5,21E-04	8,10E-03	1,40E-02	2,21E-02	3,28E-02	4,63E-02	6,30E-02	1,97E-01	4,06E-01	6,38E-01	8,28E-01	9,84E-01	1,00E+00
5,00E+00	6,53E-04	1,02E-02	1,75E-02	2,76E-02	4,09E-02	5,78E-02	7,84E-02	2,41E-01	4,80E-01	7,21E-01	8,90E-01	9,95E-01	1,00E+00
1,00E+01	6,73E-04	1,05E-02	1,80E-02	2,84E-02	4,21E-02	5,95E-02	8,07E-02	2,47E-01	4,90E-01	7,31E-01	8,97E-01	9,95E-01	1,00E+00
5,00E+01	6,89E-04	1,07E-02	1,84E-02	2,91E-02	4,31E-02	6,09E-02	8,25E-02	2,52E-01	4,98E-01	7,40E-01	9,02E-01	9,96E-01	1,00E+00
1,00E+02	6,91E-04	1,07E-02	1,85E-02	2,92E-02	4,33E-02	6,10E-02	8,28E-02	2,53E-01	4,99E-01	7,41E-01	9,03E-01	9,96E-01	1,00E+00
5,00E+02	6,92E-04	1,08E-02	1,85E-02	2,93E-02	4,34E-02	6,12E-02	8,29E-02	2,53E-01	5,00E-01	7,42E-01	9,03E-01	9,96E-01	1,00E+00
1,00E+100	6,93E-04	1,08E-02	1,85E-02	2,93E-02	4,34E-02	6,12E-02	8,30E-02	2,54E-01	5,00E-01	7,42E-01	9,04E-01	9,96E-01	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50

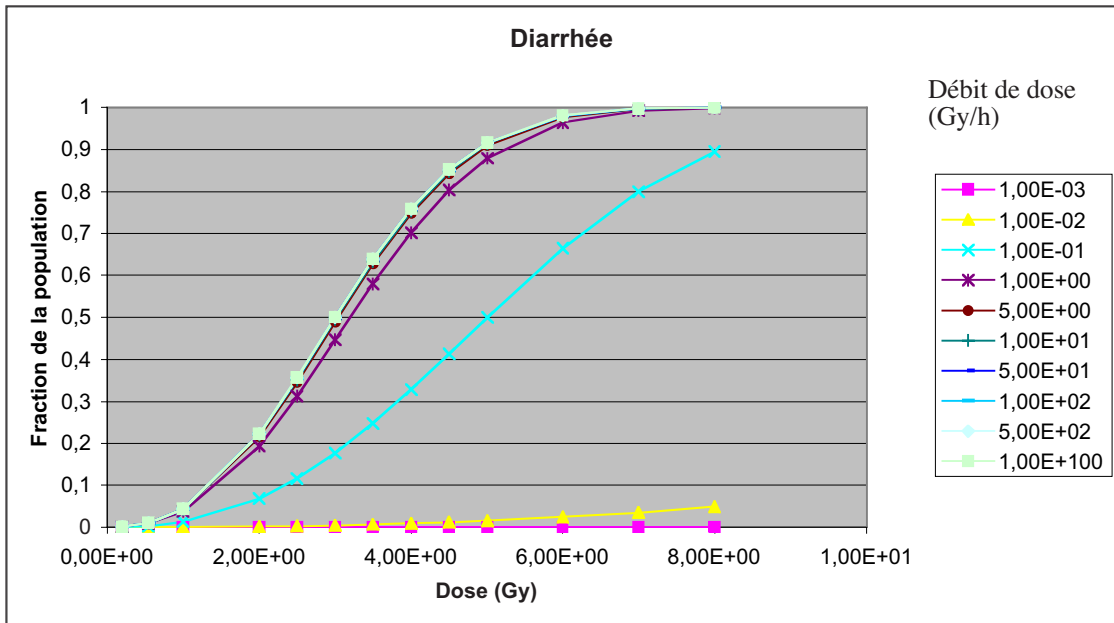


Diarrhées

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy2/h	$\nu$	EBR (alpha)	$D_1$ Gy
3	0,2	2,5	-	0,55

Dose (Gy)	2,00E-01	5,50E-01	1,00E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00	3,50E+00	4,00E+00	4,50E+00	5,00E+00	6,00E+00	7,00E+00	8,00E+00
1,00E-03	2,11E-08	2,65E-07	1,18E-06	6,68E-06	1,17E-05	1,84E-05	2,71E-05	3,78E-05	5,07E-05	6,60E-05	1,04E-04	1,53E-04	2,14E-04
1,00E-02	4,89E-06	6,13E-05	2,73E-04	1,54E-03	2,70E-03	4,25E-03	6,24E-03	8,70E-03	1,17E-02	1,52E-02	2,38E-02	3,48E-02	4,83E-02
1,00E-01	2,22E-04	2,78E-03	1,23E-02	6,77E-02	1,19E-01	1,76E-01	2,47E-01	3,28E-01	4,13E-01	5,00E-01	6,65E-01	8,00E-01	8,94E-01
1,00E+00	6,77E-04	8,45E-03	3,71E-02	1,93E-01	3,12E-01	4,46E-01	5,80E-01	7,02E-01	8,03E-01	8,79E-01	9,64E-01	9,93E-01	9,99E-01
5,00E+00	7,69E-04	9,60E-03	4,21E-02	2,16E-01	3,46E-01	4,89E-01	6,27E-01	7,48E-01	8,42E-01	9,10E-01	9,77E-01	9,96E-01	1,00E+00
1,00E+01	7,82E-04	9,76E-03	4,28E-02	2,19E-01	3,51E-01	4,94E-01	6,33E-01	7,53E-01	8,47E-01	9,13E-01	9,79E-01	9,97E-01	1,00E+00
5,00E+01	7,92E-04	9,89E-03	4,33E-02	2,22E-01	3,55E-01	4,99E-01	6,38E-01	7,58E-01	8,51E-01	9,16E-01	9,80E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+02	7,94E-04	9,91E-03	4,34E-02	2,22E-01	3,55E-01	4,99E-01	6,38E-01	7,58E-01	8,51E-01	9,16E-01	9,80E-01	9,97E-01	1,00E+00
5,00E+02	7,95E-04	9,92E-03	4,35E-02	2,22E-01	3,55E-01	5,00E-01	6,39E-01	7,59E-01	8,52E-01	9,17E-01	9,80E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+100	7,95E-04	9,93E-03	4,35E-02	2,22E-01	3,56E-01	5,00E-01	6,39E-01	7,59E-01	8,52E-01	9,17E-01	9,80E-01	9,97E-01	1,00E+00

  >D1  
  >D5  
  >D50



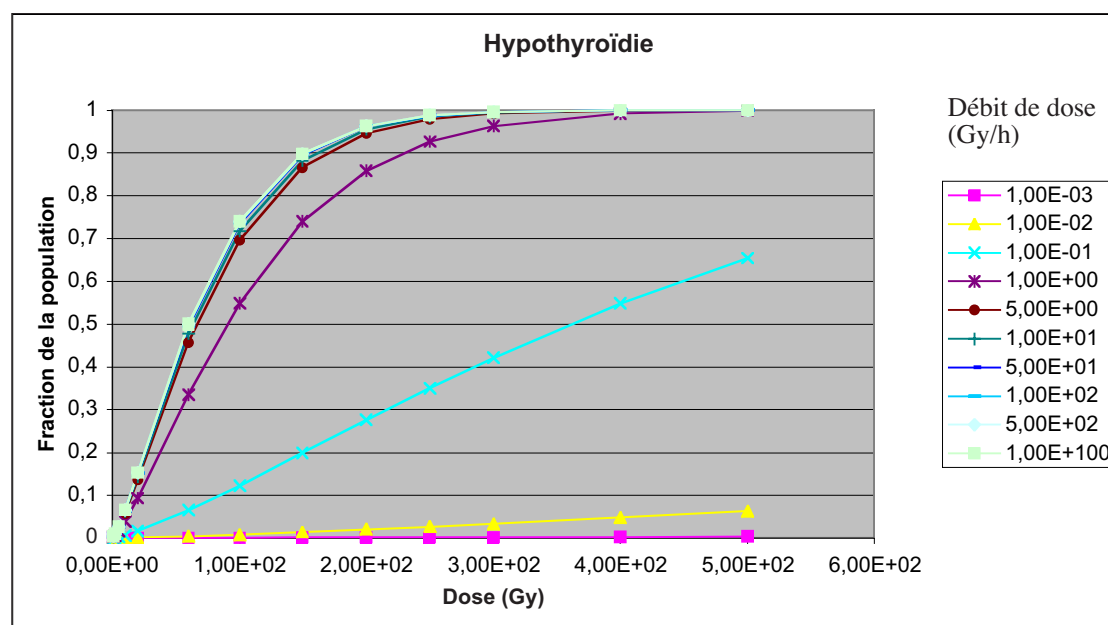
### 2.1.2. Hypothyroïdie

L'hypothyroïdie résulte d'une insuffisance des taux d'hormones thyroïdiennes. La thyroïde ne joue alors plus son rôle, c'est-à-dire celui de maintenir les niveaux d'activité métabolique par la production d'hormones thyroïdiennes. Les symptômes sont la fatigue, une diminution de la tolérance au froid, une apathie mentale, une rétention des fluides corporels, des crampes musculaires et plus généralement une diminution des fonctions de l'organisme. Le seuil d'apparition des effets serait 2,3 Gy à la thyroïde. Le traitement est une hormonothérapie par voie orale.

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
60	30	1,3	-	2,3

Dose (Gy)	1,00E+00	2,30E+00	5,00E+00	1,00E+01	2,00E+01	6,00E+01	1,00E+02	1,50E+02	2,00E+02	2,50E+02	3,00E+02	4,00E+02	5,00E+02
Débit de dose (Gy/h)	1,05E-06	3,09E-06	8,47E-06	2,09E-05	5,14E-05	2,14E-04	4,16E-04	7,05E-04	1,02E-03	1,37E-03	1,74E-03	2,52E-03	3,37E-03
1,00E-03	2,04E-05	6,02E-05	1,65E-04	4,07E-04	1,00E-03	4,17E-03	8,08E-03	1,37E-02	1,98E-02	2,64E-02	3,33E-02	4,80E-02	6,37E-02
1,00E-02	3,29E-04	9,72E-04	2,67E-03	6,55E-03	1,60E-02	6,53E-02	1,23E-01	1,99E-01	2,76E-01	3,50E-01	4,21E-01	5,48E-01	6,54E-01
1,00E+00	1,99E-03	5,88E-03	1,60E-02	3,91E-02	9,34E-02	3,36E-01	5,48E-01	7,40E-01	8,59E-01	9,27E-01	9,64E-01	9,92E-01	9,98E-01
5,00E+00	2,98E-03	8,79E-03	2,39E-02	5,79E-02	1,37E-01	4,58E-01	6,96E-01	8,67E-01	9,47E-01	9,80E-01	9,93E-01	9,99E-01	1,00E+00
1,00E+01	3,17E-03	9,33E-03	2,54E-02	6,14E-02	1,44E-01	4,78E-01	7,17E-01	8,82E-01	9,55E-01	9,84E-01	9,95E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	3,33E-03	9,81E-03	2,67E-02	6,45E-02	1,51E-01	4,96E-01	7,35E-01	8,95E-01	9,62E-01	9,87E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	3,35E-03	9,87E-03	2,69E-02	6,49E-02	1,52E-01	4,98E-01	7,38E-01	8,96E-01	9,63E-01	9,88E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	3,37E-03	9,93E-03	2,70E-02	6,52E-02	1,53E-01	5,00E-01	7,39E-01	8,98E-01	9,64E-01	9,88E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	3,38E-03	9,94E-03	2,70E-02	6,53E-02	1,53E-01	5,00E-01	7,40E-01	8,98E-01	9,64E-01	9,88E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



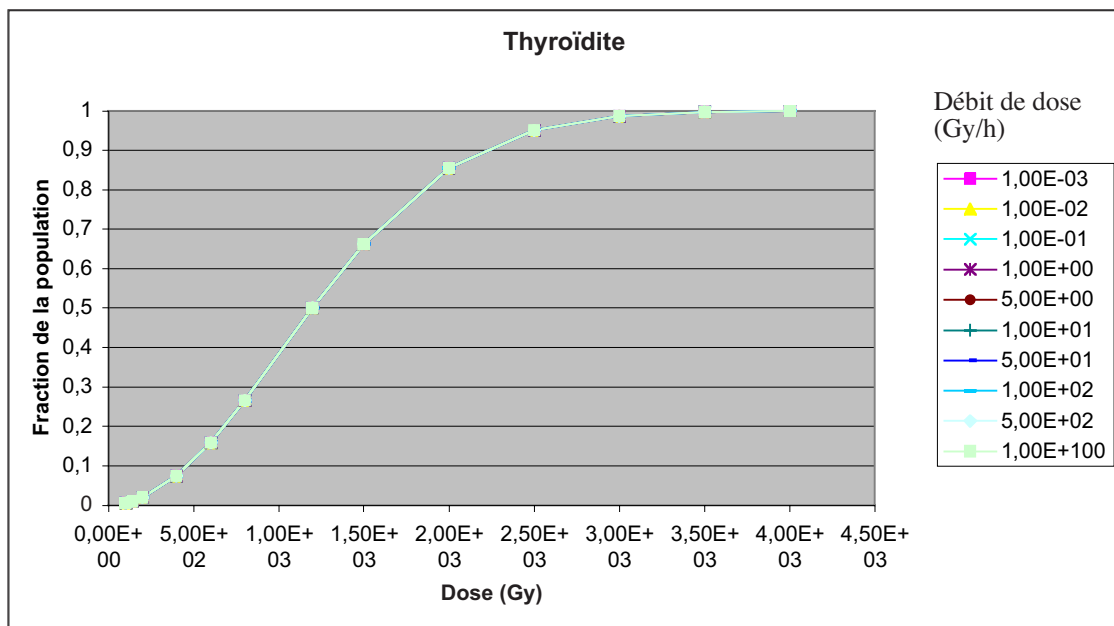
2.1.3. Thyroïdite

C'est une inflammation de la glande thyroïdienne du fait de la nécrose de quelques cellules de la thyroïde (ou de toutes suivant le cas). Les premiers symptômes d'une thyroïdite radio-induite apparaissent dans les deux semaines qui suivent l'irradiation et incluent une douleur et une raideur localisée du cou. Cette inflammation conduit parfois à une libération des hormones thyroïdiennes dans le sang aboutissant ainsi à une thyrotoxicité. Le seuil pris pour cet effet est une dose engagée à la thyroïde 140 Gy. Une telle dose ne peut être atteinte à la thyroïde si il s'agit d'une irradiation externe sans que la moelle osseuse ne soit exposée. Dans ce cas, le pronostic vital serait en jeu (voir infra 2.3.1). La thyroïdite ne peut donc apparaître isolément que pour une contamination interne.

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
1200	0	2	-	140

Dose (Gy) Débit de dose (Gy/h)	1,00E+02	1,40E+02	2,00E+02	4,00E+02	6,00E+02	8,00E+02	1,20E+03	1,50E+03	2,00E+03	2,50E+03	3,00E+03	3,50E+03	4,00E+03
1,00E-03	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E-02	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E-01	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+00	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
5,00E+00	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+01	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
5,00E+01	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+02	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
5,00E+02	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00
1,00E+100	4,80E-03	9,39E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,51E-01	9,87E-01	9,97E-01	1,00E+00

  >D1  
  >D5  
  >D50

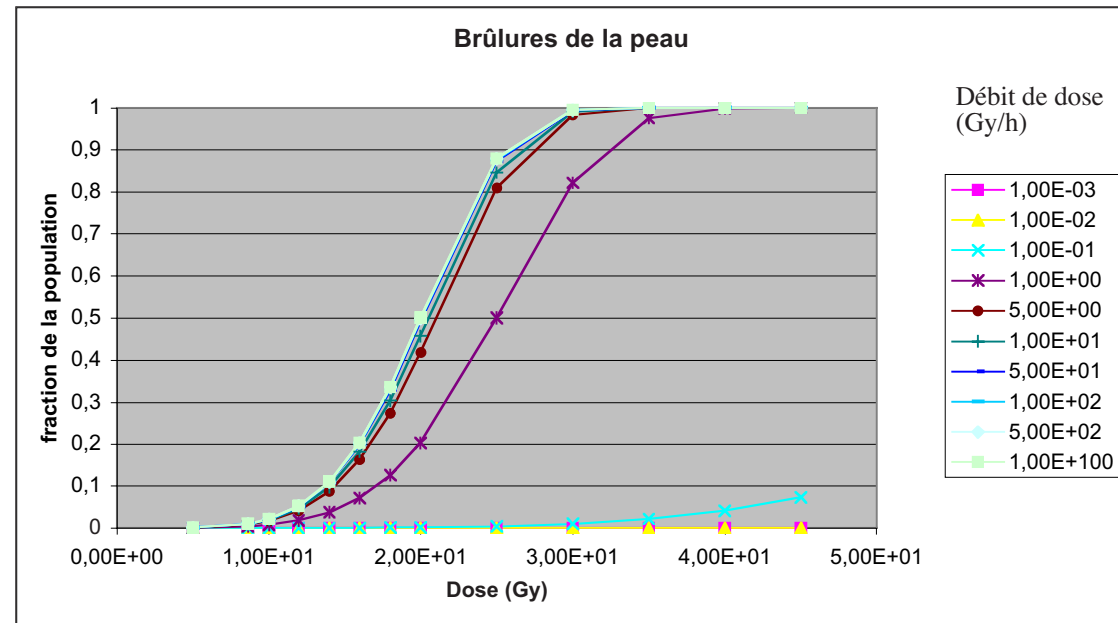


2.1.4. Brûlure légère de la peau (érythème, œdème)

Ces manifestations cutanées apparaissent dans les premières heures qui suivent l'exposition, elles sont transitoires et résultent de la dilatation des capillaires sanguins. La dose seuil issue des calculs du NRPB serait de 8,6 Gy. Ces manifestations peuvent disparaître ensuite ou bien, dans certains cas, être suivies, 3 à 5 jours plus tard, d'un érythème secondaire, de la formation d'ampoules et plus sévèrement de desquamations cutanées équivalant à une brûlure thermique du second degré. Si l'exposition devient chronique, il peut apparaître d'autres effets sur la peau : effacement des empreintes digitales, sécheresse, atrophie, hyper-kératose. L'âge est un facteur de variation de la fréquence d'apparition des effets au niveau de la peau. Les personnes jeunes sont moins sensibles que les personnes âgées.

$\theta_{\infty}$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
20	5	5	-	8,6

Dose (Gy)	5,00E+00	8,60E+00	1,00E+01	1,20E+01	1,40E+01	1,60E+01	1,80E+01	2,00E+01	2,50E+01	3,00E+01	3,50E+01	4,00E+01	4,50E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	6,66E-16	1,02E-14	2,18E-14	5,41E-14	1,17E-13	2,28E-13	4,11E-13	6,96E-13	2,12E-12	5,28E-12	1,14E-11	2,23E-11	4,01E-11
1,00E-02	5,70E-11	8,58E-10	1,82E-09	4,54E-09	9,81E-09	1,91E-08	3,44E-08	5,83E-08	1,78E-07	4,43E-07	9,58E-07	1,87E-06	3,36E-06
1,00E-01	1,29E-06	1,94E-05	4,12E-05	1,03E-04	2,22E-04	4,32E-04	7,79E-04	1,32E-03	4,02E-03	9,97E-03	2,14E-02	4,14E-02	7,33E-02
1,00E+00	2,22E-04	3,33E-03	7,07E-03	1,75E-02	3,75E-02	7,17E-02	1,26E-01	2,03E-01	5,00E-01	8,22E-01	9,76E-01	9,99E-01	1,00E+00
5,00E+00	5,30E-04	7,95E-03	1,68E-02	4,14E-02	8,72E-02	1,63E-01	2,74E-01	4,19E-01	8,09E-01	9,84E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	5,98E-04	8,97E-03	1,90E-02	4,65E-02	9,78E-02	1,82E-01	3,04E-01	4,58E-01	8,46E-01	9,90E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	6,60E-04	9,89E-03	2,09E-02	5,12E-02	1,07E-01	1,99E-01	3,29E-01	4,91E-01	8,73E-01	9,94E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	6,68E-04	1,00E-02	2,12E-02	5,18E-02	1,09E-01	2,01E-01	3,33E-01	4,96E-01	8,76E-01	9,94E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	6,75E-04	1,01E-02	2,14E-02	5,23E-02	1,10E-01	2,03E-01	3,35E-01	4,99E-01	8,79E-01	9,95E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	6,77E-04	1,01E-02	2,14E-02	5,25E-02	1,10E-01	2,03E-01	3,36E-01	5,00E-01	8,79E-01	9,95E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00





## **2.2. Les effets non létaux invalidants**

### **2.2.1. Arrêt de la spermatogenèse**

Les testicules sont parmi les organes les plus radiosensibles. Le processus de production des gamètes mâles est un processus continu tout au long de la vie de l'adulte à partir de l'adolescence. Les cellules les plus radiosensibles sont les cellules en division juste avant maturation. Les spermatogonies, plus précoces, sont plus résistantes.

Compte tenu de ces connaissances scientifiques, il est admis que des doses de 0,1 à 0,3 Gy conduisent à une oligospermie (diminution du nombre de spermatozoïdes par éjaculation) temporaire. Des doses plus importantes entraînent une aspermie (absence de sécrétion du sperme) temporaire dont la durée n'excède pas deux ans (si l'exposition est supprimée). Une dose supérieure à 2 Gy entraîne une aspermie définitive.

Le modèle du NRPB décrit l'apparition de l'arrêt temporaire de la spermatogenèse. La valeur du seuil est de 0,46 Gy sachant qu'une exposition chronique sera plus délétère qu'une exposition aiguë. Aucun modèle n'est disponible pour l'oligospermie ou l'aspermie définitive.

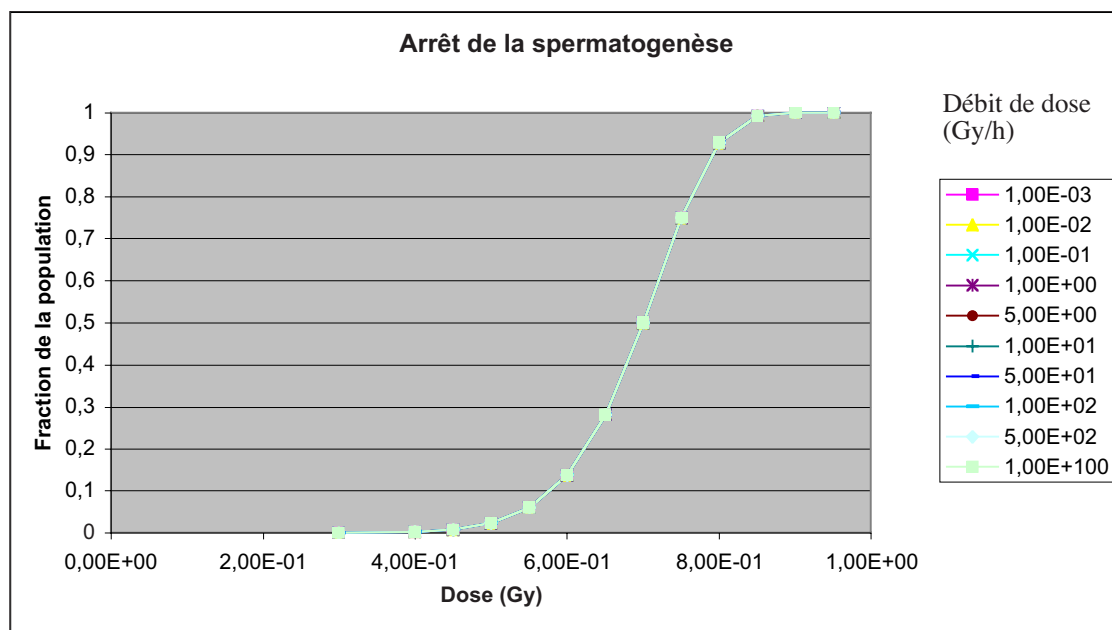
## A2.16

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	$\text{Gy}^2/\text{h}$		(alpha)	Gy
0,7	0	10	-	0,46*

\*La CIPR 60 donne 0,15 (stérilité temporaire) et 3,5-6 (stérilité permanente, d'après UNSCEAR 1988)

Dose (Gy)	3,00E-01	4,00E-01	4,50E-01	5,00E-01	5,50E-01	6,00E-01	6,50E-01	7,00E-01	7,50E-01	8,00E-01	8,50E-01	9,00E-01	9,50E-01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-02	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-01	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+00	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+00	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	1,45E-04	2,57E-03	8,32E-03	2,37E-02	6,03E-02	1,38E-01	2,81E-01	5,00E-01	7,49E-01	9,28E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
 >D5  
 >D50



### 2.2.2. Arrêt de l'ovogenèse

Les ovaires sont parmi les organes les plus radiosensibles. Contrairement au processus de production des gamètes mâles, celui des gamètes femelles est discontinu et le capital de cellules précurseurs est limité. De plus les cellules les plus matures sont aussi les plus radiosensibles.

Des doses inférieures à 0,6 Gy ne causent aucun effet délétère sur la fonction de reproduction. Des doses comprises entre 1,5 et 5 Gy conduisent à l'arrêt temporaire de l'ovulation. Une dose de 6 Gy (irradiation brève) ou bien 10 Gy (dose étalée sur une semaine) est considérée comme conduisant à un arrêt définitif de l'ovulation dans 100% des cas.

Le seul modèle disponible correspond à l'arrêt définitif de l'ovogenèse. Le NRPB a choisi de prendre pour valeur du seuil, une valeur comprise entre 0,8 et 0,9 Gy. Ce seuil décroît lorsque l'âge augmente du fait de la diminution du capital de cellules précurseurs.

A2.18

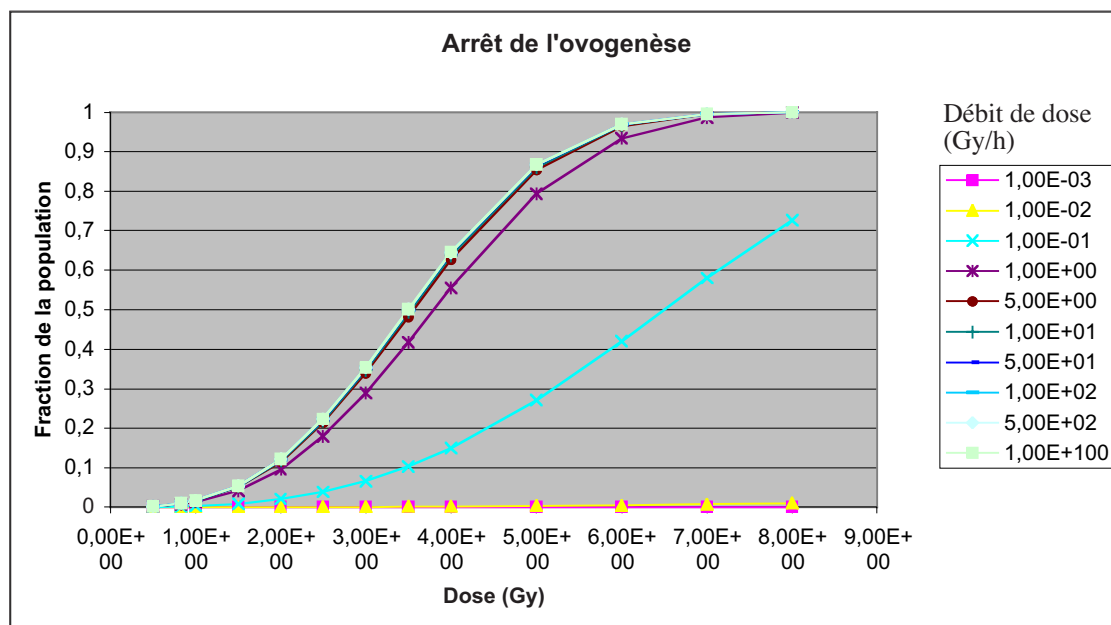
$\theta_{\infty}$  Gy       $\theta_1$  Gy<sup>2</sup>/h       $\nu$       EBR (alpha)      D<sub>1</sub> Gy

3,5      0,3      3      -      0,85\*

\*La CIPR 60 donne 2,5-6 (stérilité)

Dose (Gy)	5,00E-01	8,30E-01	1,00E+00	1,50E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00	3,50E+00	4,00E+00	5,00E+00	6,00E+00	7,00E+00	8,00E+00
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	3,10E-09	1,42E-08	2,48E-08	8,37E-08	1,98E-07	3,87E-07	6,69E-07	1,06E-06	1,59E-06	3,10E-06	5,36E-06	8,50E-06	1,27E-05
1,00E-02	2,30E-06	1,05E-05	1,84E-05	6,22E-05	1,47E-04	2,88E-04	4,98E-04	7,90E-04	1,18E-03	2,30E-03	3,97E-03	6,30E-03	9,40E-03
1,00E-01	3,15E-04	1,44E-03	2,52E-03	8,48E-03	2,00E-02	3,87E-02	6,59E-02	1,03E-01	1,49E-01	2,71E-01	4,20E-01	5,79E-01	7,25E-01
1,00E+00	1,58E-03	7,20E-03	1,26E-02	4,17E-02	9,61E-02	1,79E-01	2,89E-01	4,18E-01	5,54E-01	7,94E-01	9,35E-01	9,87E-01	9,98E-01
5,00E+00	1,92E-03	8,75E-03	1,52E-02	5,05E-02	1,16E-01	2,13E-01	3,40E-01	4,82E-01	6,26E-01	8,53E-01	9,64E-01	9,95E-01	1,00E+00
1,00E+01	1,97E-03	8,97E-03	1,56E-02	5,18E-02	1,18E-01	2,18E-01	3,47E-01	4,91E-01	6,35E-01	8,61E-01	9,67E-01	9,96E-01	1,00E+00
5,00E+01	2,01E-03	9,15E-03	1,60E-02	5,28E-02	1,21E-01	2,22E-01	3,52E-01	4,98E-01	6,43E-01	8,66E-01	9,69E-01	9,96E-01	1,00E+00
1,00E+02	2,01E-03	9,18E-03	1,60E-02	5,30E-02	1,21E-01	2,23E-01	3,53E-01	4,99E-01	6,44E-01	8,67E-01	9,69E-01	9,96E-01	1,00E+00
5,00E+02	2,02E-03	9,20E-03	1,60E-02	5,31E-02	1,21E-01	2,23E-01	3,54E-01	5,00E-01	6,44E-01	8,67E-01	9,70E-01	9,96E-01	1,00E+00
1,00E+100	2,02E-03	9,20E-03	1,60E-02	5,31E-02	1,21E-01	2,23E-01	3,54E-01	5,00E-01	6,45E-01	8,67E-01	9,70E-01	9,96E-01	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



### 2.2.3. Opacité et cataracte

Le cristallin fait partie des tissus les plus radiosensibles du corps. À la suite d'une exposition, les cellules du cristallin sont endommagées, mais elles continuent leur croissance de façon plus lente. Les cellules mortes et endommagées vont former une opacité centrale qui, dans un premier temps n'affecte pas la vision. En fonction de la dose, ce processus va continuer pour conduire à une vision imparfaite évoluant jusqu'à la forme reconnaissable la plus grave qui est la cataracte.

Le temps de latence peut varier de quelques mois pour une exposition élevée, à plusieurs années pour des expositions plus faibles. Là encore le débit de dose et la chronicité des expositions sont des facteurs aggravants. Quoi qu'il en soit, au-dessus de 15 Gy, se développe de façon systématique une cataracte évolutive et ce quel que soit le fractionnement de la dose dans le temps.

En l'état des connaissances actuelles, le seuil a été estimé à 1,3 Gy.

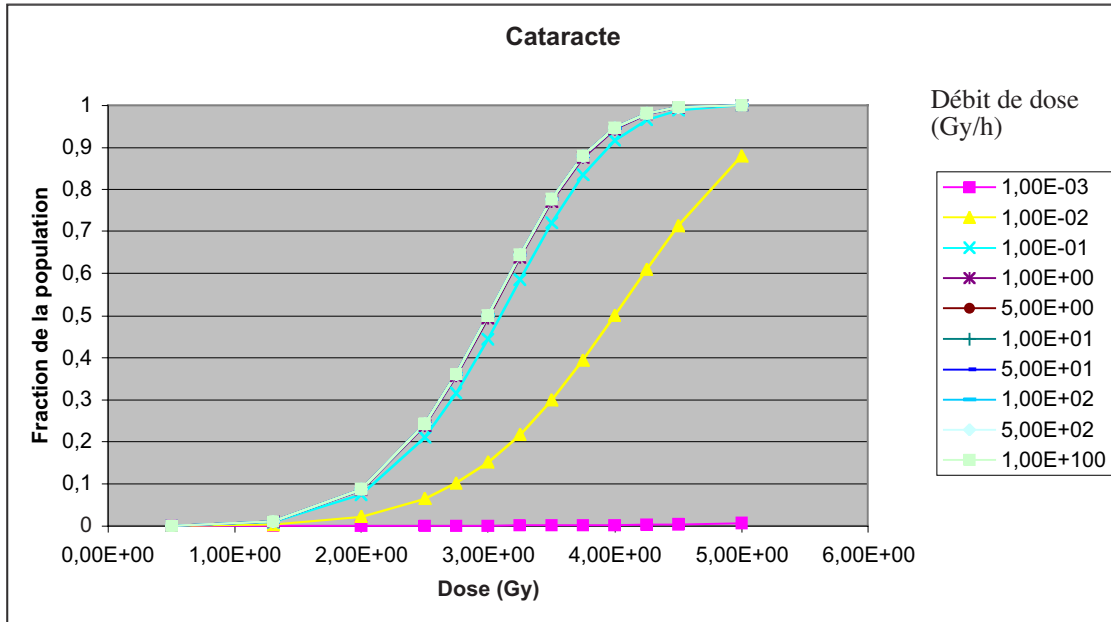
A2.20

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
3	0,01	5	-	1,3*

\*La CIPR 60 donne 0,5-2 (opacité, d'après Otake et Schull 1990) et 2-10 (cataracte, d'après NCRP 1989)

Dose (Gy)	5,00E-01	1,30E+00	2,00E+00	2,50E+00	2,75E+00	3,00E+00	3,25E+00	3,50E+00	3,75E+00	4,00E+00	4,25E+00	4,50E+00	5,00E+00
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	5,83E-08	6,93E-06	5,97E-05	1,82E-04	2,94E-04	4,54E-04	6,77E-04	9,80E-04	1,38E-03	1,91E-03	2,59E-03	3,44E-03	5,82E-03
1,00E-02	2,12E-05	2,51E-03	2,14E-02	6,40E-02	1,01E-01	1,52E-01	2,18E-01	2,99E-01	3,95E-01	5,00E-01	6,09E-01	7,13E-01	8,79E-01
1,00E-01	7,57E-05	8,95E-03	7,46E-02	2,11E-01	3,17E-01	4,45E-01	5,84E-01	7,20E-01	8,34E-01	9,16E-01	9,65E-01	9,89E-01	9,99E-01
1,00E+00	8,77E-05	1,04E-02	8,59E-02	2,40E-01	3,57E-01	4,94E-01	6,38E-01	7,71E-01	8,75E-01	9,43E-01	9,80E-01	9,94E-01	1,00E+00
5,00E+00	8,88E-05	1,05E-02	8,70E-02	2,42E-01	3,61E-01	4,99E-01	6,43E-01	7,75E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00
1,00E+01	8,90E-05	1,05E-02	8,71E-02	2,43E-01	3,61E-01	4,99E-01	6,44E-01	7,76E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00
5,00E+01	8,91E-05	1,05E-02	8,72E-02	2,43E-01	3,61E-01	5,00E-01	6,44E-01	7,76E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00
1,00E+02	8,91E-05	1,05E-02	8,72E-02	2,43E-01	3,61E-01	5,00E-01	6,44E-01	7,76E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00
5,00E+02	8,91E-05	1,05E-02	8,72E-02	2,43E-01	3,61E-01	5,00E-01	6,45E-01	7,76E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00
1,00E+100	8,91E-05	1,05E-02	8,72E-02	2,43E-01	3,61E-01	5,00E-01	6,45E-01	7,76E-01	8,79E-01	9,46E-01	9,81E-01	9,95E-01	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



2.2.4. Fibrose pulmonaire

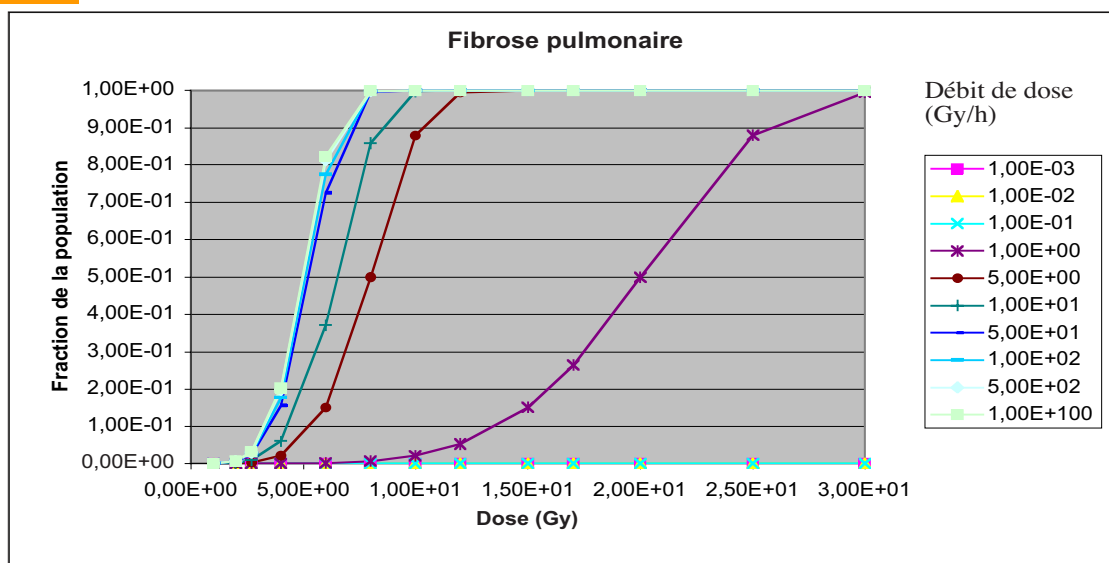
L'irradiation des poumons peut conduire à une fibrose qui se manifeste par une diminution du volume pulmonaire, une raideur et une perte de l'élasticité du parenchyme pulmonaire qui ont pour conséquences directes une distribution non uniforme des gaz et une diminution de l'efficacité des échanges gazeux au niveau des alvéoles pulmonaires. Les complications peuvent être pulmonaires ou bien cardiovasculaires. Les symptômes sont : hémoptysie (expectoration de sang), insuffisance respiratoire aiguë. Le seuil recommandé par le NRPB est de 2,7 Gy.

Dans le cas d'une contamination interne par un émetteur  $\alpha$ , la fréquence d'apparition des effets pulmonaires au sein d'une population est augmentée. L'efficacité biologique relative (EBR) est estimée, pour un rayonnement  $\alpha$  et pour les poumons, à 7 par rapport au rayonnement  $\gamma$  et X.

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
5	15	5	7	2,7

Dose (Gy)	1,00E+00	2,00E+00	2,70E+00	4,00E+00	6,00E+00	8,00E+00	1,00E+01	1,20E+01	1,50E+01	1,70E+01	2,00E+01	2,50E+01	3,00E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-16	2,22E-16	6,66E-16	1,33E-15	2,89E-15	8,88E-15	2,21E-14
1,00E-02	1,11E-16	2,89E-15	1,29E-14	9,19E-14	6,98E-13	2,94E-12	8,98E-12	2,23E-11	6,82E-11	1,27E-10	2,87E-10	8,77E-10	2,18E-09
1,00E-01	7,75E-12	2,48E-10	1,11E-09	7,93E-09	6,02E-08	2,54E-07	7,75E-07	1,93E-06	5,88E-06	1,10E-05	2,48E-05	7,57E-05	1,88E-04
1,00E+00	2,17E-07	6,93E-06	3,11E-05	2,22E-04	1,68E-03	7,07E-03	2,14E-02	5,25E-02	1,52E-01	2,65E-01	5,00E-01	8,79E-01	9,95E-01
5,00E+00	2,12E-05	6,77E-04	3,03E-03	2,14E-02	1,52E-01	5,00E-01	8,79E-01	9,95E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	5,97E-05	1,91E-03	8,54E-03	5,93E-02	3,72E-01	8,59E-01	9,97E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	1,66E-04	5,29E-03	2,35E-02	1,56E-01	7,24E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	1,91E-04	6,10E-03	2,71E-02	1,78E-01	7,74E-01	9,98E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	2,15E-04	6,86E-03	3,04E-02	1,98E-01	8,12E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	2,22E-04	7,07E-03	3,13E-02	2,03E-01	8,22E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



### 2.2.5. Brûlure sévère de la peau (ulcération, nécrose)

Ce chapitre concerne les effets qui apparaissent lors d'une irradiation plus sévère que celle citée dans le paragraphe 2.1.4 ou bien lors d'une exposition chronique de la peau aux rayonnements ionisants.

L'ulcération et la nécrose sont les effets les plus sévères d'une irradiation de la peau. La nécrose est le stade ultime et les lésions ne peuvent être réparées que par chirurgie plastique. Il existe plusieurs types de nécroses dont le moins grave découle d'une desquamation cutanée conduisant à une diminution des cellules souches de la membrane basale. A ce stade, les lésions peuvent cicatriser et une nouvelle peau, plus fine, plus fragile, généralement dépourvue de pigment peut se reformer. Lorsque la dose est plus élevée (40 Gy), la nécrose aiguë apparaît en l'espace de deux semaines. La littérature fait mention de cas de nécroses tardives qui apparaissent plusieurs mois après l'exposition (> 6 mois).

Généralement, les cas les plus sévères de nécrose apparaissent à de telles doses qu'il est difficile de les envisager sans une dose fatale au niveau de la moelle osseuse. Cependant des doses élevées au niveau de zones localisées sur le corps peuvent produire les mêmes dommages. De plus, il est reconnu que la surface lésée est un facteur important dans le pronostic final. On admettra alors que la dose délivrée à la peau peut être considérée comme potentiellement létale dès lors que les lésions représentent plus de 30% de la surface corporelle totale. De ce fait des effets non létaux invalidants pourront apparaître pour une irradiation élevée de la peau sur une surface représentant moins de 30% de la surface corporelle totale. Une dose élevée à la peau sur une grande surface corporelle peut avoir pour origine une contamination cutanée étendue par des émetteurs  $\beta$  et  $\alpha$ .

Le NRPB ne fournit aucun modèle pour ce type d'effet. Cependant ce type d'effet est cliniquement observable, l'indice de risque maximal pour les effets déterministes lui sera donc attribué.



### 2.2.6. Retard mental sévère chez le fœtus

Pour le cerveau, la période critique se situe entre la huitième et le début de la seizième semaine car la mort, ou le défaut de migration, des neurones risque alors d'entraîner un retard mental. Pendant cette période, le seuil est estimé à 0,12 Gy. La littérature montre que, durant cette période, il existe une régression linéaire entre le retard mental et la dose avec une perte de 30 points de quotient intellectuel (QI) par Gy (CIPR 60). Le risque persiste, atténué, jusqu'à la vingt cinquième semaine. Bien que les données pour ce type d'effet, pendant cette période, soient peu nombreuses, on a pu estimer le seuil à 0,24 Gy.

Les enfants présentant un retard mental sévère sont incapables, lorsqu'ils grandissent, d'effectuer des opérations de calcul simples et ne peuvent pas être autonomes. La plupart de ces enfant ne vont pas pouvoir suivre une scolarité normale et ont un QI au-dessous de 70 alors que la moyenne nationale est de 100.

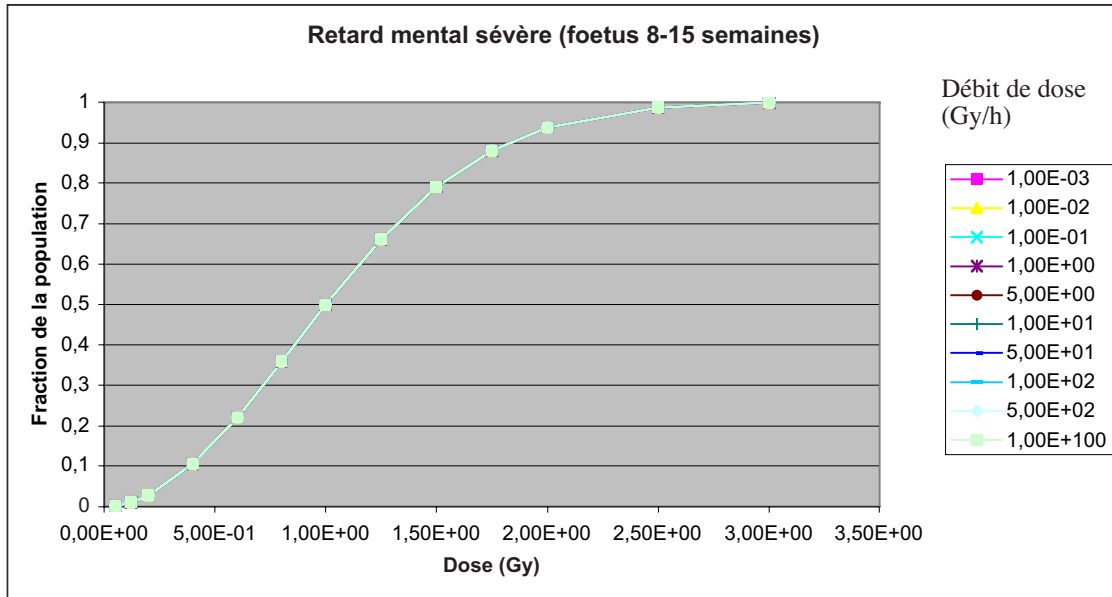
Avant la huitième et après la vingt cinquième semaine, les effets sur le développement du mental sont négligeables.

**Retard mental sévère chez le fœtus (8 - 15 semaines)**

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
1	0	2	-	0,12

Dose (Gy) Débit de dose (Gy/h)	5,00E-02	1,20E-01	2,00E-01	4,00E-01	6,00E-01	8,00E-01	1,00E+00	1,25E+00	1,50E+00	1,75E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00
1,00E-03	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E-02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E-01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E+00	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
5,00E+00	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E+01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
5,00E+01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
5,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01
1,00E+100	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	3,58E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01	9,98E-01

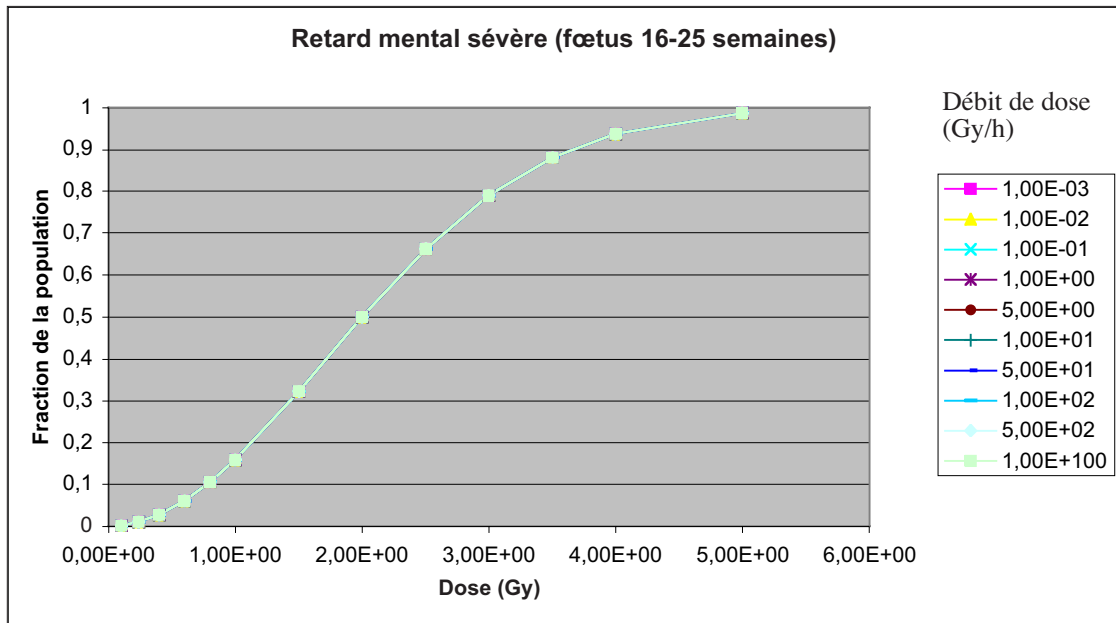
>D1  
 >D5  
 >D50



**Retard mental sévère chez le fœtus (16 - 25 semaines)**

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
2	0	2	-	0,24

	1,00E-01	2,40E-01	4,00E-01	6,00E-01	8,00E-01	1,00E+00	1,50E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00	3,50E+00	4,00E+00	5,00E+00
Dose (Gy)													
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E-02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E-01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E+00	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
5,00E+00	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E+01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
5,00E+01	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
5,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01
1,00E+100	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	6,05E-02	1,05E-01	1,59E-01	3,23E-01	5,00E-01	6,61E-01	7,90E-01	8,80E-01	9,38E-01	9,87E-01



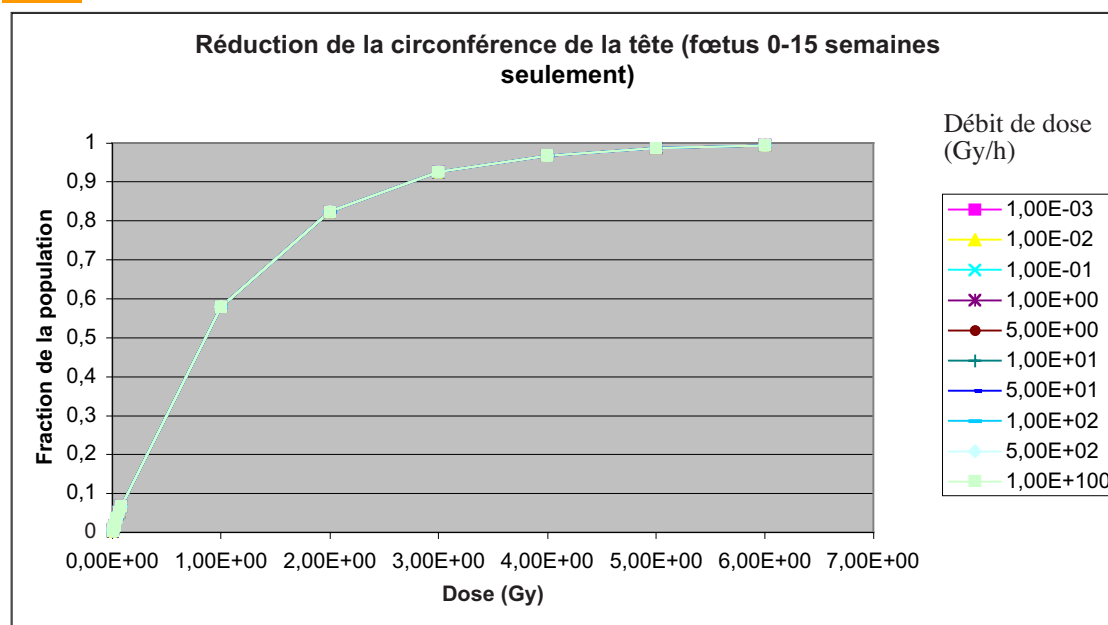
2.2.7. Réduction de la circonférence de la tête (microcéphalie)

Des cas de microcéphalie ont été observés suite à une irradiation de femmes enceintes notamment chez les survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki<sup>5</sup>. C'est entre la première et la quinzième semaine que le risque est maximal. Même si le risque persiste après cette période, il diminue rapidement après la quinzième semaine. Le NRPB recommande comme dose seuil la valeur de 0,05 Gy en accord avec les études précédentes<sup>6</sup>.

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
0,8	0	1	-	0,05

Dose (Gy) Débit de dose (Gy/h)	2,50E-03	5,00E-03	1,00E-02	2,00E-02	4,00E-02	6,00E-02	8,00E-02	1,00E+00	2,00E+00	3,00E+00	4,00E+00	5,00E+00	6,00E+00
1,00E-03	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E-02	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E-01	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E+00	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
5,00E+00	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E+01	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
5,00E+01	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E+02	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
5,00E+02	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01
1,00E+100	2,16E-03	4,32E-03	8,63E-03	1,72E-02	3,41E-02	5,07E-02	6,70E-02	5,80E-01	8,23E-01	9,26E-01	9,69E-01	9,87E-01	9,94E-01

>D1  
>D5  
>D50



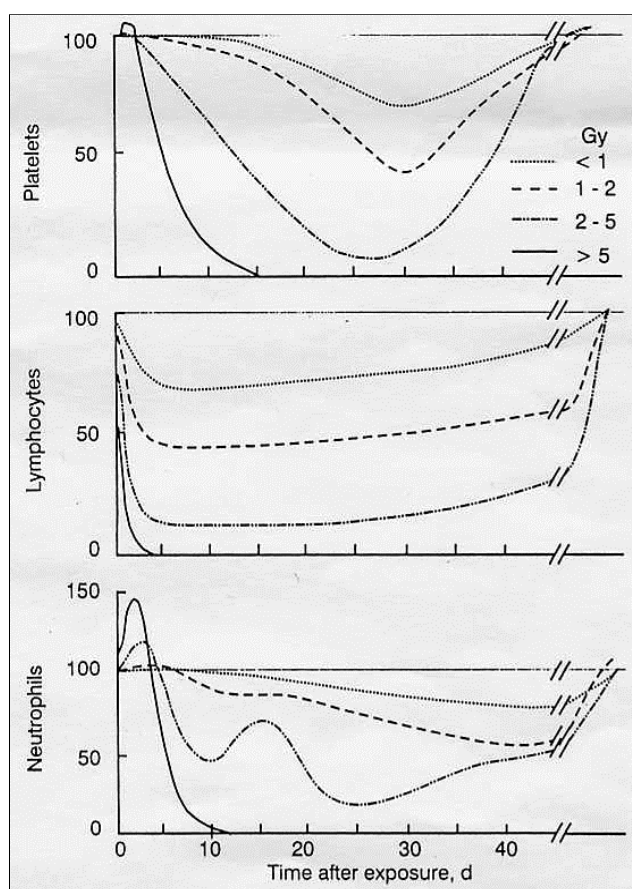
<sup>5</sup> Ishimaru J., Nakashima E., Kawamoto S., Relationship of height, body weight, head circumference at age 18 to gamma and neutron doses among *in utero* exposed children in Hiroshima and Nagasaki. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, TR19-84 (1984).

<sup>6</sup> Scott, BR and Hahn, F F. Early occurring and continuing effects. IN Health effects models for nuclear power plant accident consequence analysis. Low LET radiation. Washington DC, Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-4214 (SAND85-7185), Rev. 1, Part II (1989).

## 2.3. Les effets létaux

### 2.3.1. Le syndrome hématoïétique

Le tissu hématoïétique, situé dans la moelle osseuse, est le siège de la production des cellules sanguines. Une irradiation de ce tissu présente un risque élevé de mort à partir de 2 Gy à la moelle osseuse. Une large fraction des cellules souches sanguines est détruite à cette dose. La mort survient entre 20 et 60 jours après irradiation par hémorragie du fait de la chute des plaquettes et donc d'une mauvaise coagulation sanguine, mais aussi par infection du fait de l'amenuisement des défenses immunitaires. Ce sont les lymphocytes qui sont de très bons indicateurs de l'état de la moelle osseuse. Les neutrophiles et les plaquettes sont aussi de très bons indicateurs des dommages subis par le tissu hématoïétique.



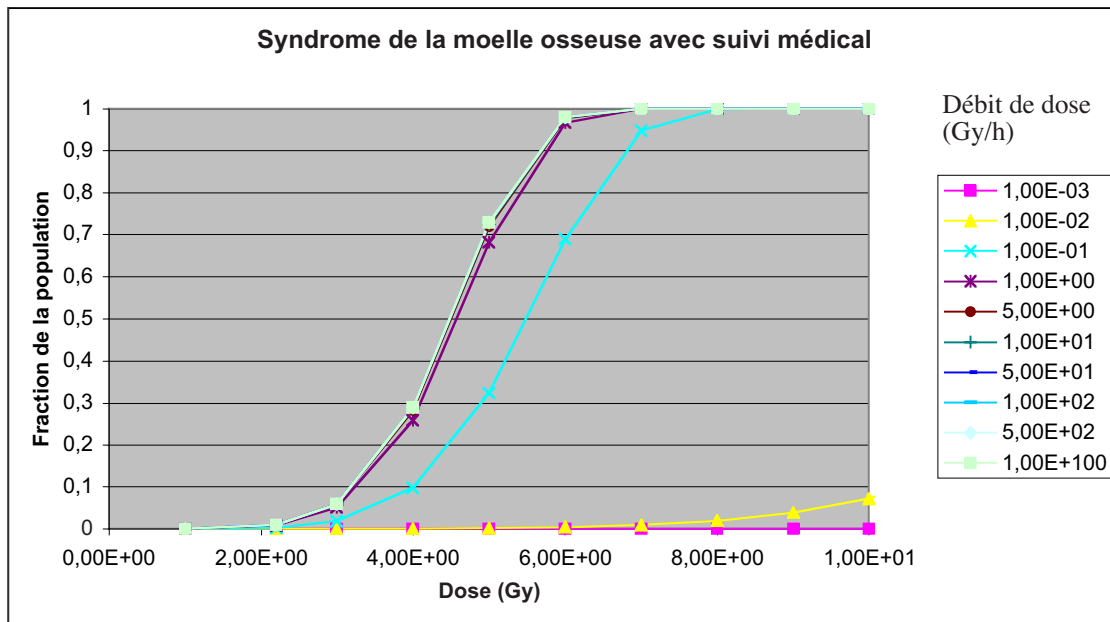
Les graphiques précédents montrent l'évolution des différentes lignées cellulaires du tissu hématopoïétique après une irradiation de la moelle osseuse à des doses comprises entre 0 et plus de 5 Gy.

**Risque de Syndrome hématopoïétique  
(avec suivi médical après exposition)**

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (neutrons)	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
4,5	0,1	6	1,5	2	2,2

Dose (Gy)	1,00E+00	2,20E+00	3,00E+00	4,00E+00	5,00E+00	6,00E+00	7,00E+00	8,00E+00	9,00E+00	1,00E+01	1,10E+01	1,20E+01	1,30E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	5,32E-13	6,03E-11	3,88E-10	2,18E-09	8,32E-09	2,48E-08	6,26E-08	1,40E-07	2,83E-07	5,32E-07	9,43E-07	1,59E-06	2,57E-06
1,00E-02	7,46E-08	8,46E-06	5,44E-05	3,05E-04	1,16E-03	3,47E-03	8,74E-03	1,94E-02	3,89E-02	7,19E-02	1,24E-01	2,00E-01	3,02E-01
1,00E-01	2,50E-05	2,84E-03	1,81E-02	9,75E-02	3,24E-01	6,89E-01	9,47E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+00	7,32E-05	8,26E-03	5,19E-02	2,59E-01	6,81E-01	9,67E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+00	8,13E-05	9,17E-03	5,75E-02	2,83E-01	7,19E-01	9,77E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	8,24E-05	9,30E-03	5,83E-02	2,86E-01	7,24E-01	9,79E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	8,32E-05	9,39E-03	5,89E-02	2,89E-01	7,28E-01	9,79E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	8,34E-05	9,41E-03	5,90E-02	2,89E-01	7,28E-01	9,80E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	8,34E-05	9,42E-03	5,90E-02	2,90E-01	7,29E-01	9,80E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	8,35E-05	9,42E-03	5,90E-02	2,90E-01	7,29E-01	9,80E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50

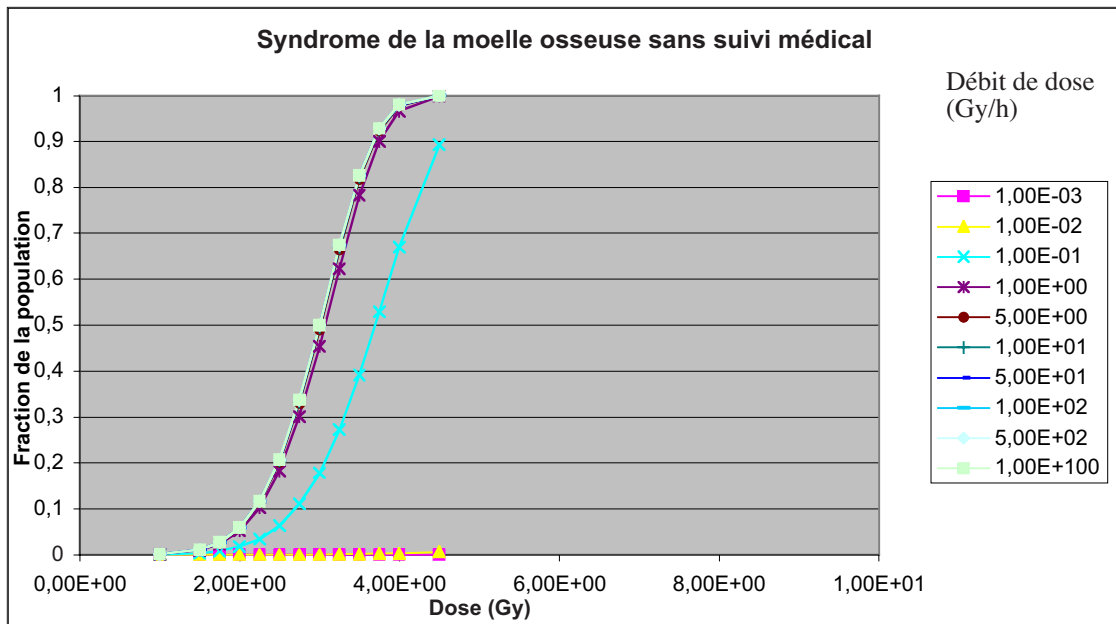


### Risque de syndrome hématopoïétique (sans suivi médical après exposition)

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\nu$	EBR (neutrons)	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
3	0,07	6	1,5	2	1,5

Dose (Gy)	1,00E+00	1,50E+00	1,75E+00	2,00E+00	2,25E+00	2,50E+00	2,75E+00	3,00E+00	3,25E+00	3,50E+00	3,75E+00	4,00E+00	4,50E+00
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	4,58E-12	5,22E-11	1,32E-10	2,93E-10	5,94E-10	1,12E-09	1,98E-09	3,34E-09	5,40E-09	8,42E-09	1,27E-08	1,88E-08	3,80E-08
1,00E-02	6,93E-07	7,90E-06	1,99E-05	4,44E-05	8,99E-05	1,69E-04	3,00E-04	5,05E-04	8,16E-04	1,27E-03	1,93E-03	2,84E-03	5,74E-03
1,00E-01	2,70E-04	3,07E-03	7,73E-03	1,71E-02	3,44E-02	6,38E-02	1,10E-01	1,79E-01	2,73E-01	3,91E-01	5,28E-01	6,69E-01	8,94E-01
1,00E+00	8,28E-04	9,39E-03	2,35E-02	5,16E-02	1,02E-01	1,83E-01	3,01E-01	4,53E-01	6,23E-01	7,82E-01	9,00E-01	9,66E-01	9,99E-01
5,00E+00	9,24E-04	1,05E-02	2,62E-02	5,75E-02	1,13E-01	2,02E-01	3,30E-01	4,90E-01	6,64E-01	8,17E-01	9,24E-01	9,77E-01	1,00E+00
1,00E+01	9,37E-04	1,06E-02	2,66E-02	5,82E-02	1,15E-01	2,05E-01	3,33E-01	4,95E-01	6,69E-01	8,17E-01	9,26E-01	9,79E-01	1,00E+00
5,00E+01	9,48E-04	1,07E-02	2,69E-02	5,89E-02	1,16E-01	2,07E-01	3,36E-01	4,99E-01	6,73E-01	8,25E-01	9,28E-01	9,79E-01	1,00E+00
1,00E+02	9,49E-04	1,08E-02	2,69E-02	5,90E-02	1,16E-01	2,07E-01	3,37E-01	5,00E-01	6,73E-01	8,25E-01	9,29E-01	9,80E-01	1,00E+00
5,00E+02	9,50E-04	1,08E-02	2,69E-02	5,90E-02	1,16E-01	2,07E-01	3,37E-01	5,00E-01	6,74E-01	8,26E-01	9,29E-01	9,80E-01	1,00E+00
1,00E+100	9,50E-04	1,08E-02	2,69E-02	5,90E-02	1,16E-01	2,07E-01	3,37E-01	5,00E-01	6,74E-01	8,26E-01	9,29E-01	9,80E-01	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



2.3.2. Le syndrome gastro-intestinal

Cet effet suit la phase prodromique dont les symptômes sont décrits plus haut (cf. § 2.1.1). Outre les symptômes de la phase prodromique, le syndrome gastro-intestinal conduit à une perte de poids, une diminution de l'absorption intestinale associée parfois à des hémorragies digestives et une prolifération bactérienne qui peut conduire à la mort. Généralement la dose nécessaire pour induire le syndrome gastro-intestinal est plus élevée que celle induisant le syndrome hématopoïétique (cf. § 2.3.1). Lors d'une irradiation corps entier à une telle dose, la personne mourra des dommages causés au niveau de la moelle.

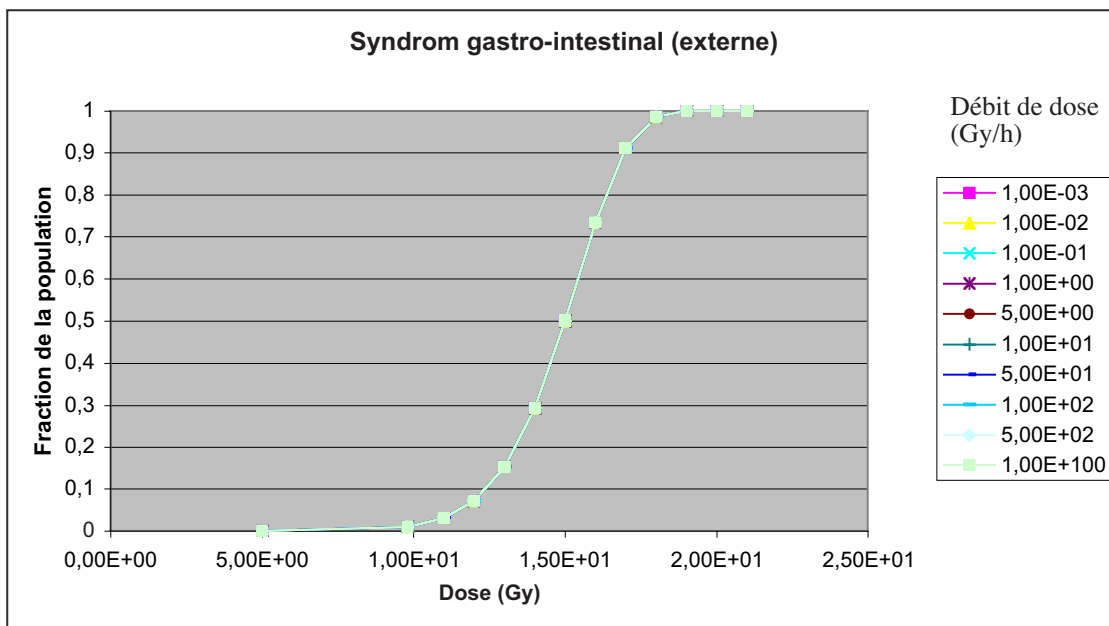
**Risque de syndrome gastro-intestinal dans le cas d'une irradiation externe**

**Organe cible : intestin grêle**

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\theta$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
15	0	10	-	9,8

Dose (Gy)	5,00E+00	9,80E+00	1,10E+01	1,20E+01	1,30E+01	1,40E+01	1,50E+01	1,60E+01	1,70E+01	1,80E+01	1,90E+01	2,00E+01	2,10E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+00	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+00	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50





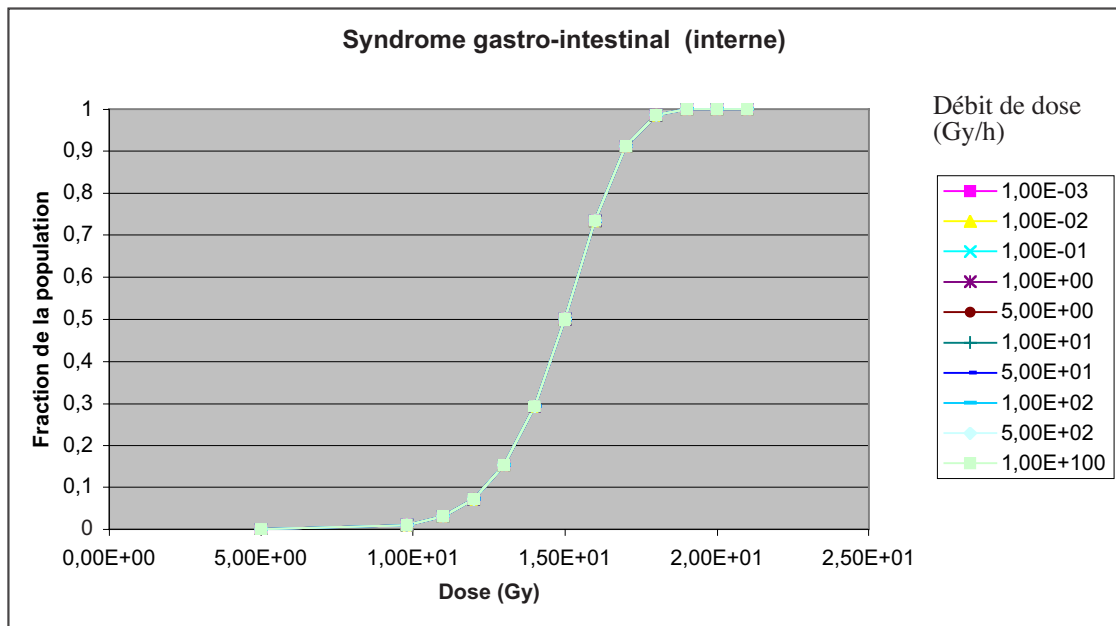
**Risque de syndrome gastro-intestinal dans le cas d'une irradiation interne**

**Organe cible : côlon**

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR (alpha)	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h			Gy
15	0	10	-	9,8

Dose (Gy)	5,00E+00	9,80E+00	1,10E+01	1,20E+01	1,30E+01	1,40E+01	1,50E+01	1,60E+01	1,70E+01	1,80E+01	1,90E+01	2,00E+01	2,10E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E-01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+00	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+00	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	1,17E-05	9,77E-03	3,07E-02	7,17E-02	1,53E-01	2,94E-01	5,00E-01	7,33E-01	9,11E-01	9,86E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



2.3.3. Le syndrome pulmonaire

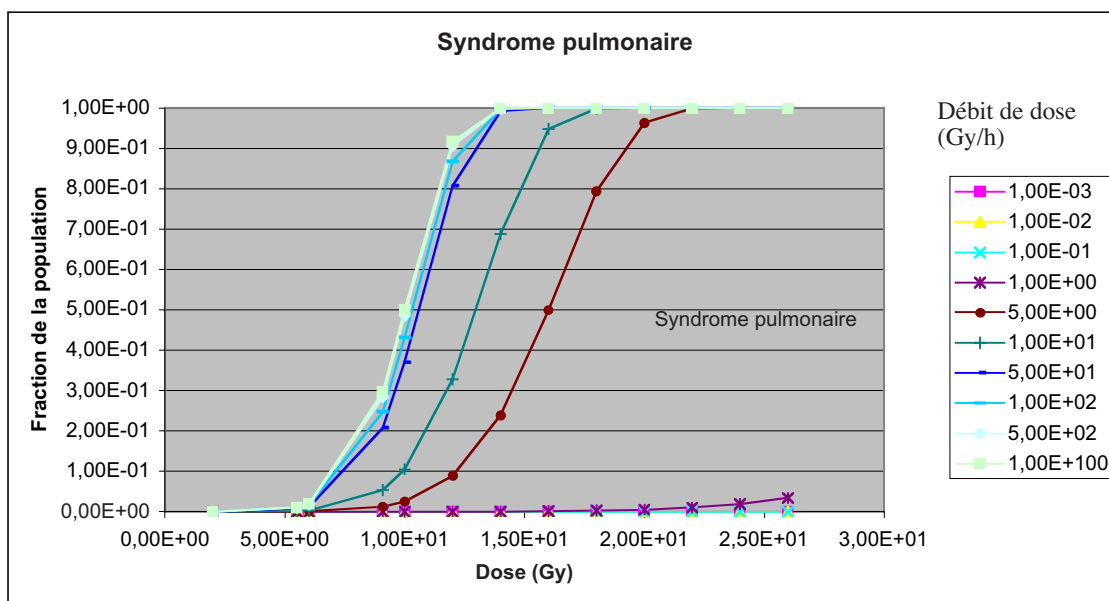
Les poumons sont relativement sensibles et les dommages causés par une irradiation se manifestent en deux phases. Lors de la phase précoce (quelques semaines après l'exposition) on observe une pneumonie et un œdème. À long terme, l'irradiation conduit au développement d'une fibrose pulmonaire et à la perte d'alvéoles remplacées par du collagène. Ce phénomène rend le parenchyme pulmonaire moins élastique. Les symptômes sont une détresse respiratoire, une fièvre et une toux sèche. A dose élevée, ces modifications fonctionnelles et structurales peuvent conduire à la mort. La réponse, pour cet organe qu'est le poumon, est très dépendante de la dose et du débit de dose.

Les poumons peuvent être irradiés par exposition externe ou par contamination interne par inhalation d'un ou de plusieurs radioisotopes. L'inhalation d'émetteurs  $\alpha$  ou  $\beta$  présente un risque accru. La courbe dose/fréquence est modifiée en appliquant un facteur d'efficacité biologique de 7.

$\theta_{\infty}$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
10	30	7	7	5,5

Dose (Gy)	2,00E+00	5,50E+00	6,00E+00	9,07E+00	1,00E+01	1,20E+01	1,40E+01	1,60E+01	1,80E+01	2,00E+01	2,20E+01	2,40E+01	2,60E+01
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,00E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-16	2,22E-16	4,44E-16	7,77E-16	1,44E-15
1,00E-01	3,33E-16	3,84E-13	7,05E-13	1,27E-11	2,52E-11	9,03E-11	2,66E-10	6,76E-10	1,54E-09	3,22E-09	6,28E-09	1,16E-08	2,02E-08
1,00E+00	5,42E-10	6,44E-07	1,18E-06	2,14E-05	4,23E-05	1,52E-04	4,46E-04	1,14E-03	2,59E-03	5,40E-03	1,05E-02	1,92E-02	3,34E-02
5,00E+00	3,31E-07	3,93E-04	7,23E-04	1,30E-02	2,55E-02	8,84E-02	2,38E-01	5,00E-01	7,94E-01	9,63E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	1,41E-06	1,68E-03	3,09E-03	5,43E-02	1,05E-01	3,27E-01	6,88E-01	9,48E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	5,90E-06	6,99E-03	1,28E-02	2,08E-01	3,69E-01	8,08E-01	9,92E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	7,21E-06	8,54E-03	1,57E-02	2,48E-01	4,31E-01	8,67E-01	9,97E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	8,51E-06	1,01E-02	1,84E-02	2,85E-01	4,86E-01	9,08E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	8,87E-06	1,05E-02	1,92E-02	2,95E-01	5,00E-01	9,17E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50



#### 2.3.4. Mortalité de l'embryon et du fœtus

Au tout début de la grossesse (jusqu'au 18<sup>ème</sup> jour après la conception), les effets des rayonnements ionisants peuvent aboutir, selon la dose, à la mort de l'œuf qui passe inaperçue la plupart du temps ou bien ne pas perturber le bon déroulement du développement de l'embryon. A ce stade, les cellules n'ont encore aucune spécificité. Et celles qui sont détruites sont remplacées par d'autres ayant les mêmes potentialités.

Aux stades ultérieurs de différenciation (19 à 150 jours), les cellules survivantes ne peuvent plus changer d'orientation et le nombre de celles destinées à former chacun des organes est restreint. Après le 150<sup>ème</sup> jour, les risques diminuent.

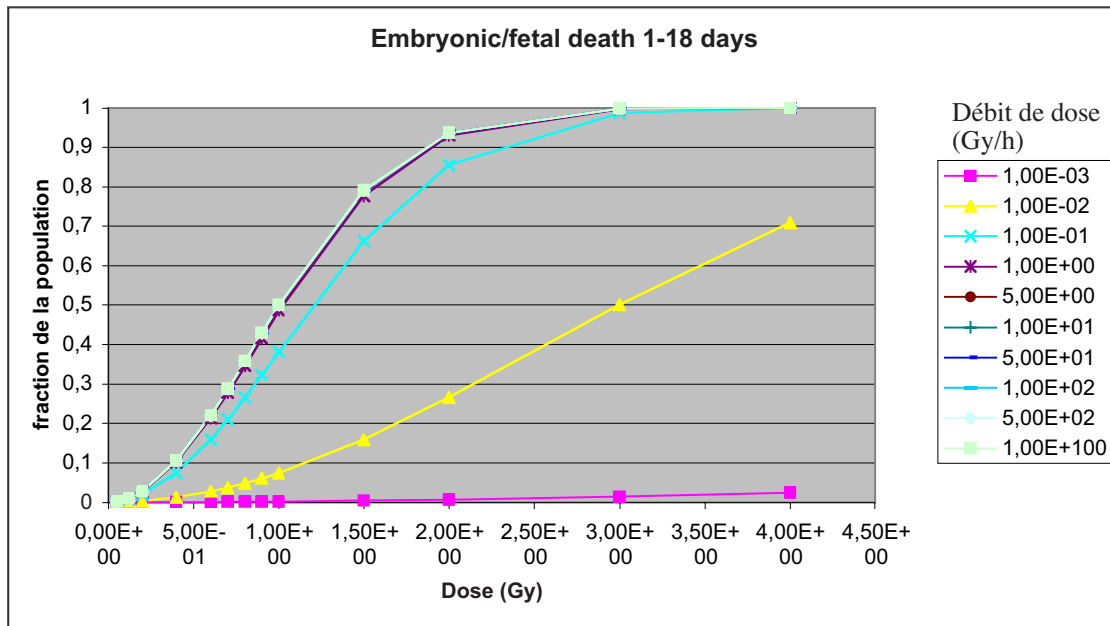
Les études suggèrent un seuil de 0,12 Gy pour la période du 1<sup>er</sup> au 18<sup>ème</sup> jour après la conception, de 0,37 Gy si l'irradiation intervient entre le 18<sup>ème</sup> et le 150<sup>ème</sup> jour et enfin 1,5 Gy jusqu'à la fin de la grossesse.

**Mort de l'embryon (1-18 jours)**

$\theta_\infty$ Gy	$\theta_1$ Gy <sup>2</sup> /h	$\theta$	EBR (alpha)	D <sub>1</sub> Gy
1	0,02	2	2	0,12

Dose (Gy)	5,00E-02	1,20E-01	2,00E-01	4,00E-01	6,00E-01	7,00E-01	8,00E-01	9,00E-01	1,00E+00	1,50E+00	2,00E+00	3,00E+00	4,00E+00
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	3,93E-06	2,26E-05	6,29E-05	2,51E-04	5,66E-04	7,70E-04	1,01E-03	1,27E-03	1,57E-03	3,53E-03	6,27E-03	1,40E-02	2,48E-02
1,00E-02	1,93E-04	1,11E-03	3,08E-03	1,22E-02	2,73E-02	3,70E-02	4,81E-02	6,05E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,65E-01	5,00E-01	7,08E-01
1,00E-01	1,20E-03	6,91E-03	1,91E-02	7,41E-02	1,59E-01	2,10E-01	2,65E-01	3,23E-01	3,82E-01	6,61E-01	8,54E-01	9,87E-01	1,00E+00
1,00E+00	1,66E-03	9,55E-03	2,63E-02	1,01E-01	2,13E-01	2,79E-01	3,47E-01	4,17E-01	4,86E-01	7,77E-01	9,30E-01	9,98E-01	1,00E+00
5,00E+00	1,72E-03	9,85E-03	2,71E-02	1,04E-01	2,19E-01	2,86E-01	3,56E-01	4,27E-01	4,97E-01	7,87E-01	9,36E-01	9,98E-01	1,00E+00
1,00E+01	1,72E-03	9,89E-03	2,72E-02	1,05E-01	2,20E-01	2,87E-01	3,57E-01	4,28E-01	4,99E-01	7,88E-01	9,37E-01	9,98E-01	1,00E+00
5,00E+01	1,73E-03	9,92E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	2,88E-01	3,58E-01	4,29E-01	5,00E-01	7,90E-01	9,37E-01	9,98E-01	1,00E+00
1,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	2,88E-01	3,58E-01	4,29E-01	5,00E-01	7,90E-01	9,37E-01	9,98E-01	1,00E+00
5,00E+02	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	2,88E-01	3,58E-01	4,30E-01	5,00E-01	7,90E-01	9,37E-01	9,98E-01	1,00E+00
1,00E+100	1,73E-03	9,93E-03	2,73E-02	1,05E-01	2,21E-01	2,88E-01	3,58E-01	4,30E-01	5,00E-01	7,90E-01	9,38E-01	9,98E-01	1,00E+00

>D1  
>D5  
>D50

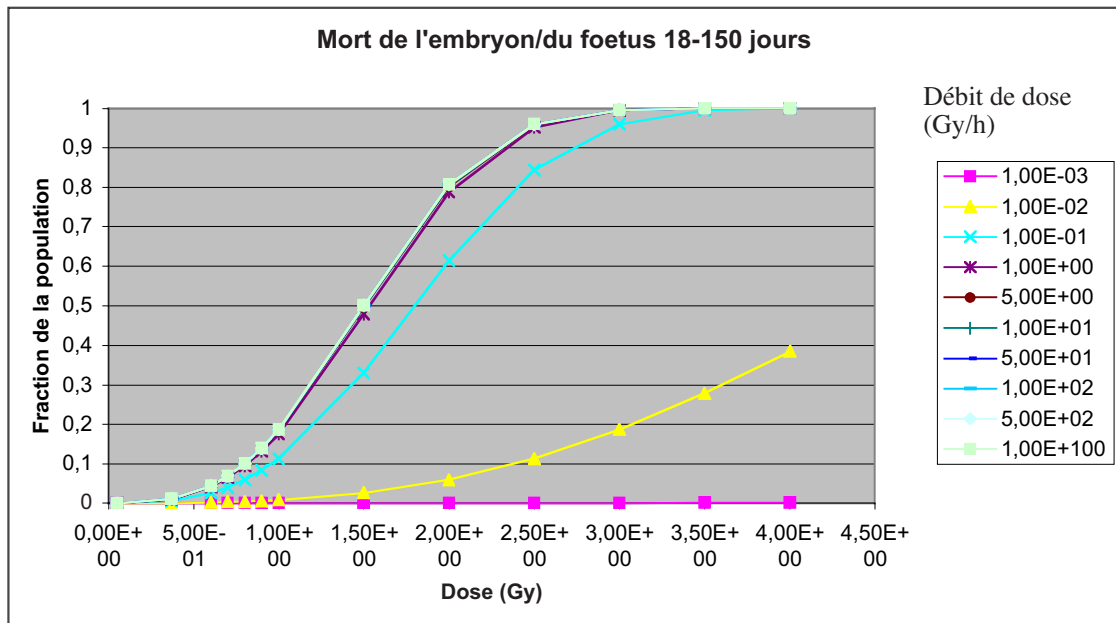


Mort de l'embryon/du fœtus (18-150 jours)

$\theta_\infty$	$\theta_1$	$\nu$	EBR	$D_1$
Gy	Gy <sup>2</sup> /h		(alpha)	Gy
1,5	0,03	3	2	0,37

Dose (Gy)	5,00E-02	3,70E-01	6,00E-01	7,00E-01	8,00E-01	9,00E-01	1,00E+00	1,50E+00	2,00E+00	2,50E+00	3,00E+00	3,50E+00	4,00E+00
Débit de dose (Gy/h)													
1,00E-03	2,77E-09	1,12E-06	4,79E-06	7,61E-06	1,14E-05	1,62E-05	2,22E-05	7,48E-05	1,77E-04	3,46E-04	5,99E-04	9,50E-04	1,42E-03
1,00E-02	9,51E-07	3,85E-04	1,64E-03	2,61E-03	3,89E-03	5,53E-03	7,58E-03	2,53E-02	5,90E-02	1,12E-01	1,86E-01	2,78E-01	3,85E-01
1,00E-01	1,49E-05	6,00E-03	2,53E-02	3,99E-02	5,90E-02	8,30E-02	1,12E-01	3,30E-01	6,14E-01	8,44E-01	9,60E-01	9,94E-01	1,00E+00
1,00E+00	2,42E-05	9,76E-03	4,09E-02	6,42E-02	9,43E-02	1,32E-01	1,76E-01	4,80E-01	7,87E-01	9,51E-01	9,95E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+00	2,54E-05	1,02E-02	4,29E-02	6,72E-02	9,67E-02	1,38E-01	1,84E-01	4,96E-01	8,03E-01	9,58E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+01	2,55E-05	1,03E-02	4,31E-02	6,76E-02	9,92E-02	1,38E-01	1,85E-01	4,98E-01	8,05E-01	9,59E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+01	2,56E-05	1,03E-02	4,33E-02	6,79E-02	9,97E-02	1,39E-01	1,85E-01	5,00E-01	8,06E-01	9,59E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+02	2,57E-05	1,03E-02	4,34E-02	6,80E-02	9,98E-02	1,39E-01	1,86E-01	5,00E-01	8,06E-01	9,60E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
5,00E+02	2,57E-05	1,03E-02	4,34E-02	6,80E-02	9,98E-02	1,39E-01	1,86E-01	5,00E-01	8,07E-01	9,60E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00
1,00E+100	2,57E-05	1,03E-02	4,34E-02	6,80E-02	9,98E-02	1,39E-01	1,86E-01	5,00E-01	8,07E-01	9,60E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00

  >D1  
  >D5  
  >D50



## 2.4. Valeurs de $D_1$ , $D_5$ , $D_{50}$ et $D_{100}$ pour les différents effets déterministes létaux et non létaux

On donne dans le tableau suivant, les ordres de grandeur des valeurs de  $D_1$ ,  $D_5$ ,  $D_{50}$  et  $D_{100}$  pour les effets déterministes létaux, et non létaux (invalidants et non-invalidants) les plus fréquents dans le cas des rayonnements à faible transfert linéique d'énergie (TLE) pour des débits de dose de 1Gy/h et infini.

$D_1$ ,  $D_5$ ,  $D_{50}$  et  $D_{100}$  sont les valeurs de dose absorbée qui correspondent à un risque d'apparition de l'effet dans une population uniformément exposée avec une probabilité respective de 1 %, 5 %, 50 %, et 100 %.

**Tableau A2.1 : Valeurs de  $D_1$ ,  $D_5$ ,  $D_{50}$  et  $D_{100}$  pour les effets déterministes létaux et non létaux**

EFFETS LETAUX	Organe	Débit de dose 1 Gy/h				Débit de dose « infini »			
		$D_1$ (Gy)	$D_5$ (Gy)	$D_{50}$ (Gy)	$D_{100}$ (Gy)	$D_1$ (Gy)	$D_5$ (Gy)	$D_{50}$ (Gy)	$D_{100}$ (Gy)
Mort de l'embryon âgé de 1 à 18 jours	<i>Embryon</i>	0,15	0,3	1	4,5	0,12	0,3	1	3,1
Mort du fœtus âgé de 18 à 150 jours	<i>Embryon / Fœtus</i>	0,37	0,6	1,5	3,3	0,36	0,6	1,5	3,2
Mort du fœtus âgé de 150 à 270 jours	<i>Fœtus</i>	1,5	1,9	3,1	4,5	1,5	1,9	3	4,4
Syndrome d'irrad. de la moelle osseuse (sans suivi médical)	<i>Moelle osseuse</i>	1,5	2	3,1	4,5	1,5	1,9	3	4,4
Syndrome d'irrad. de la moelle osseuse (avec suivi médical)	<i>Moelle osseuse</i>	2,3	3	4,6	6,7	2,2	2,9	4,5	6,6
Syndrome d'irrad. pulmonaire	<i>Poumons</i>	22	27	40	55	5,5	7	10	14
Syndrome gastro-intestinal (irrad. ext.)	<i>Intestin grêle</i>	9,8	11,5	15	18,9	9,8	11,5	15	19
Syndrome gastro-intestinal (irrad. int.)	<i>Colon</i>	9,8	11,5	15	18,9	9,8	11,5	15	19
<b>EFFETS NON LETAUX INVALIDANTS</b>	<b>Organe</b>	<b><math>D_1</math> (Gy)</b>	<b><math>D_5</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{50}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{100}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_1</math> (Gy)</b>	<b><math>D_5</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{50}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{100}</math> (Gy)</b>
Retard mental sévère (irrad. d'un embryon ou fœtus âgé de 8 à 15 sem.)	<i>Fœtus</i>	0,12	0,27	1	3	0,12	0,27	1	3
Retard mental sévère (irrad. du fœtus âgé de 16 à 25 sem.)	<i>Fœtus</i>	0,24	0,54	2	6,3	0,24	0,54	2	6,3
Réduction de la circonférence de la tête (0 - 15 sem.)	<i>Embryon / Fœtus</i>	0,016	0,06	0,8	7,9	0,016	0,06	0,8	8
Arrêt temporaire ou définitif de l'ovogenèse <sup>7</sup>	<i>Ovaires</i>	0,9	1,6	3,8	8,1	0,8	1,5	3,5	7,5
Arrêt temporaire de la spermatogenèse <sup>8</sup>	<i>Testicules</i>	0,46	0,54	0,7	0,88	0,46	0,54	0,7	0,88
Cataracte	<i>Cristallin</i>	1,3	1,8	3	4,8	1,3	1,78	3	4,7
Fibrose	<i>Poumon</i>	9	12	20	30	2	3	5	8
<b>EFFETS NON LETAUX NON-INVALIDANTS</b>	<b>Organe</b>	<b><math>D_1</math> (Gy)</b>	<b><math>D_5</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{50}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{100}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_1</math> (Gy)</b>	<b><math>D_5</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{50}</math> (Gy)</b>	<b><math>D_{100}</math> (Gy)</b>
Vomissements	<i>Abdomen</i>	0,54	0,92	2,2	4,7	0,49	0,84	2	4,3
Diarrhées	<i>Abdomen</i>	0,59	1	3,2	8	0,55	1,1	3	7,5
Hypothyroïdie	<i>Thyroïde</i>	3,5	12	90	500	2,3	8	60	350
Thyroidite	<i>Thyroïde</i>	140	300	1200	3800	140	300	1200	3800
Brûlures	<i>Peau</i>	10	15	25	40	8	12	20	30

<sup>7</sup> Le modèle ne différencie pas les deux cas (temporaire ou définitif). Une irradiation supérieure à 6 Gy conduit à un arrêt définitif de l'ovulation dans 100% des cas.

<sup>8</sup> Il n'y a pas de modèle NRPB disponible pour l'aspermie et l'oligospermie.

