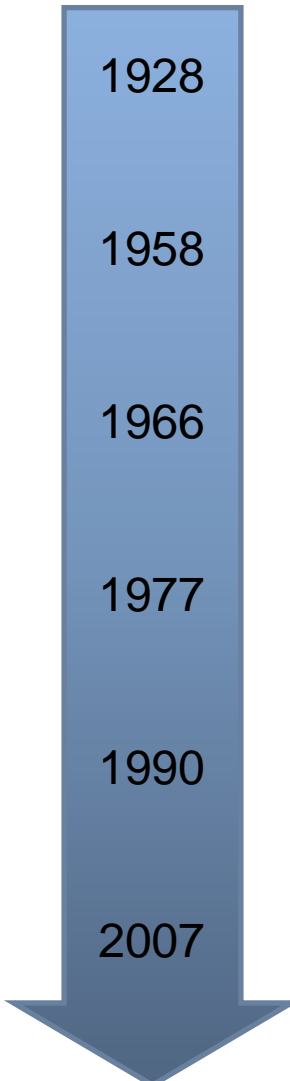


Fondamentaux du système de radioprotection : notion de risque lié aux rayonnements ionisants

Dominique Laurier

GT-CIPR
19 Novembre 2014, paris

Historique de recommandations CIPR



1928		Eviter les effets des sur-expositions
1958	ICRP 1	Minimiser les effets somatiques (cataracte, fertilité, leucémie...)
1966	ICRP 9	Prévenir les effets aigus, à long terme et héréditaires
1977	ICRP 26	Eviter les effets non-stochastiques et limiter les effets stochastiques
1990	ICRP 60	Eviter les effets déterministes Limiter les effets stochastiques
2007	ICRP 103	Eviter les réactions tissulaires nocives Limiter les effets stochastiques

Effets déterministes - Réactions tissulaires

Nature

Effets à court terme (quelques jours à semaines): brûlure cutanée, perte de cheveux, stérilité, dépression de l'hématopoïèse, syndrome intestinal...

Effets à long terme (plusieurs années): pathologies cardiovasculaires, cataracte

Mécanisme

Effets liés à l'élimination ou le dysfonctionnement d'un grand nombre de cellules

Seuil

Effets ne survenant qu'au delà d'un seuil de dose (quelques centaines de mSv à plusieurs Gy)

Au delà de ce seuil, gravité augmente avec la dose

Objectif de la Radioprotection

Considérés depuis 1928

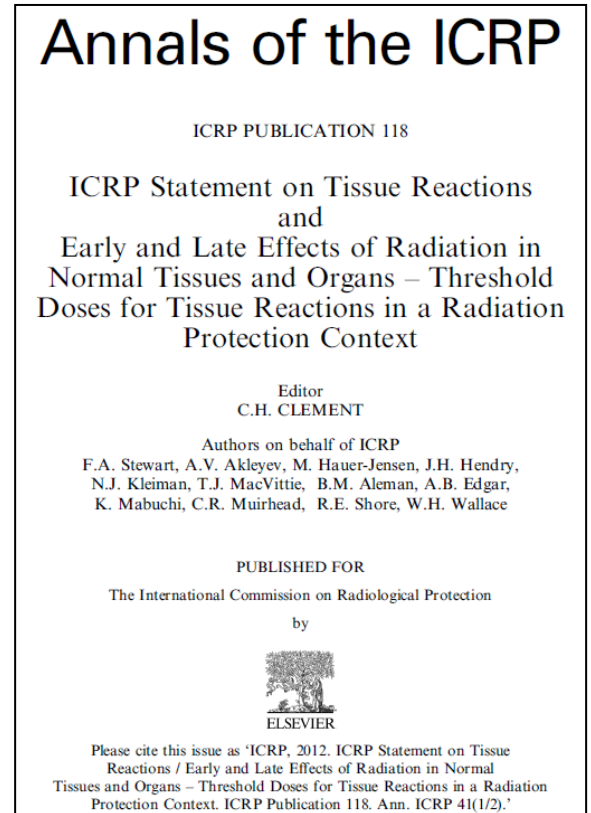
Eviter la survenue de ces effets

Effets déterministes - Réactions tissulaires

Publication ICRP 118 (2012)

Révision de plusieurs seuils
pour des effets à long terme

- Opacités cristalliniennes
Seuil de dose équivalente au cristallin de 500 mSv
- Pathologies cardio-vasculaires
Seuil de dose équivalente au cœur et au
cerveau de 500 mSv



Effets stochastiques

Nature

Cancers (quelques années à décennies)

Effets héréditaires (survenant chez les descendants de personnes irradiées)

Mécanisme

Stochastique: survenant de façon aléatoire au sein d'un groupe exposé

Effets liés à la modification d'une ou de quelques cellules (mutation)

Seuil

Effets sans seuil, augmentant proportionnellement à la dose, même en dessous de quelques centaines de mSv

Augmentation de la fréquence de l'effet avec la dose, sans lien avec la gravité

Objectif de la Radioprotection

Considérés depuis 1977

Limiter la survenue de ces effets

Effets stochastiques

Publication ICRP 26 (1977)

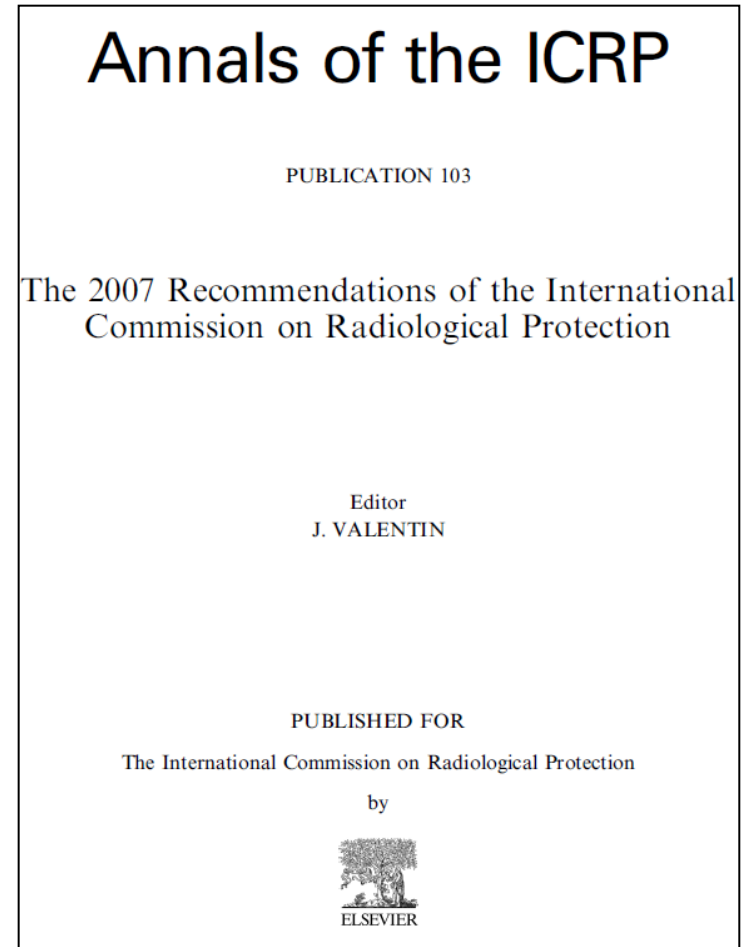
Apparition du terme stochastique
Quantification par l'estimation du détriment

Publication ICRP 60 (1990)

Elaboration du système actuel d'évaluation
des risques radioinduits

Publication ICRP 103 (2007)

Mise à jour/évolution du système mis en
place par la CIPR 60



Etapes de l'évaluation des risques stochastiques

1, Description du risque sur les données observées

-> coefficient de risque primaire

choix du modèle; quantification de la relation dose-réponse, détermination des facteurs modifiants

2, Inférence et extrapolation

-> relation de portée générale

estimations en deçà des points observés (extrapolation), au delà de la durée d'observation (projection), à d'autres populations (transport du risque), à d'autres conditions d'irradiation (DDREF)

3, Mesure de l'effet, indicateurs de synthèses

-> estimation du détriment sanitaire

excès de cancer attribuable sur la vie entière, qualité de vie, perte d'espérance de vie, effets héréditaires

Apport de l'épidémiologie dans l'évaluation des risques radio-induits des risques

Quels effets sont induits par les rayonnements ionisants ?

Quelle est la relation entre la dose et l'effet ?

Quelle est la séquence temporelle entre l'exposition et l'effet ?

Quels sont les facteurs modifiants cette relation ?



Etude des survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki

Hiroshima

300 000 habitants
06/08/45 - 15 kt
90-120 000 décès

Nagasaki

330 000 habitants
09/08/45 - 21 kt
60-80 000 décès

les 2 sexes – tous les ages (+ *in utero*)
débit de dose élevé



Life Span Cohort Study (LSS)

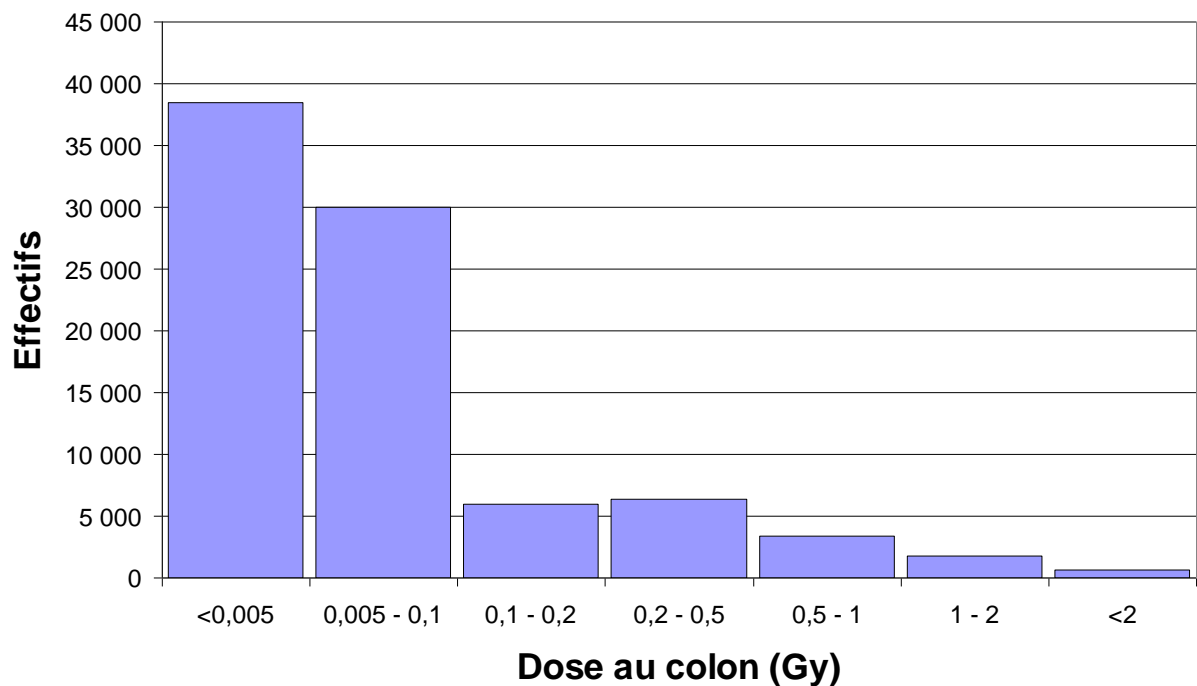
suivi depuis 1950
étude de mortalité + incidence
86 600 individus avec dose reconstituée
50 620 décès (58%) en 2003

[Ozasa et al, Rad Res 2012]

LSS: distribution de doses

Doses

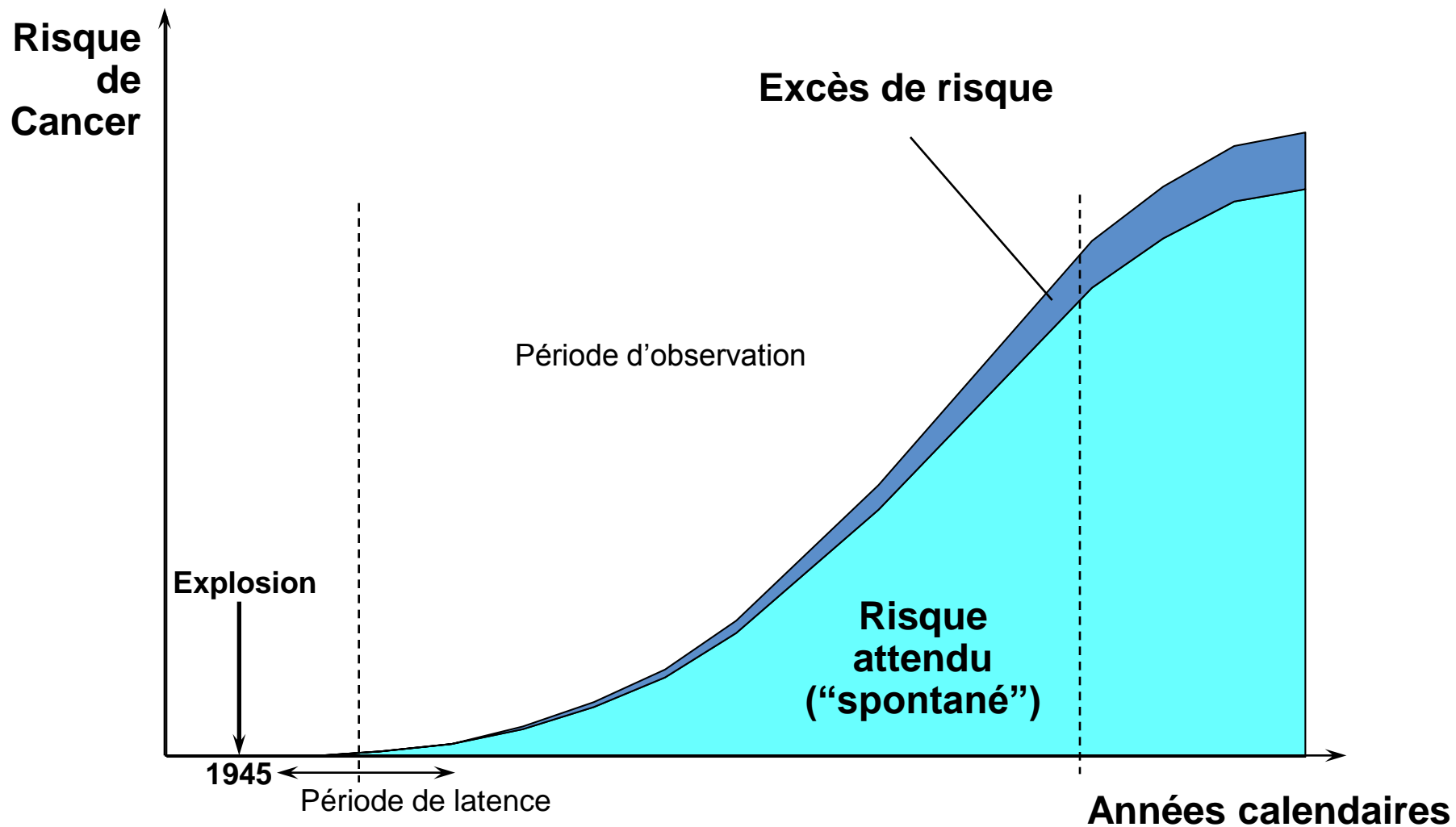
externes (gamma + neutron)
moyennes à faibles
fort débit de dose



[d'après Preston 2004]
DS02

➡ 80 % des doses sont inférieures à 100 mGy

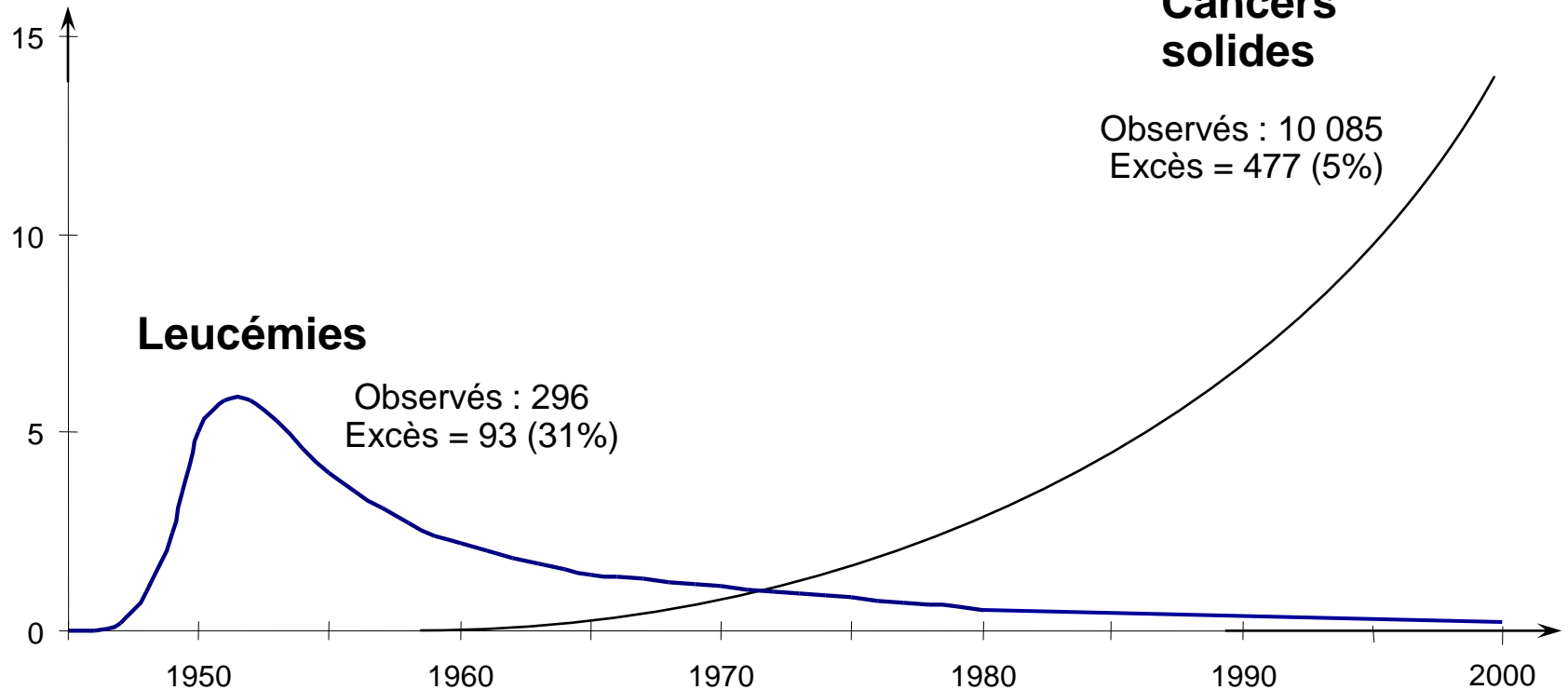
LSS : suivi du risque de cancer



LSS : excès de risque de cancer

Excès de risque

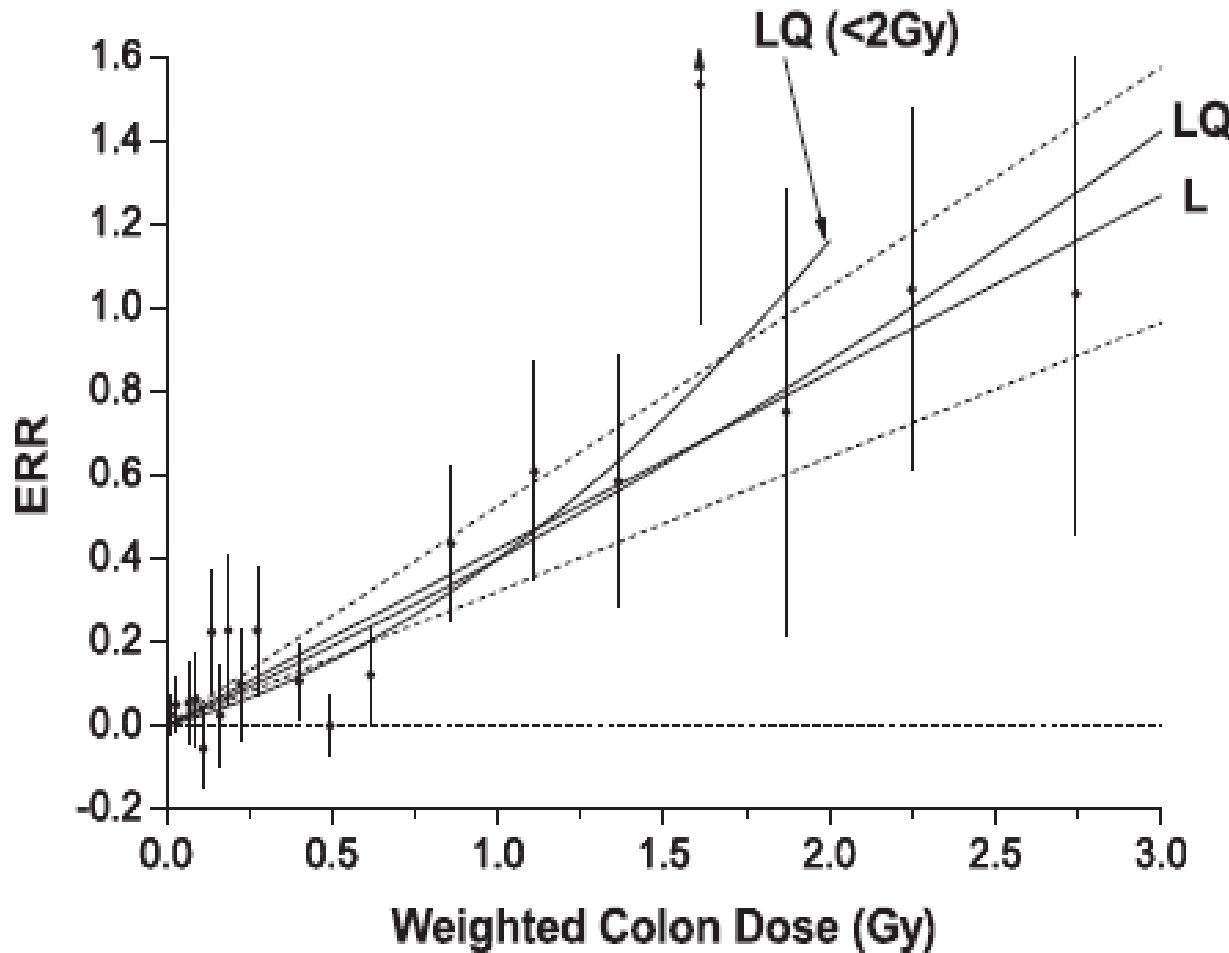
/10 000



[Preston 2004]
mortalité 1950-2000,

LSS : excès de risque relatif de cancers solides

Solid cancer



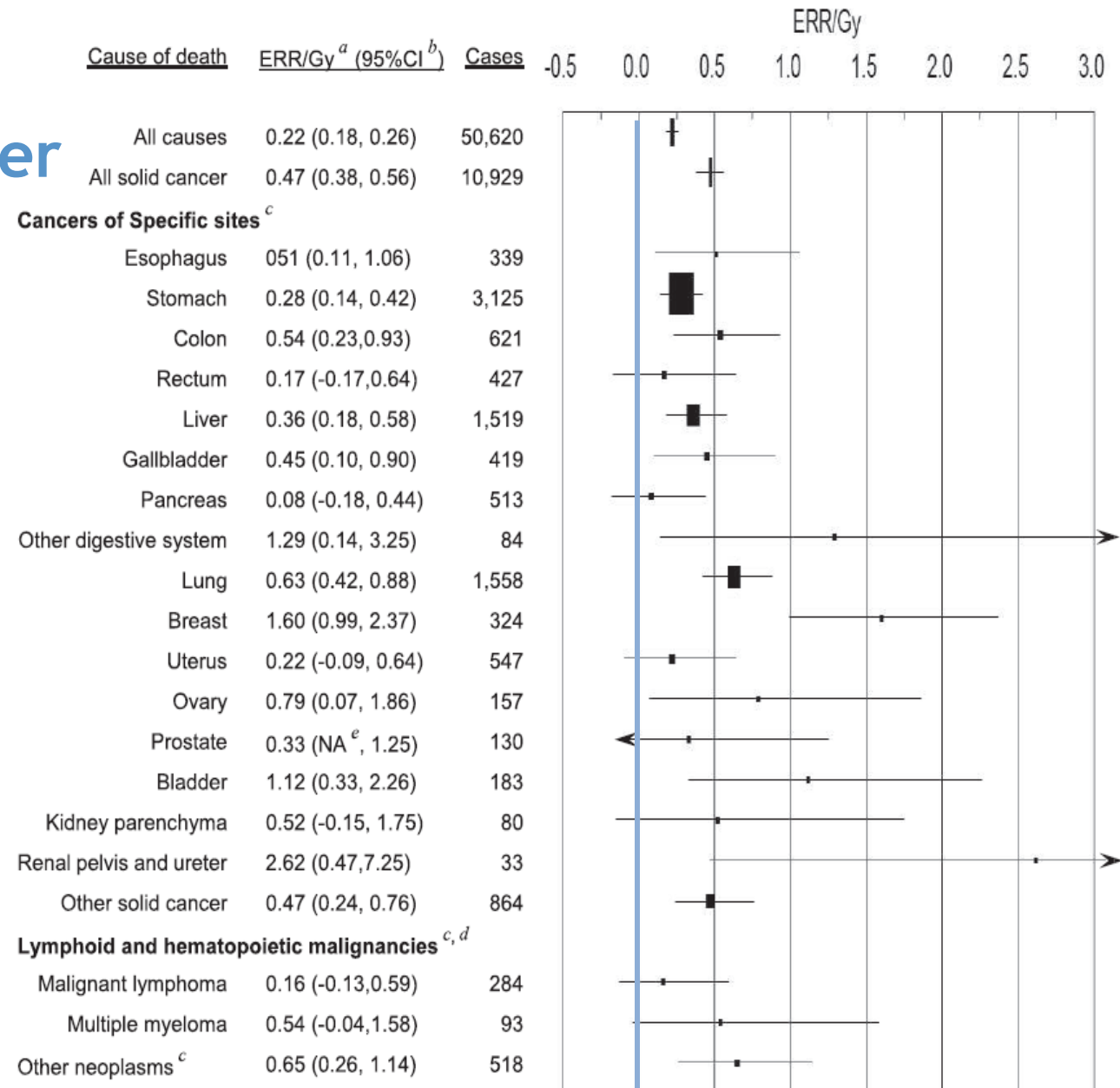
Linéaire: $\beta=0,42$

Linéo-Quadratique <2Gy:
 $\beta=0,22$
 $\beta^2=0,18$

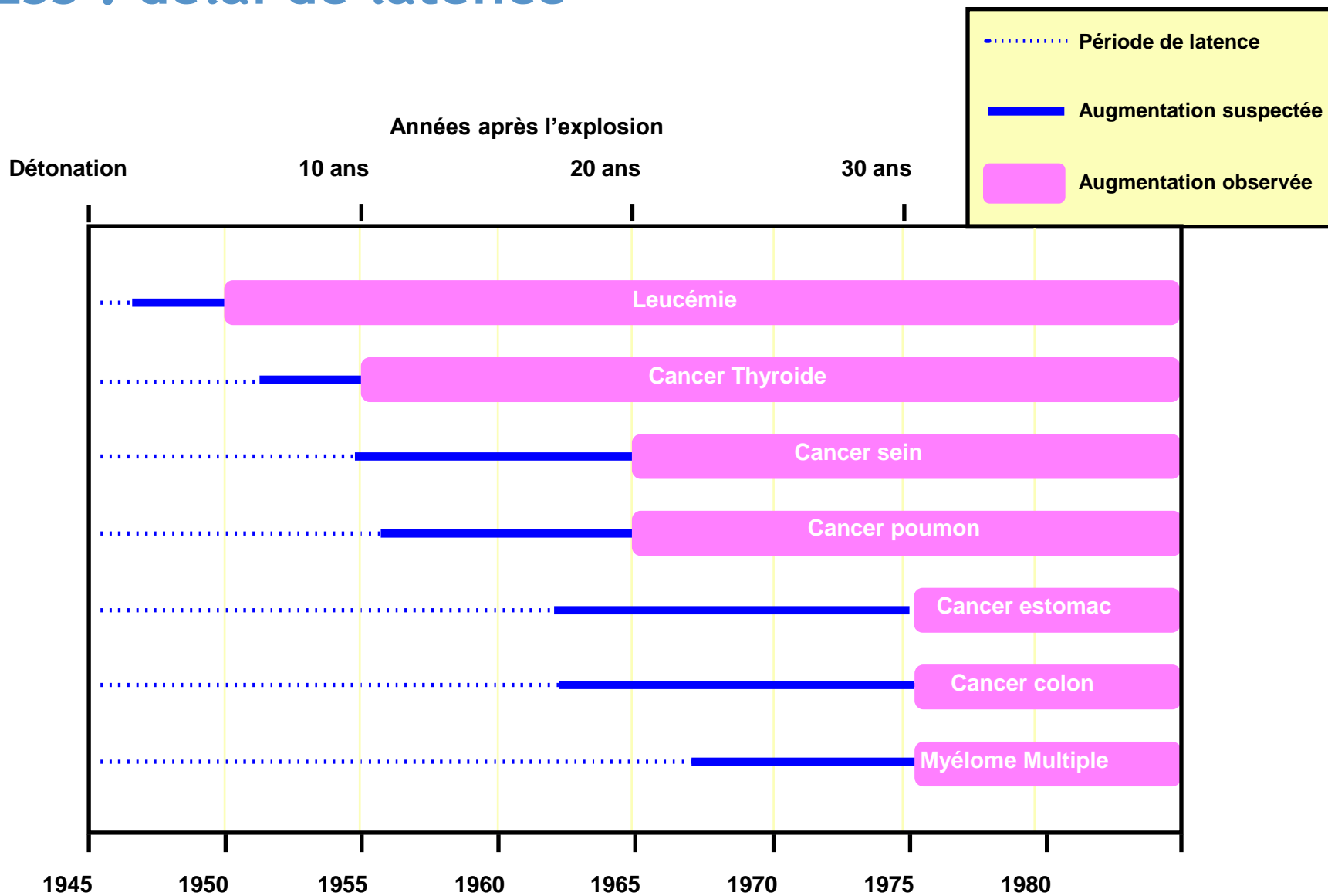
[Ozasa et al, Rad Res 2012]
Mortalité, Suivi 1950-2003

LSS : excès de risque relatif par site de cancer

[Ozasa et al, Rad Res 2012]
Mortalité, Suivi 1950-2003

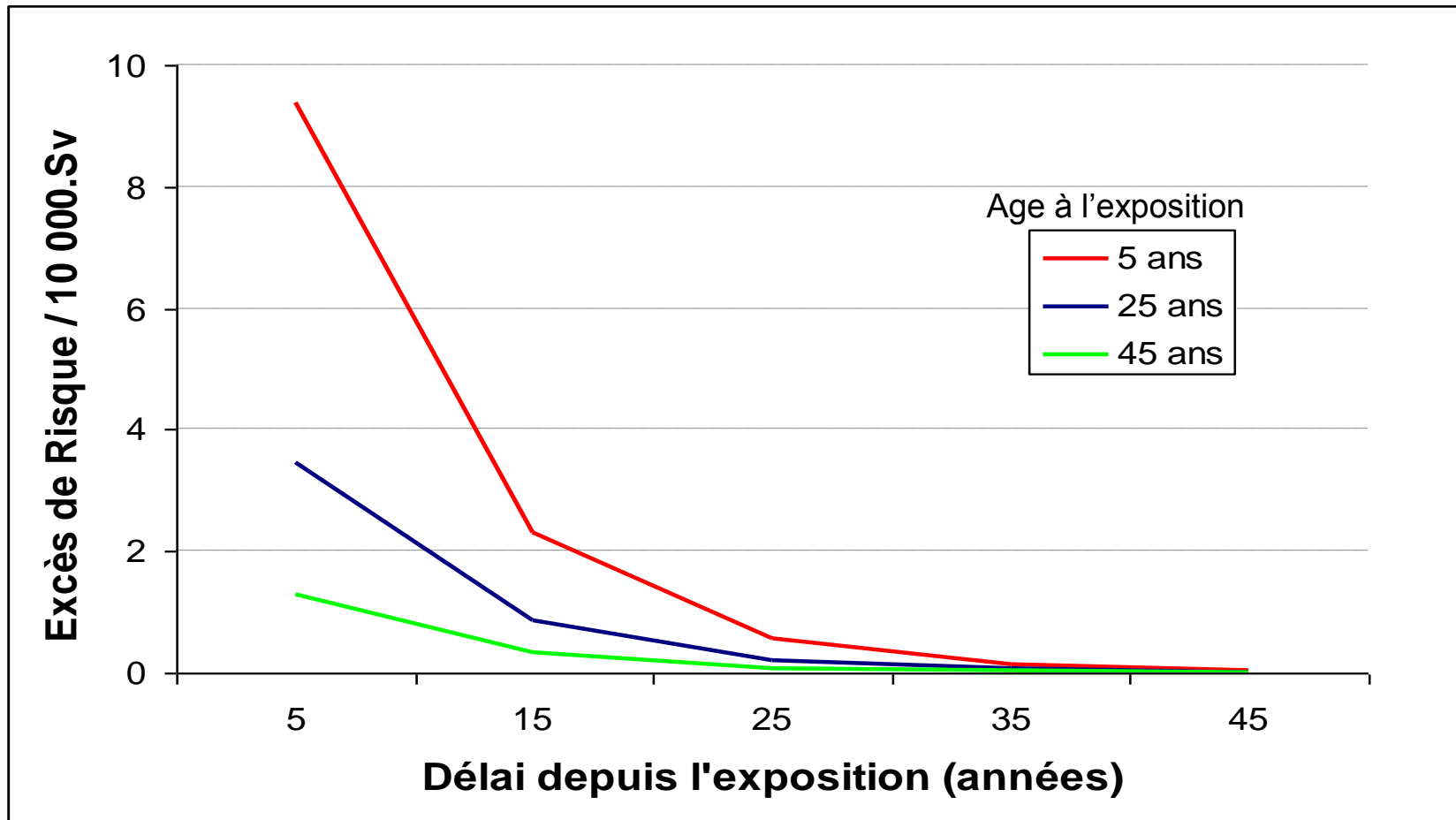


LSS : délai de latence



LSS : effet de l'âge à l'exposition et de l'âge atteint

Risque de leucémie lymphoïde aiguë



[Preston Rad Res1994]
Incidence 1950-1987

Coefficients de risque primaires dans la CIPR 103

Base: Life Span Study

données d'incidence des cancers

	Cancers solides	Leucémies
Source	[Preston et al, Rad Res 2007]	[Preston et al, Rad Res 1994]
Suivi	1958-98	1950-87
Dosimétrie	DS02	DS86
Modèle	Linéaire	Linéo-Quadratique
Latence minimum	5 ans	2 ans
Facteurs modifiants	Sexe, âge à l'exposition, âge atteint	

(+ cancers de la peau et des os,
basés sur [CIPR 1991])

Coefficients de risque primaires dans la CIPR 103

	ERR par Gy		EAR par Gy pour 10000	
	Homme	Femme	Homme	Femme
Tous organes solides *	0,35	0,58	43,20	59,83
Oesophage *	0,40	0,65	0,48	0,66
Estomac *	0,23	0,38	6,63	9,18
Colon *	0,68	0,33	5,76	2,40
Foie *	0,25	0,40	4,18	1,30
Poumon *	0,29	1,36	6,47	8,97
Sein *		0,87		10,90
Ovaire *		0,32		1,47
Vessie *	0,67	1,10	2,00	2,77
Thyroïde *	0,53	1,05	0,69	2,33
Autres cancers solides *	0,22	0,17	7,55	10,45
Leucémie **	3,9		2,7	

* à l'âge de 70 ans pour une exposition à l'âge de 30 ans

** d'après Preston et al, Rad Res 1994

(+ cancers de la peau et des os, basés sur [CIPR 1991])

Etapes de l'évaluation des risques stochastiques

1, Description du risque sur les données observées

-> coefficient de risque primaire

choix du modèle; quantification de la relation dose-réponse, détermination des facteurs modifiants

2, Inférence et extrapolation

-> relation de portée générale

estimations en deçà des points observés (extrapolation), au delà de la durée d'observation (projection), à d'autres populations (transport du risque), à d'autres conditions d'irradiation (DDREF)

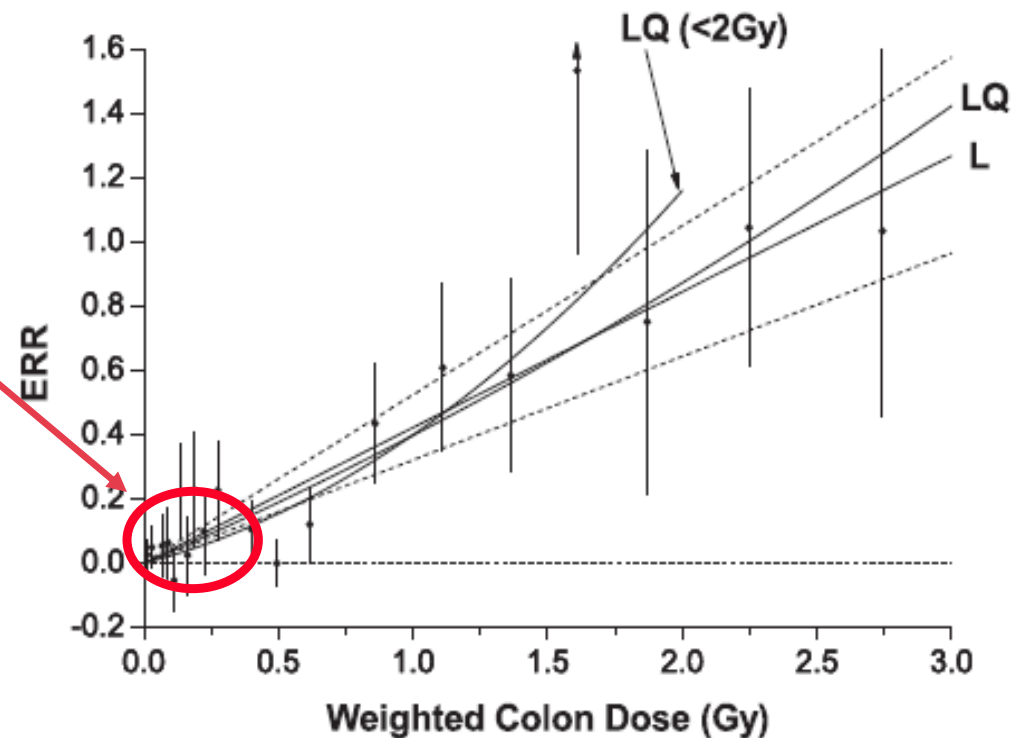
3, Mesure de l'effet, indicateurs de synthèses

-> estimation du détriment sanitaire

excès de cancer attribuable sur la vie entière, qualité de vie, perte d'espérance de vie, effets héréditaires

Evaluation des risques radio-induits : hypothèses nécessaires

Solid cancer



Extrapolation: application de la relation en dessous du domaine de dose sur lequel elle a été estimée

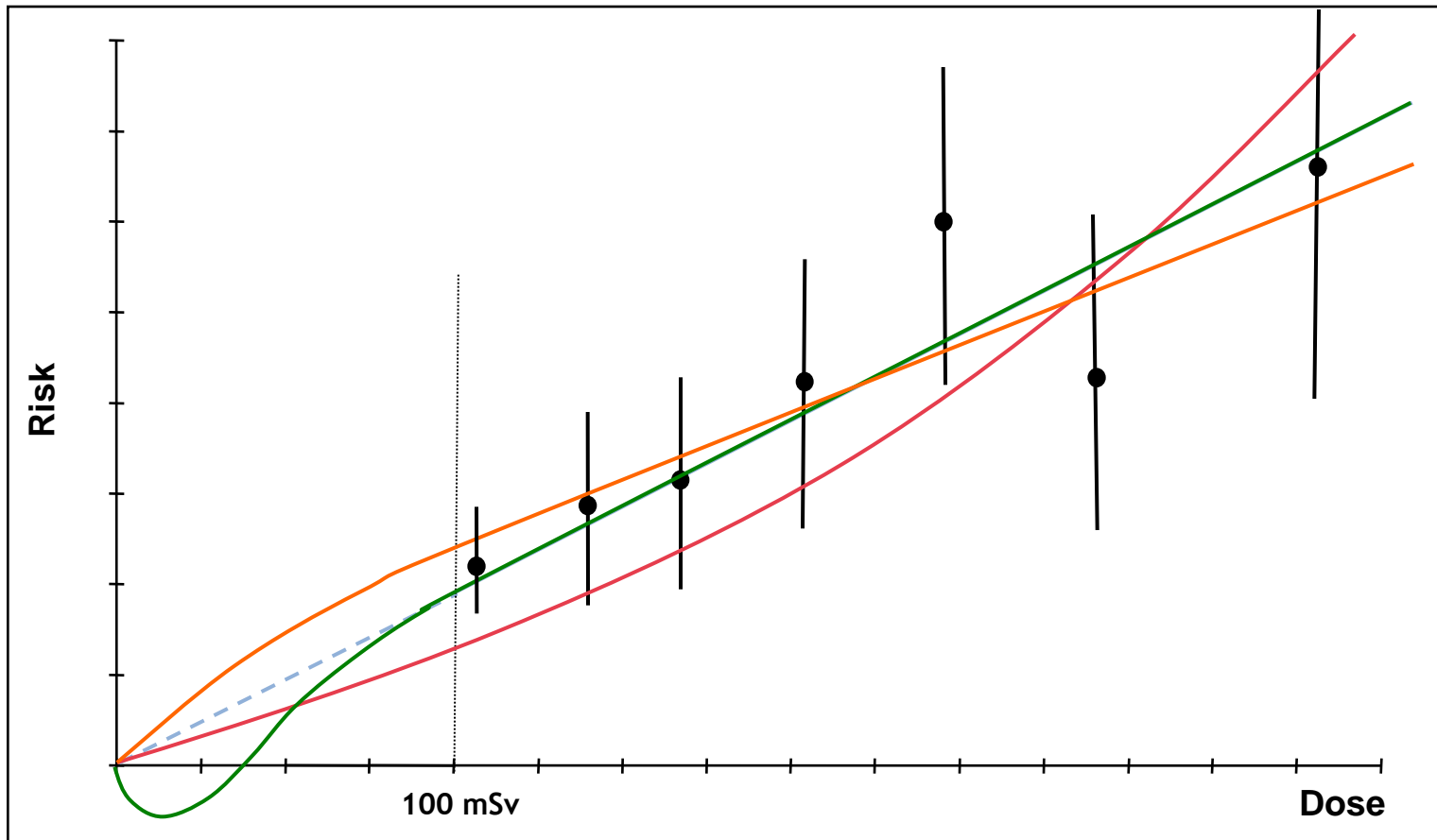
Extrapolation aux faibles doses

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

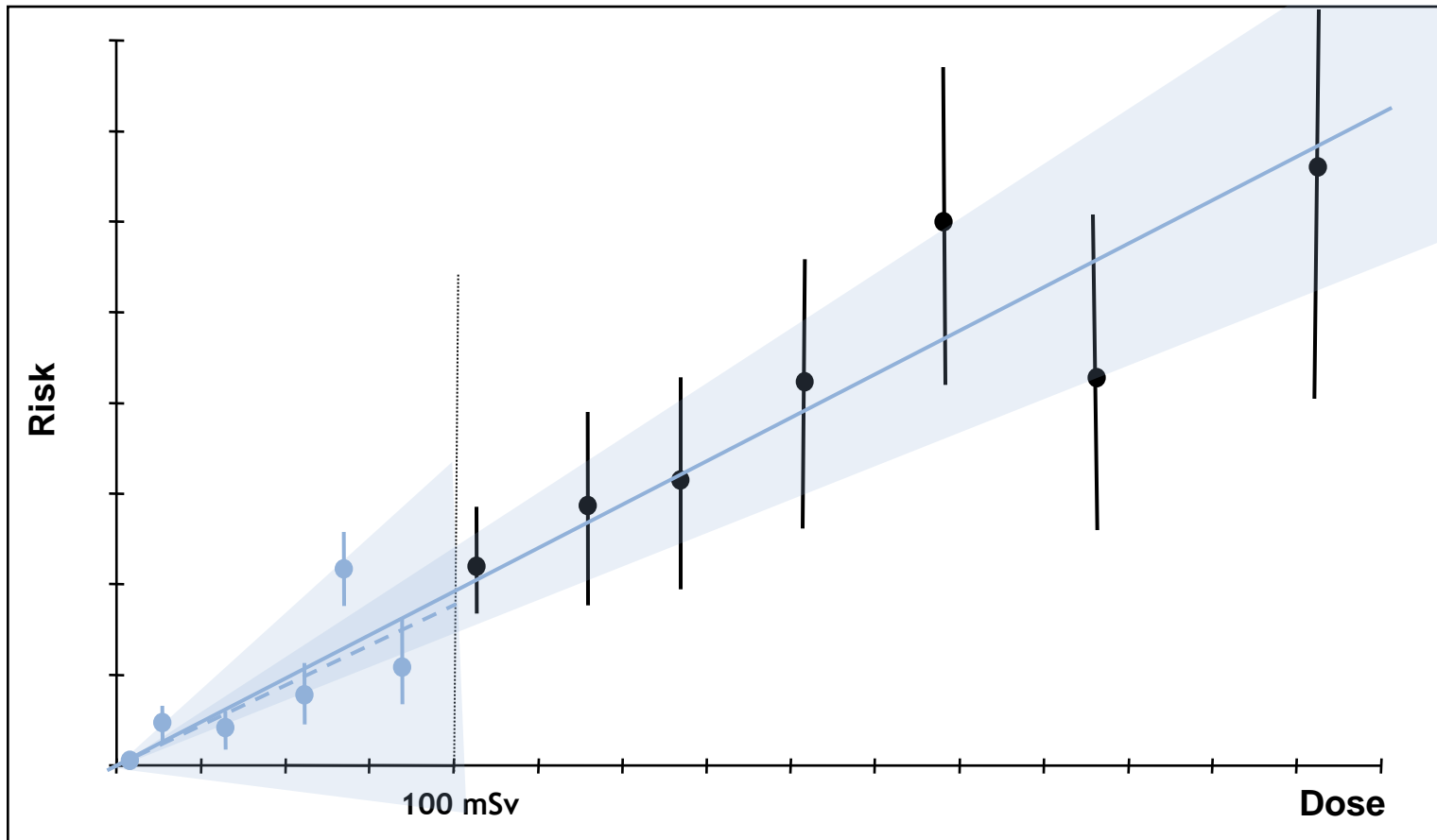
« ... la Commission ... considère que l'adoption du modèle LNT... fournit une base prudente pour les besoins pratiques de la protection radiologique, à savoir la gestion des risques en rapport avec l'exposition à de faibles doses de rayonnement. »

[CIPR 103, 2007]

Quantifier la relation dose-réponse aux faibles doses

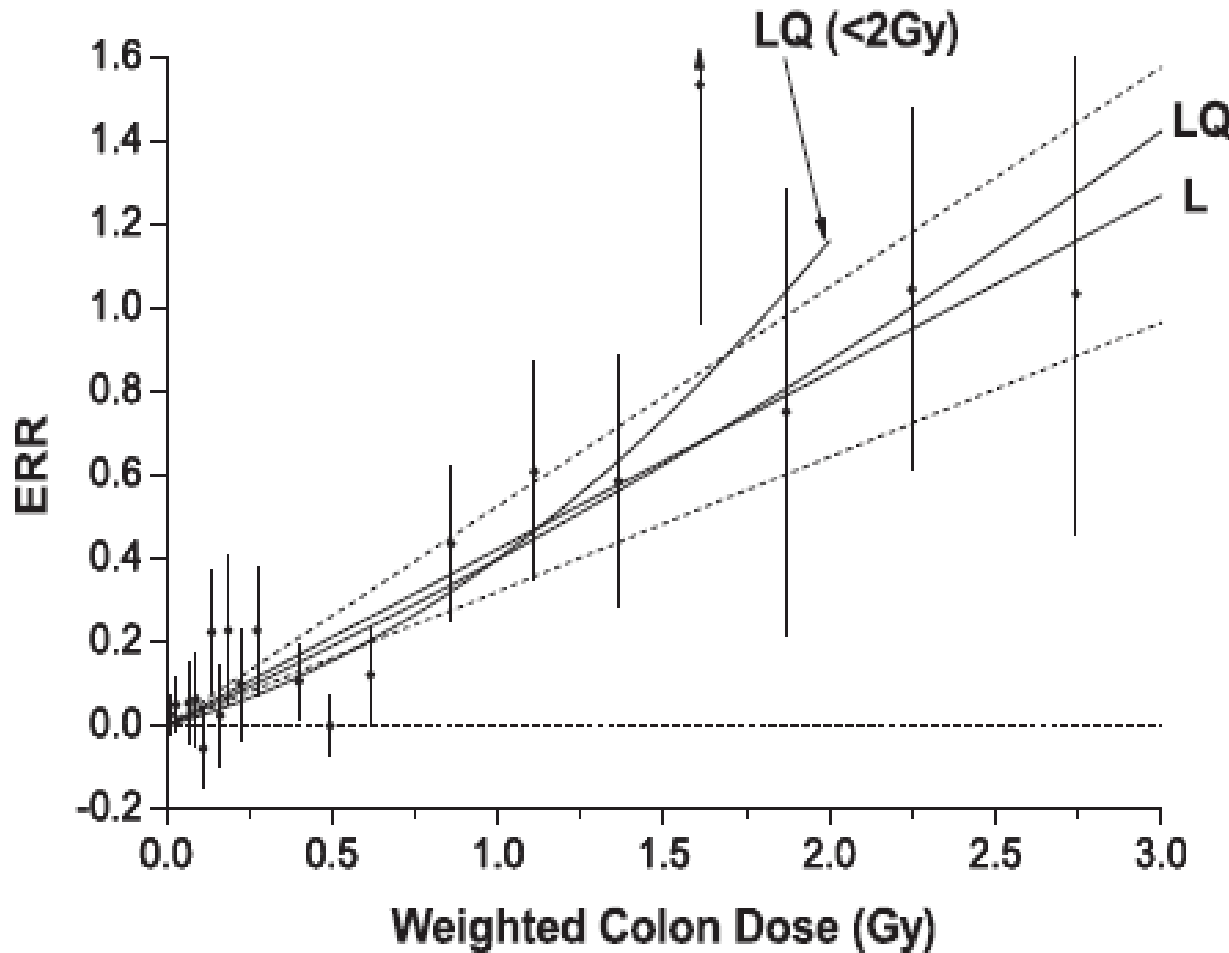


Quantifier la relation dose-réponse aux faibles doses



LSS : excès de risque relatif de cancers solides

Solid cancer



Linéaire: $\beta=0,42$

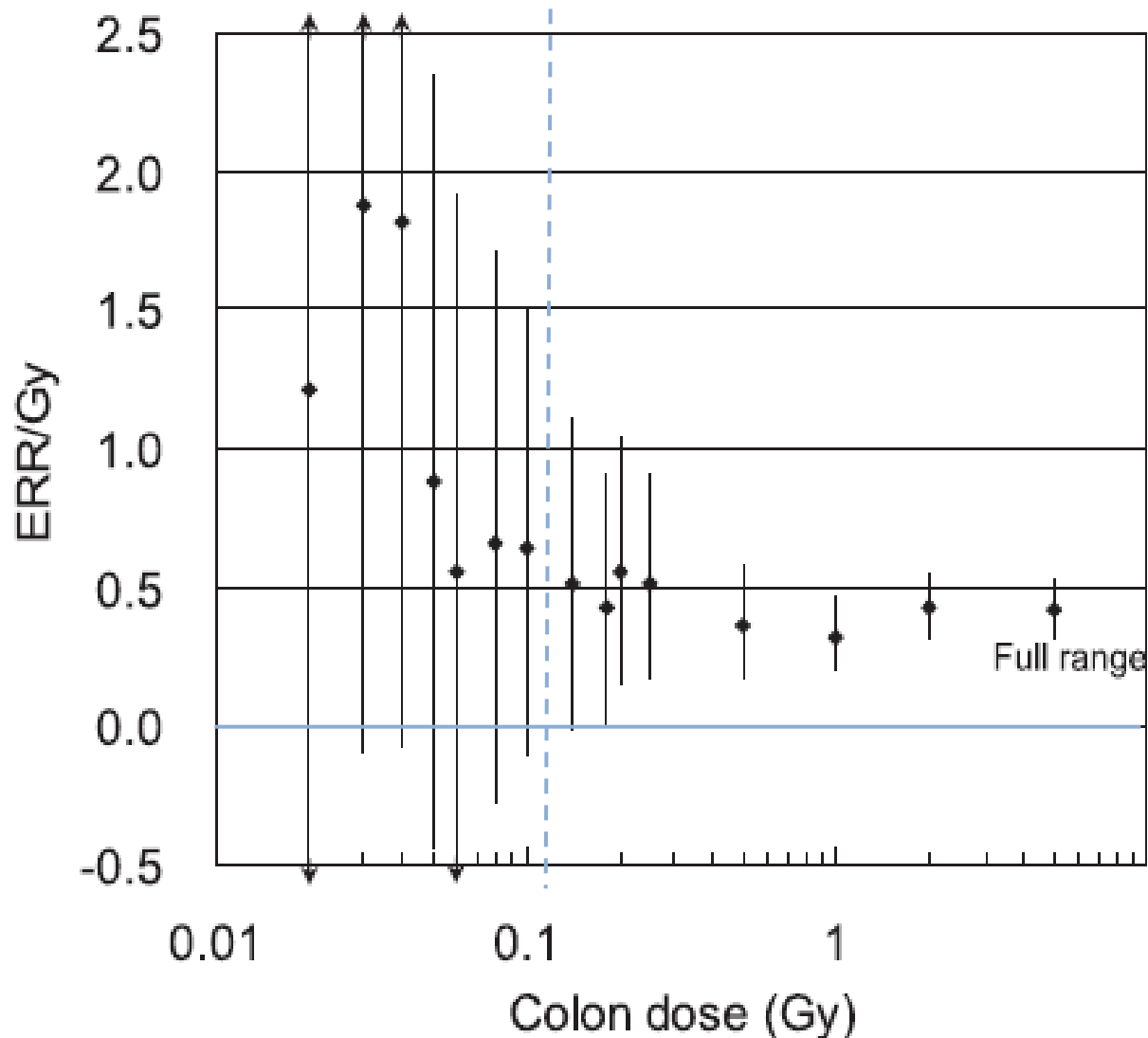
Linéo-Quadratique <2Gy:
 $\beta=0,22$
 $\beta^2=0,18$

[Ozasa et al, Rad Res 2012]

LSS : excès de risque relatif aux faibles doses

Cancers solides

ERR modèle linéaire
sur zones de dose
restreintes

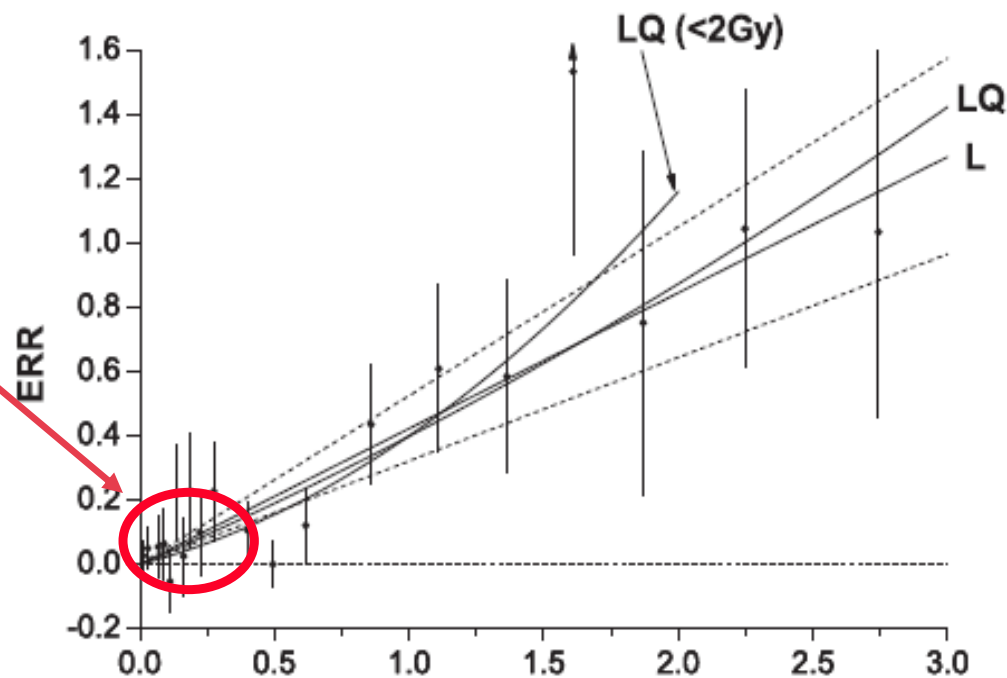


[Ozasa et al, Rad Res 2012]

Mortalité, Suivi 1950-2003

Evaluation des risques radio-induits : hypothèses nécessaires

Solid cancer



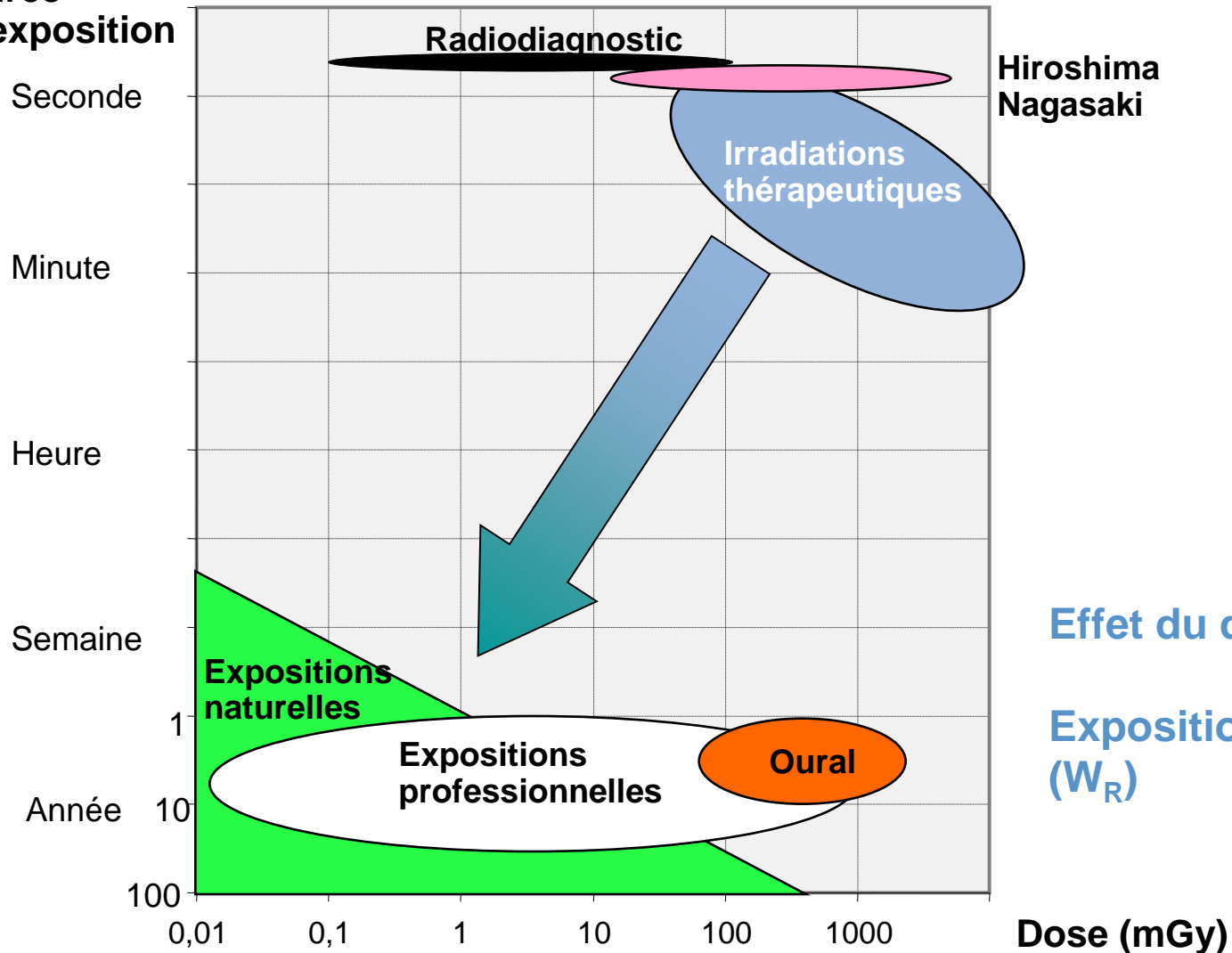
Extrapolation: application de la relation en dessous du domaine de dose sur lequel elle a été estimée

Analogie : application de la relation à des expositions différentes de celle de la population sur laquelle elle a été estimée

Exposition externe aigue

Distances d'extrapolation

Durée d'exposition



Effet du débit de dose ?

Expositions composites ?
(W_R)

Facteur de réduction aux faibles doses et débits de dose

DDREF (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor) :

Facteur de réduction pour estimer l'effet des rayonnements
délivrés à faible doses et faibles débits de dose :

doses absorbées inférieures à 0,2 Gy ou débit inférieur à 0,1 Gy/h

Organisme	Année	DDREF
NCRP	1980	2 à 10
UNSCEAR	1986	5
	1988	2 à 10
BEIR V	1990	2
CIPR 60	1990	2
BEIR VII	2005	1,5
CIPR 103	2007	2

NCRP : National Council on Radiation Protection and Measurements (USA)

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (ONU)

BEIR : Biological Effects of Ionising Radiations (National Academy of Sciences, USA)

CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique

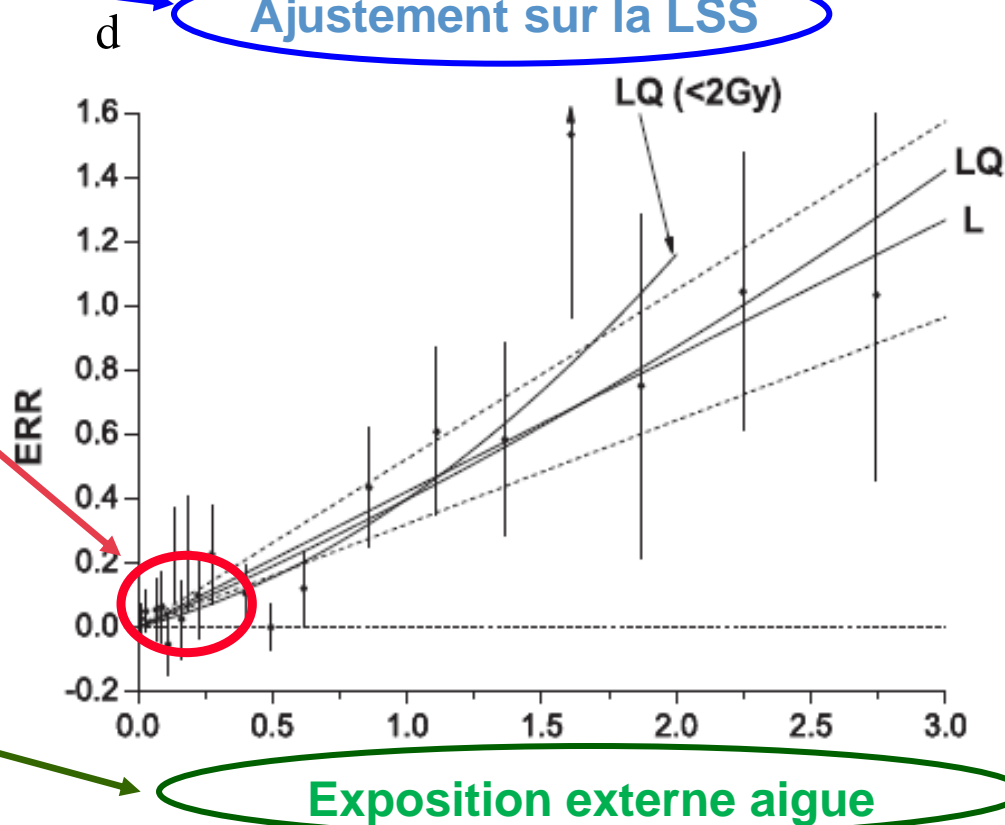
Evaluation des risques radio-induits : hypothèses nécessaires

Transposition: application de la relation à une population différente de celle sur laquelle elle a été estimée

Ajustement sur la LSS

Extrapolation: application de la relation en dessous du domaine de dose sur lequel elle a été estimée

Analogie : application de la relation à des expositions différentes de celle de la population sur laquelle elle a été estimée



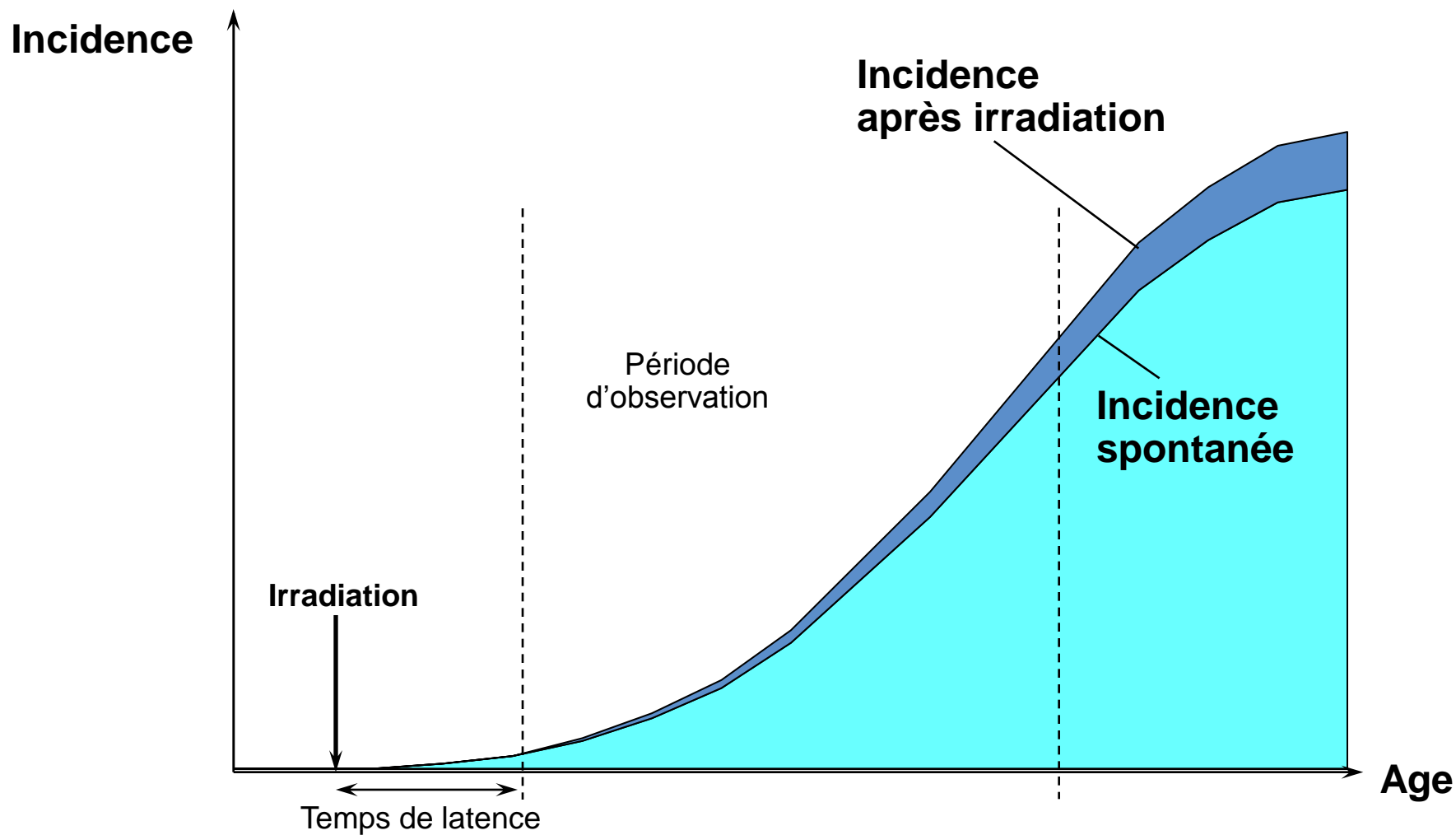
Variabilité des taux de cancer de base

Taux de mortalité standardisés pour 100 000 / an (OMS 1988)

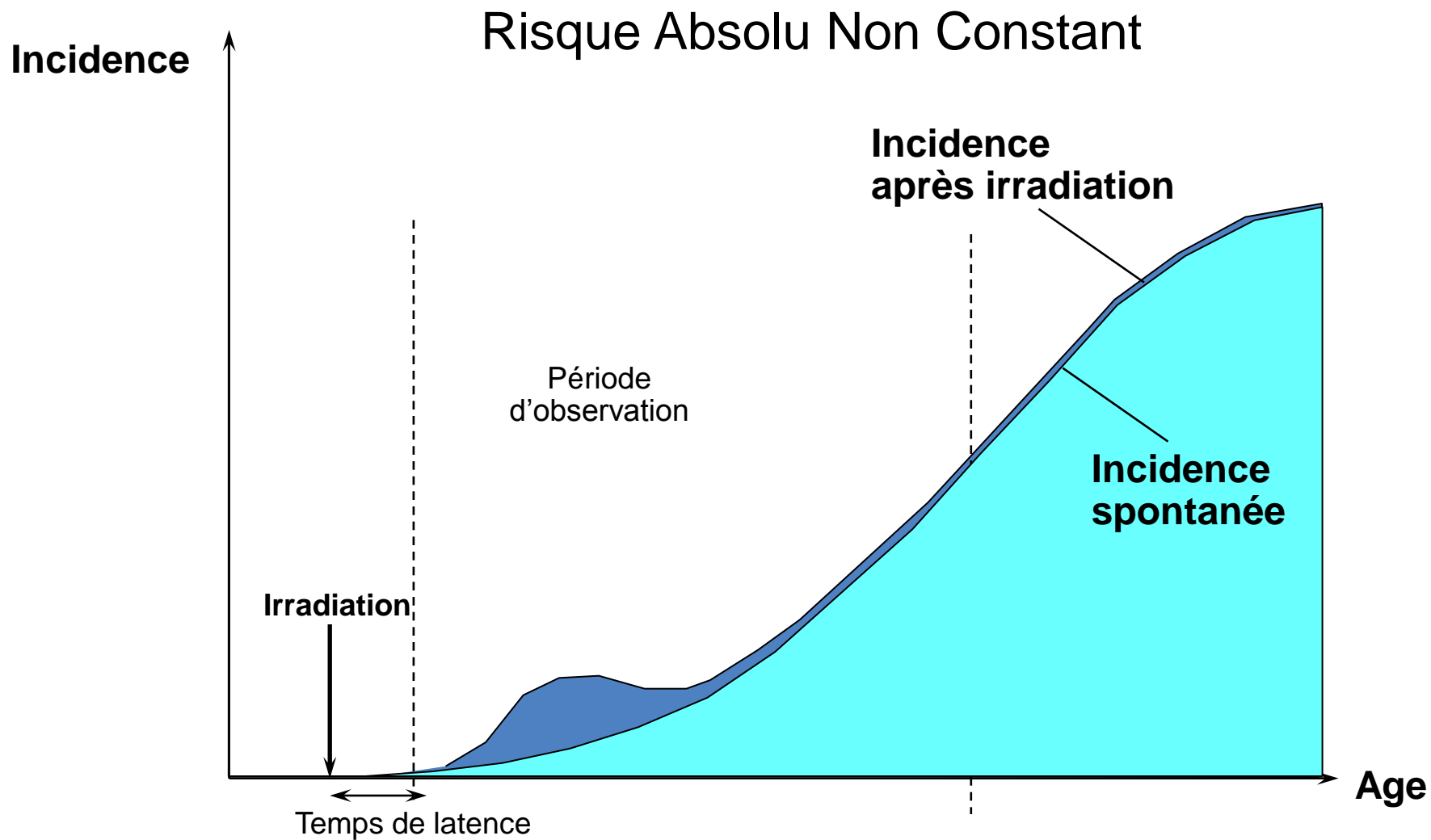
	Lung (M+F)	Breast (F)	Stomach (M+F)
United States	53	32	6
Japan	25	8	41
United Kingdom	57	42	16
France	32	27	10

Modèle Multiplicatif

Risque Relatif Constant



Modèle Additif



Modèle de transfert de risque

Organe	EAR	ERR
moelle osseuse	100%	0%
colon	50%	50%
estomac	50%	50%
poumon	70%	30%
sein	100%	0%
gonades	50%	50%
œsophage	50%	50%
foie	50%	50%
thyroïde	0%	100%
vessie	50%	50%
os (surface)	50%	50%
peau	0%	100%
cerveau	50%	50%
glandes salivaires	50%	50%
autres tissus	50%	50%

* glandes surrénales, région extra-thoracique, vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscles, muqueuse buccale, pancréas, prostate, intestin grêle, rate, thymus, col et corps de l'utérus

(ICRP 103, 2007)

Etapes de l'évaluation des risques stochastiques

1, Description du risque sur les données observées

-> coefficient de risque primaire

choix du modèle; quantification de la relation dose-réponse, détermination des facteurs modifiants

2, Inférence et extrapolation

-> relation de portée générale

estimations en deçà des points observés (extrapolation), au delà de la durée d'observation (projection), à d'autres populations (transport du risque), à d'autres conditions d'irradiation (DDREF)

3, Mesure de l'effet, indicateurs de synthèses

-> estimation du détriment sanitaire

excès de cancer attribuable sur la vie entière, qualité de vie, perte d'espérance de vie, effets héréditaires

Evaluation du risque de cancer vie entière

Lifetime Attributable Risk (LAR)

Fonction de survie (mortalité toutes causes)

Taux de base de cancer

Calcul de la probabilité cumulée de cancer additionnelle jusqu'à 90 ans

Populations de référence

Populations composites Asiatiques et Euro-Américaines, hommes et femmes

Taux de cancer moyens, période 1993-97

Moyennage

Sur les 2 sexes et les différents taux de base

2 Scénarios

Population générale (risque 0-90 ans, exposition 0-85 ans)

Adulte travailleur (risque 18-90 ans, exposition 18-65 ans)



Coefficient de risque nominal

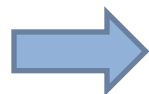
Evaluation du risque de maladies héréditaires

Probabilité d'effets génétiques nocifs (maladies mendéliennes, multifactorielles et chromosomiques) qui se manifestent chez les descendants d'une population ayant subi des expositions aux rayonnements ionisants

Jamais observé chez l'homme (peu d'études disponibles sur plusieurs générations)

Estimations du risque basées sur les taux moyens de mutations induites par les rayonnements ionisants chez la souris, limitée aux 2 premières générations (UNSCEAR 2001)

Connaissances supplémentaires et nouvelle méthodologie: entraînent une réduction du risque estimé par rapport à la CIPR 60



Risque estimé de 0,2% par Sv aux gonades

Risque nominal

Population générale

	Coefficient de risque nominal R
Œsophage	15
Estomac	79
Colon	65
Foie	30
Poumon	114
Os	7
Peau	1000
Sein	112
Ovaire	11
Vessie	43
Thyroïde	33
Moelle osseuse	42
Autres cancers solides	144
Gonades (effets héréditaires)	20
Total	1715

R reflète la probabilité cumulée de survenue de cancer jusqu'à l'âge de 90 ans
S'exprime en nombre de cas pour 10 000 personnes par Sv

Du risque nominal au détriment

Pondération par la **fraction de létalité**

Ratio proche de 1 pour les cancers très létaux (foie, poumon)
et proches de zéro pour les cancers peu létaux (peau, thyroïde)

Pondération par la **qualité de vie**

Poids donné aux cancers non-létaux selon le degré de souffrance
et la lourdeur du traitement

Pondération par la **durée de vie perdue**

Facteur relatif à la perte d'espérance de vie sans cancer moyenne de 15
ans pour l'ensemble des cancers

Varie de plus de 1 pour les cancers survenant jeune (thyroïde ou sein)
à moins de 1 pour ceux survenant tard dans la vie (vessie, poumon)



Détriment par organe

Détriment: calcul

Population générale

	Coefficient de risque nominal	Fraction de létalité	Poids des cancers non-fatals	Durée de vie perdue relative	Détriment
	R	k	q	l	D
Oesophage	15	0,93	0,935	0,87	13
Estomac	79	0,83	0,846	0,88	68
Colon	65	0,48	0,530	0,97	48
Foie	30	0,95	0,959	0,88	27
Poumon	114	0,89	0,901	0,80	90
Os	7	0,45	0,505	1,00	5
Peau	1000	0,002	0,002	1,00	4
Sein	112	0,29	0,365	1,29	80
Ovaire	11	0,57	0,609	1,12	10
Vessie	43	0,29	0,357	0,71	17
Thyroïde	33	0,07	0,253	1,29	13
Moelle osseuse	42	0,67	0,702	1,63	61
Autres cancers solides	144	0,49	0,541	1,03	113
Gonades (effets héréditaires)	20	0,80	0,820	1,32	25
Total	1715				574

D s'exprime en nombre de cas pour 10 000 personnes par Sv

Détriment : population générale et travailleurs

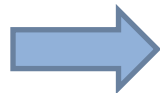
	Population générale		Travailleurs	
	Détriment	Détriment relatif	Détriment	Détriment relatif
Oesophage	13,1	0,023	14,2	0,034
Estomac	67,7	0,118	51,8	0,123
Colon	47,9	0,083	43,0	0,102
Foie	26,6	0,046	19,7	0,047
Poumon	90,3	0,157	120,7	0,286
Os	5,1	0,009	3,4	0,008
Peau	4,0	0,007	2,7	0,006
Sein	79,8	0,139	32,6	0,077
Ovaire	9,9	0,017	6,6	0,016
Vessie	16,7	0,029	19,3	0,046
Thyroïde	12,7	0,022	3,4	0,008
Moelle osseuse	61,5	0,107	23,9	0,057
Autres cancers solides	113,5	0,198	65,4	0,155
Gonades (effets héréditaires)	25,4	0,044	15,3	0,036
Total	574	1	422	1

D s'exprime en nombre de cas pour 10 000 personnes par Sv

Détriment : domaine d'application

Conditions d'application

- Individu « moyen » (les 2 sexes, taux de base moyen de plusieurs populations)
- Doses $< 0,2$ Gy ou débit de dose $< 0,1$ Gy/h
- Exposition homogène de tous les organes
- 2 populations :
 - public (0-85 ans)
 - travailleurs (18-65 ans)



Outil de gestion

Applicable à toutes les situations

Détriment

Détriment (10^{-2} par Sv)	CIPR 60 1990	CIPR 103 2007
Population générale		
Risque de cancer	6,6	5,5
Effets héréditaires	1,3	0,2
Total	7,3	5,7
Travailleurs		
Risque de cancer	4,8	4,1
Effets héréditaires	0,8	0,1
Total	5,6	4,2

Détriment : interprétation

Détriment dû au cancer

Personne du public

- exposée à 1 Sv
- exposée à 100 mSv
- exposée pendant 70 ans à 1 mSv

Travailleurs

- exposée à 20 mSv
- exposée à 100 mSv
- exposée pendant 70 ans à 2 mSv

OUTIL DE GESTION

4,1 %

0,4 %

0,3 %

Probabilité de base de cancer vie entière

36 % (29 à 42%)

Détriment et W_T

	Population générale		W_T
	Détriment	Détriment relatif	
Œsophage	13,1	0,023	0,04
Estomac	67,7	0,118	0,12
Colon	47,9	0,083	0,12
Foie	26,6	0,046	0,04
Poumon	90,3	0,157	0,12
Os	5,1	0,009	0,01
Peau	4,0	0,007	0,01
Sein	79,8	0,139	0,12
Ovaire	9,9	0,017	
Vessie	16,7	0,029	0,04
Thyroïde	12,7	0,022	0,04
Moelle osseuse	61,5	0,107	0,12
Autres cancers solides *	113,5	0,198	0,12
Gonades (effets héréditaires)	25,4	0,044	0,08
Cerveau			0,01
Glandes salivaires			0,01
Total	574	1	1

* Tissus restants (14 au total): glande surrénale, région extra-thoracique, vésicule biliaire, cœur, reins, noyaux lymphatiques, muscle, muqueuse orale, pancréas, prostate, intestin grêle, moelle, thymus, utérus/cervix

Facteurs de pondération tissulaires W_T

W_T	CIPR 60 1990	CIPR 103 2007
moelle osseuse	0,12	0,12
colon	0,12	0,12
estomac	0,12	0,12
poumon	0,12	0,12
sein	0,05	0,12
gonades	0,20	0,08
œsophage	0,05	0,04
foie	0,05	0,04
thyroïde	0,05	0,04
vessie	0,05	0,04
os (surface)	0,01	0,01
peau	0,01	0,01
cerveau		0,01
glandes salivaires		0,01
autres tissus	0,05	0,12*
	1,00	1,00

* glandes surrénales, région extra-thoracique, vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscles, muqueuse buccale, pancréas, prostate, intestin grêle, rate, thymus, col et corps de l'utérus

Evolution possible

Mise à jour et amélioration de la cohérence interne

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et ajustement des paramètres impliqués dans le calcul du déchet

Effets des expositions faibles chroniques

Validité du facteur de réduction d'effet aux faibles doses et débits de doses

Risques non cancers

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et séparation entre effets stochastiques et réactions tissulaires

Mise à jour scientifique

Survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki

- Extension du suivi: meilleure estimation de l'effet modifiant de l'âge atteint
- Nouveaux résultats sur l'incidence des cancers de l'os [Samartzis et al. J Bone Joint Surg 2011] et l'incidence des cancers de la peau [Sugiyama et al. Rad Res 2014] (résultats considérés dans la CIPR 103 datent de 1991)
- Nouveaux résultats sur l'incidence des leucémies [Hsu et al. Rad Res 2013] (résultats considérés dans la CIPR 103 datent de 1994)
- Modèle Linéaire-quadratique préféré pour les cancers solides sur 0-2 Gy (suivi de mortalité jusqu'en 2003, [Osaza et al. Rad Res 2012])

Autres études

- Contaminations internes (Mayak, Tchernobyl...)
- Expositions chroniques (études travailleurs...)
- Expositions durant l'enfance (études scanners...)

Ajustement des paramètres de calcul du détriment

- Intégration du risque héréditaire comme composante du risque nominal
- Etapes de moyennage (sexe, région)
- Paramètres de létalité issus d'une seule étude américaine, datant de 1989
- Détermination des paramètres de qualité de vie et de durée de vie perdue
- W_T pour cerveau et glandes salivaires mais pas de risque nominal
- Valeurs de W_T éloignées du détriment relatif des adultes
- Identification des sources majeures d'incertitude

Evolution possible

Mise à jour et amélioration de la cohérence interne

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et affinement des paramètres impliqués dans le calcul du déchet

Effets des expositions faibles chroniques

Validité du facteur de réduction d'effet aux faibles doses et débits de doses

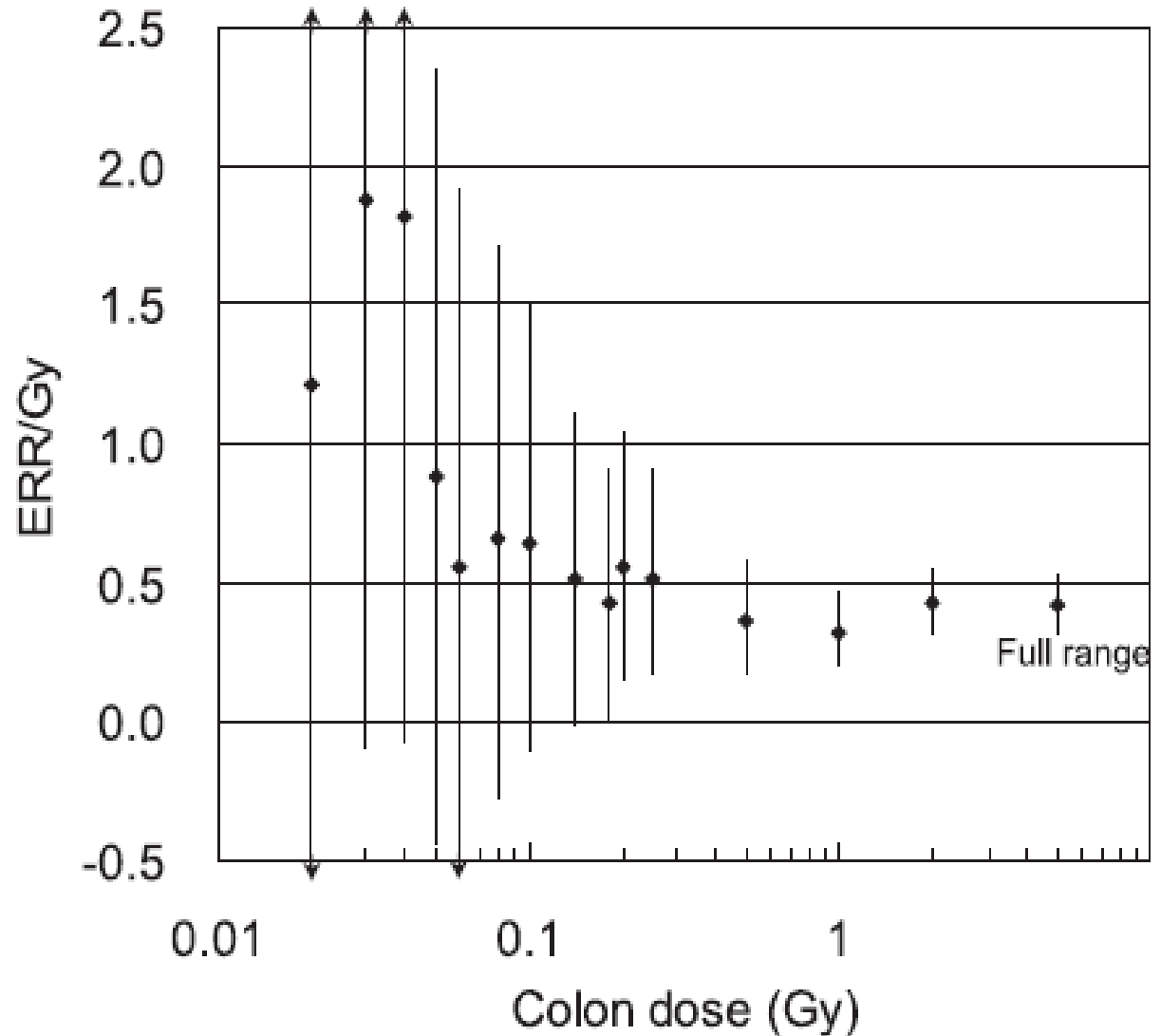
Risques non cancers

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et séparation entre effets stochastiques et réactions tissulaires

Effets des expositions à faible dose (DEF)

Cancers solides

ERR modèle linéaire
sur zones de dose
restreintes

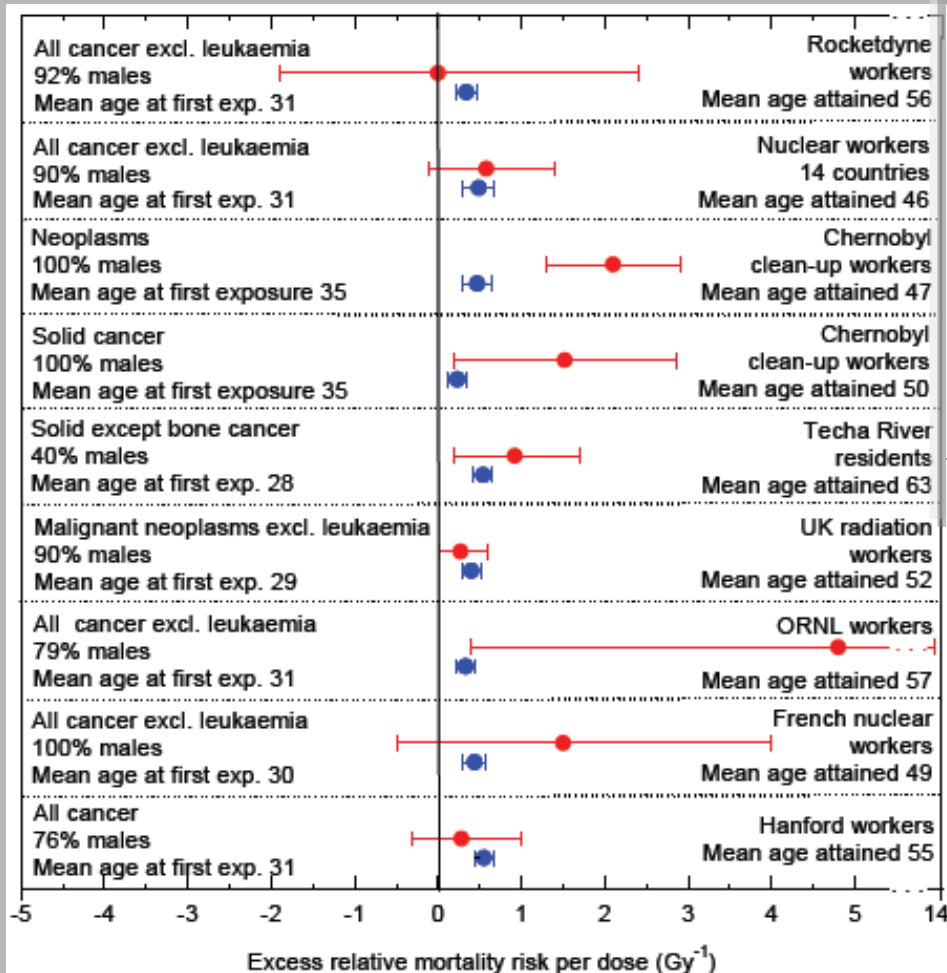


[Ozasa et al, Rad Res 2012]

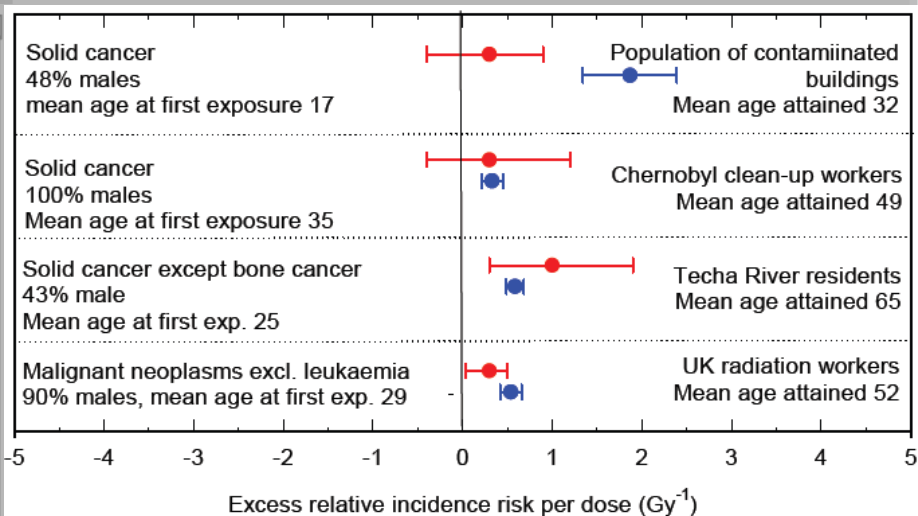
Mortalité, Suivi 1950-2003

Effets des expositions à faible débit de dose (DREF)

Mortalité



Incidence



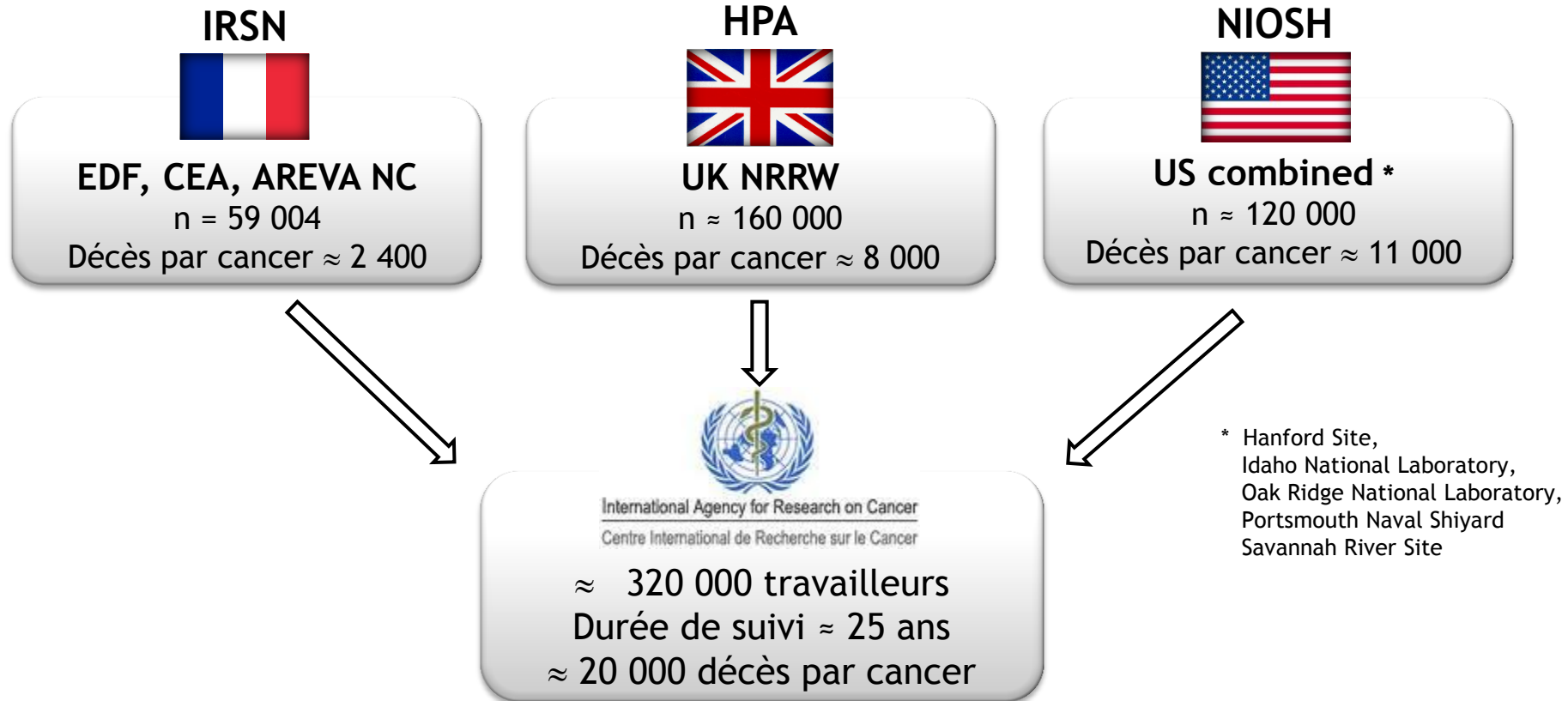
● | — | Etude expo chronique
● | — | LSS

➔ Pas d'indication que l'ERR par Gy soit plus faible pour les expositions chroniques

[Jacob et al, OEM 2009]

Effets des expositions à faible débit de dose (DREF)

Le projet INWORKS



Evolution possible

Mise à jour et amélioration de la cohérence interne

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et affinement des paramètres impliqués dans le calcul du détrimement

Effets des expositions faibles chroniques

Validité du facteur de réduction d'effet aux faibles doses et débits de doses

Risques non cancers

Prise en compte des nouveaux résultats scientifiques et séparation entre effets stochastiques et réactions tissulaires

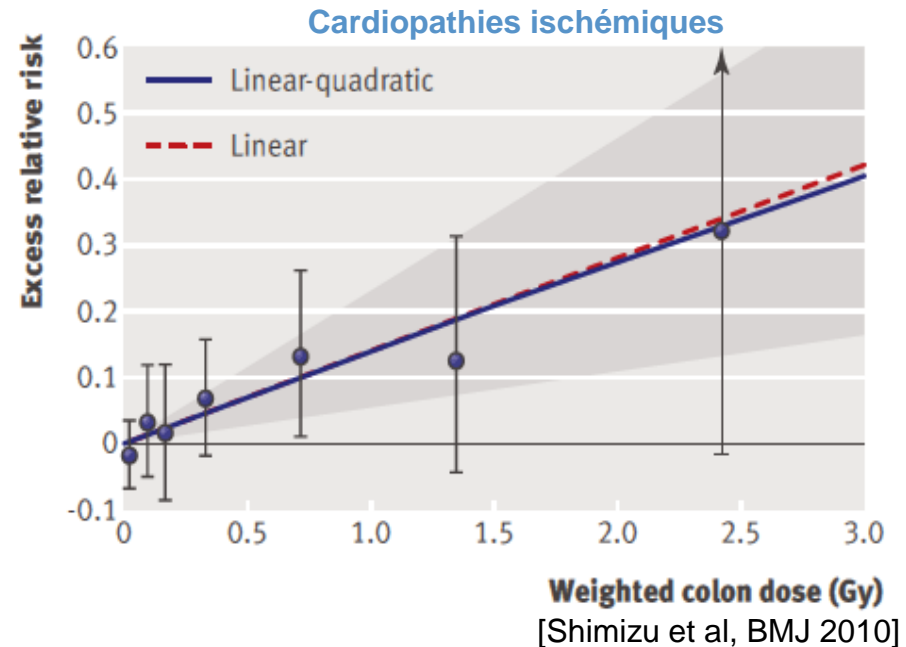
Dose et risque de pathologies circulatoires

Survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki

ERR à 1 Gy (Mortalité)

Leucémies	400%
Cancers solides	42%
Non cancer	14%
Cardiopathies ischémiques	17%
M Cérébrovasculaires	12%

[Preston et al RR 2003]



Méta-analyse des résultats disponibles

(LSS, Mayak, Tchernobyl, travailleurs du nucléaire...)

ERR/Sv

Cardiopathies ischémiques	10%	IC _{95%} [4% - 15%]
M Cérébrovasculaires	21%	IC _{95%} [2% - 39%]

[Little et al EHP 2012]

Effets non cancer

Evaluation du détriment pour les effets non-cancer ?

- Quels effets à long terme ?
- Faisabilité du calcul ?
- Sensibilité aux paramètres de calcul ?

Révision de la séparation entre réaction tissulaire et effet stochastique ?

- Révision récente des seuils pour la cataracte et les pathologies cardiovasculaires (CIPR 118) repose fortement sur des résultats épidémiologiques
- Effets à long terme à composante stochastique et déterministe ?

Conclusions

Systeme complet et coherent

Près de 40 ans d'élaboration

Basé sur les connaissances scientifiques et intégrant d'autres composantes (léthalité, qualité de vie, perte d'espérance de vie)

Systeme complexe

Nombreuses étapes et hypothèses sous-jacentes

Incertitudes non quantifiées

Outil de gestion

Simplification forte nécessaire à l'application pratique de la radioprotection

Non dédié à l'évaluation quantitative des risques

Evolution possible

Effets des faibles doses et débits de dose

Effets non cancer

Références

ICRP 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. Ann ICRP 2007 ; 37 : 2-4

ICRP 60. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Ann ICRP 1991; 21: 1-3

HUBERT Ph. Evaluation du risque sur la vie entière dans les analyses de l'UNSCEAR, du BEIR et de la CIPR. Radioprotection 1990; 25: 363-83

VAILLANT L & SCHNEIDER T. Evaluation du détriment associé à l'exposition aux faibles doses et faibles débits de dose dans le système de radioprotection. Environ Risque Santé 2012; 11: 149-59

HAMADA N & FUJIMICHI Y. Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects. J Radiat Res 2014; 55: 629-40