

The logo for IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) features the letters 'IRSN' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue.

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Les fondamentaux du système de radioprotection

Les doses de rayonnements ionisants et leur utilisation

F. Paquet
IRSN, CIPR

Pourquoi un exposé sur les doses?

En toxicologie et en médecine

Sert à contrôler l'effet (ou efficacité), selon le mode d'incorporation

Exprimée en g/unité de masse corporelle



Pourquoi un exposé sur les doses?

En Radioprotection

Exposition aux RI



Effets

aigue
chronique
interne
externe
alpha, beta, gamma, neutrons

déterministes à seuil
stochastiques sans seuil

Pourquoi un exposé sur les doses?

En Radioprotection

Exposition aux RI



Effets

Dose

aigue
chronique
interne
externe
alpha, beta, gamma, neutrons

déterministes à seuil
stochastiques sans seuil

2. Les différentes doses de rayonnement

Dose absorbée

Dose efficace

Dose équivalente

Dose collective

Dose engagée

2. Les différentes doses de rayonnement

Dose absorbée

Dose efficace

Dose équivalente

Dose collective

Dose engagée

2. Les différentes doses de rayonnement

La dose absorbée est la grandeur fondamentale

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad \text{en joules/kg soit en Gy (100 rads)}$$

dE est l'énergie moyenne transmise par le rayonnement
dm est la masse de matière qui reçoit le rayonnement

D'après ICRU, 1953, puis ICRU 19, 1971

2. Les différentes doses de rayonnement

Ce qu'elle fait

Grandeur physique

Peut être mesurée

Peut être exprimée pour tout type de cible (organe ou cellule)

Très spécifique d'une situation d'exposition

Utilisée dans le milieu médical

Permet contrôle efficacité traitement ou limitation effets secondaires

2. Les différentes doses de rayonnement

Ce qu'elle ne fait pas

Ne tient pas compte de la toxicité relative des différents rayonnements

Ne tient pas compte de la sensibilité des différents tissus



N'est pas directement liée aux effets
(grandeur physique)

La construction d'une nouvelle grandeur

Dose absorbée
moyenne, $D_{T,R}$
dans organe ou tissu

$D_{T,R}$

Dose absorbée
moyenne, $D_{T,R}$
dans organe ou tissus



Dose équivalente, H_T ,
dans un organe / tissu

$D_{T,R}$

$$\sum W_R D_{T,R}$$

Tient compte de la
toxicité relative des
différents rayonnements

W_R

Photons : 1
Electrons, Muons : 1
Protons : 2
Alpha : 20
Neutrons : Δ

Dose absorbée
moyenne, $D_{T,R}$
dans organe ou tissus



Dose équivalente, H_T ,
dans un organe / tissu

$$D_{T,R}$$

$$\sum w_R D_{T,R}$$

$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

Tient compte de la sensibilité
relative des différents tissus

Dose absorbée
moyenne, $D_{T,R}$
dans organe ou tissu



Dose équivalente, H_T ,
dans un organe / tissu



Dose efficace,
 E

Tissue or organ	ICRP 103
Gonads	0,08
Red bone marrow	0,12
Colon	0,12
Lung	0,12
Stomah	0,12
Bladder	0,04
Breast	0,12
Liver	0,04
Oesophagus	0,04
Thyroid	0,04
Skin	0,01
Bone surfaces	0,01
Remainder tissues	0,12
Brain	0,01
Salivary glands	0,01

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$

Tient compte de la sensibilité
relative des différents tissus

$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

En résumé,

Grandeur artificielle, multidimensionnelle, intégrant

- L'énergie moyenne déposée, D
- La toxicité relative des rayonnements, (w_R)
- La contribution de chaque tissu au détriment total (w_T)

$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

En résumé,

Gran **N'a absolument plus rien à voir** nt

- avec une grandeur physique
-
-

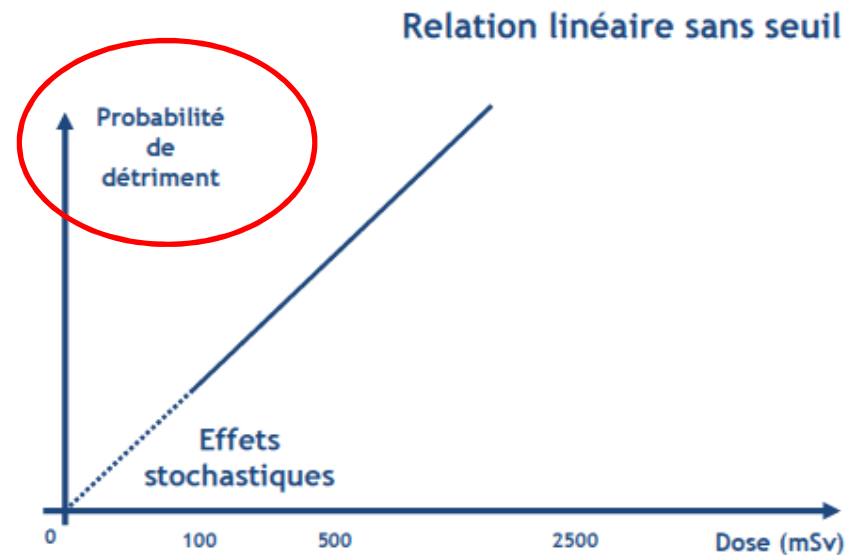
↓
Sv

3. Les limites de la dose efficace

La dose efficace est construite sur de nombreuses hypothèses, approximations et simplifications

3.1. Les hypothèses

3.1.1. La relation linéaire sans seuil (LNT)



Notion de détriment

Concept multi-dimensionnel incluant :

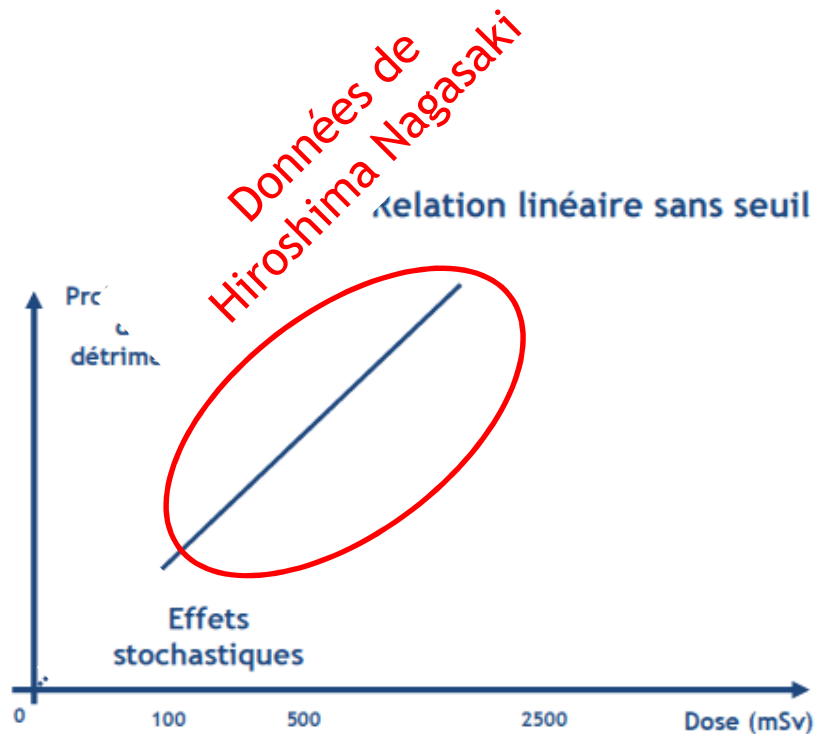
- probabilité de cancer fatal (et d'effets héréditaires)
- pondérée par probabilité de mortalité selon type de cancer
- pondérée par perte de qualité (et de durée) de vie

Combine donc la probabilité d'apparition d'effet sanitaire et la gravité de cet effet

3.1. Les hypothèses

3.1.1. La relation linéaire sans seuil (LSS)

Elle repose sur le détriment observé à HN,

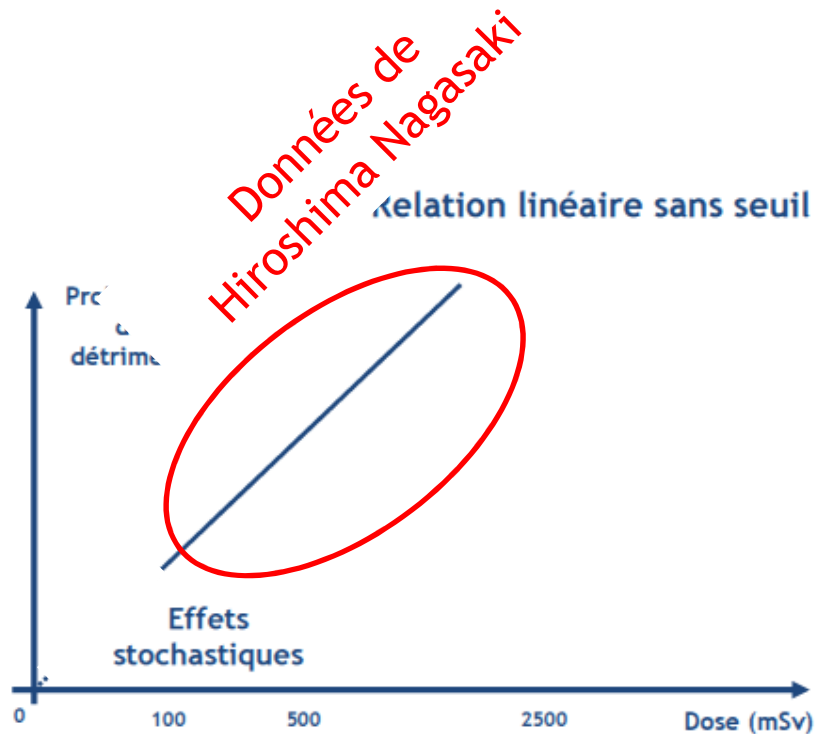


$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

3.1. Les hypothèses

3.1.1. La relation linéaire sans seuil (LSS)

Elle repose sur le détriment observé à HN, extrapolé dans le domaine des faibles doses

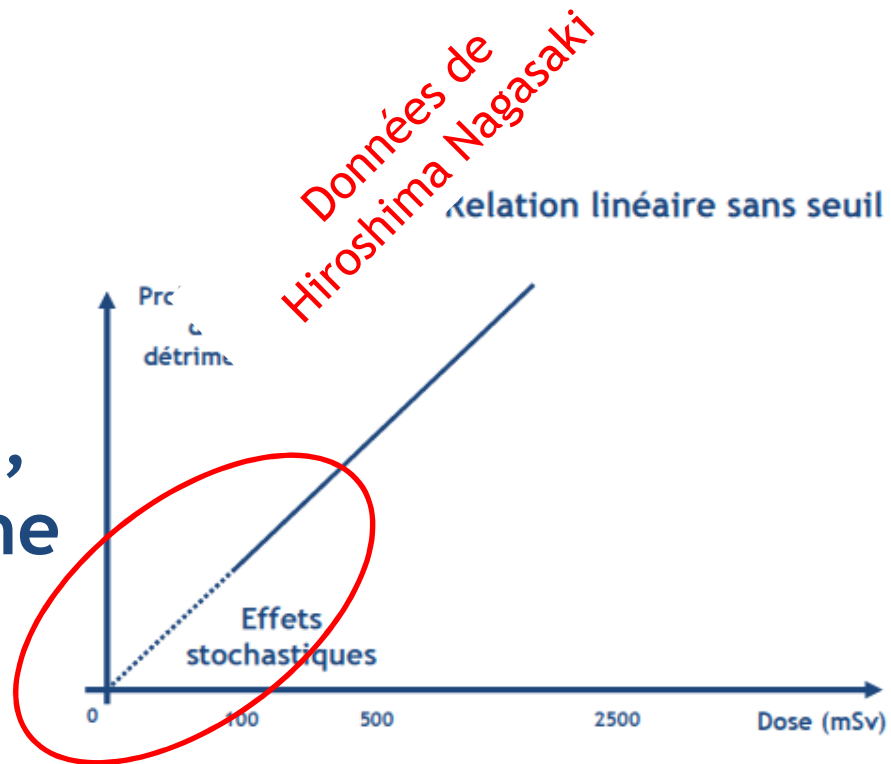


$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

3.1. Les hypothèses

3.1.1. La relation linéaire sans seuil (LSS)

Elle repose sur le détriment observé à HN, extrapolé dans le domaine des faibles doses



$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

3.1. Les hypothèses

3.1.1. *La relation linéaire sans seuil (LNT)*

A faibles doses, la dose efficace est corrélée de façon linéaire avec la probabilité de détérioration

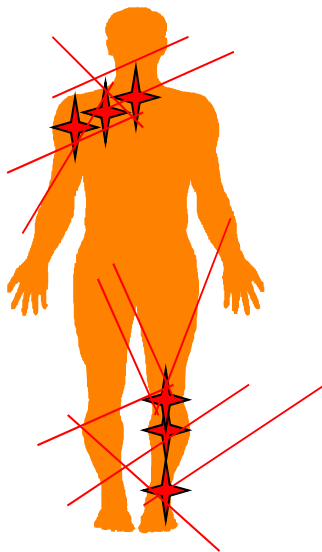
Détérioration = $f(\text{dose})$

Dose efficace et LNT sont donc indissociables

3.1. Les hypothèses

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$

3.1.2. L'additivité des doses



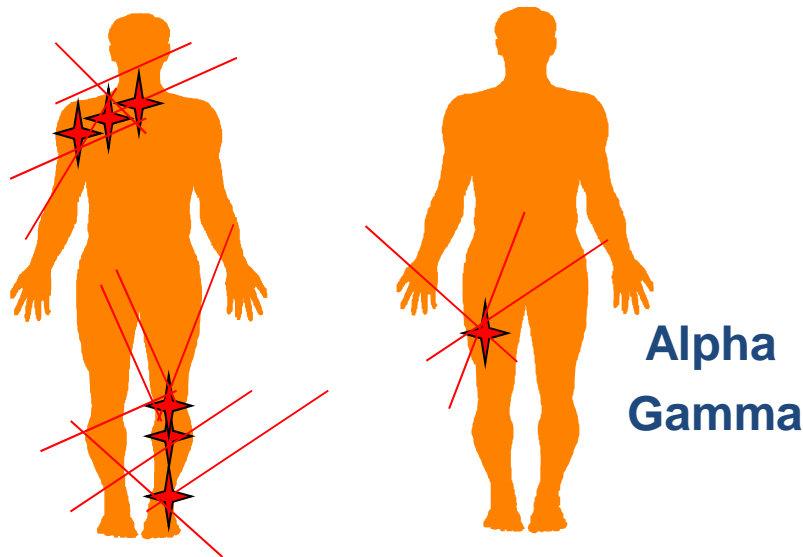
A faibles doses, la dose efficace d'une personne exposée est donnée par la somme pondérée des doses équivalentes des organes isolés

3.1. Les hypothèses

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$

3.1.2. L'additivité des doses

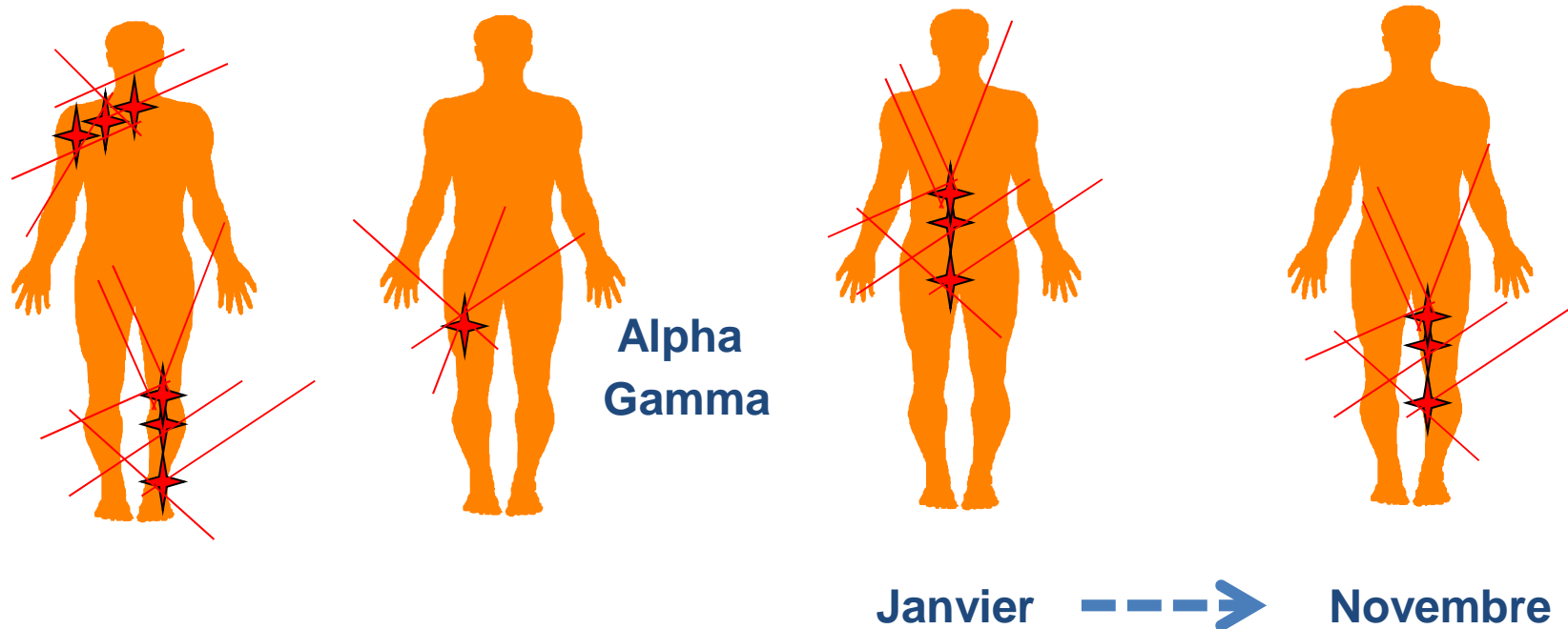
A faibles doses la dose équivalente aux organes est donnée par la somme pondérée des énergies moyennes déposées



3.1. Les hypothèses

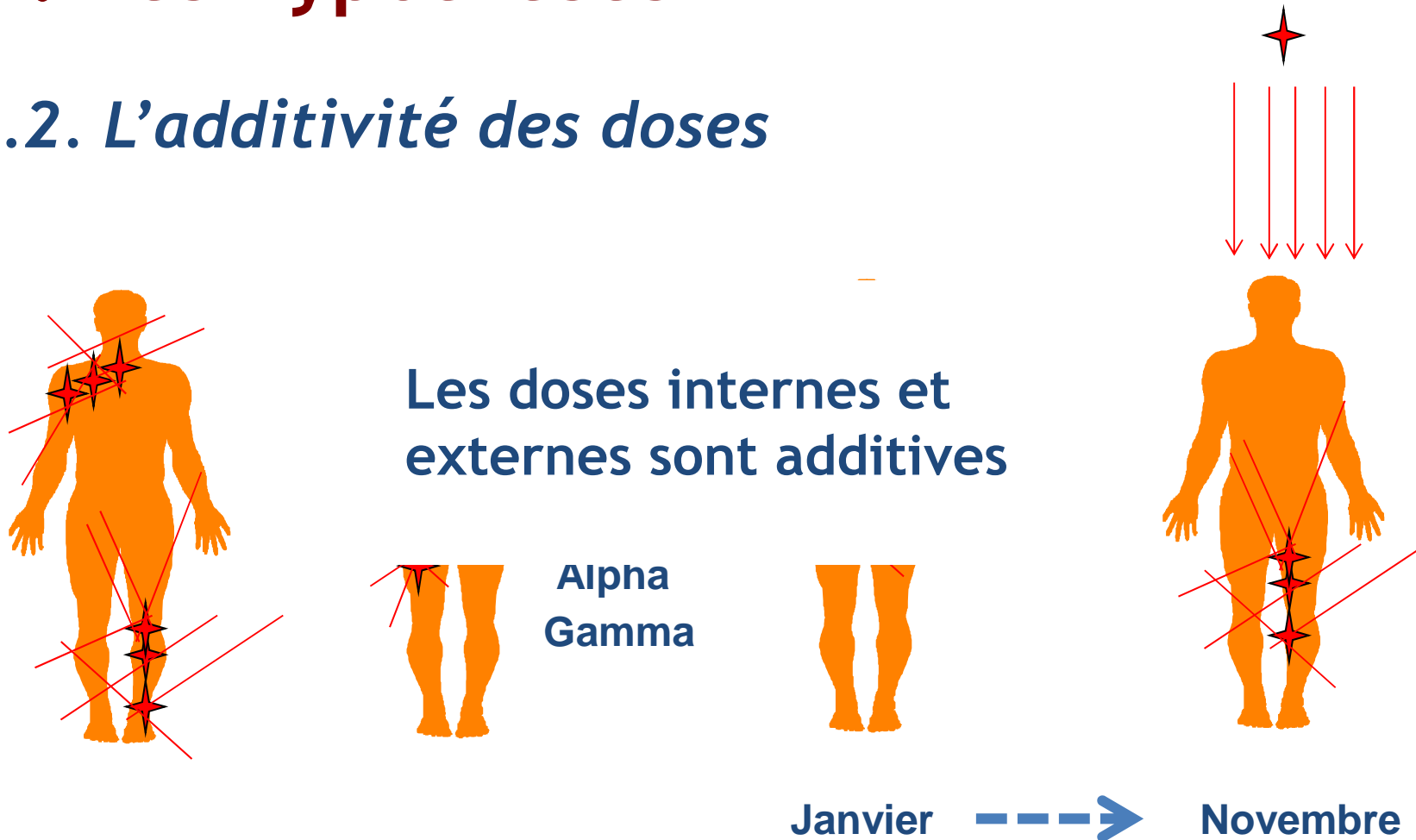
Les doses espacées dans le temps sont additives

3.1.2. L'additivité des doses



3.1. Les hypothèses

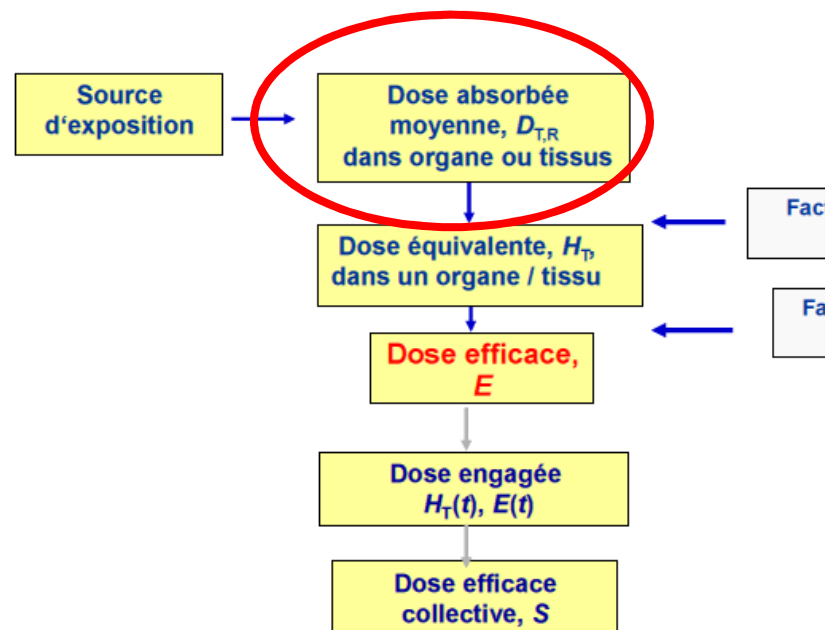
3.1.2. L'additivité des doses



3.2. Les approximations

- La dose absorbée est moyennée sur l'ensemble de l'organe (sauf cas particuliers)

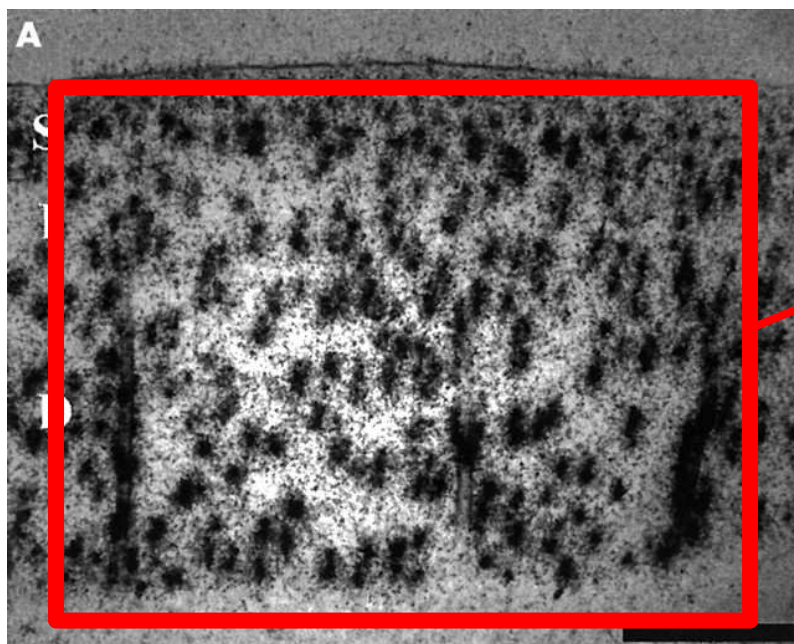
$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$



$$D = d\bar{\varepsilon} / dm$$

Il est estimé que la dose moyenne à l'organe* D_T était un bon indicateur, corrélé avec le risque stochastique au niveau de l'organe (tissu) considéré.

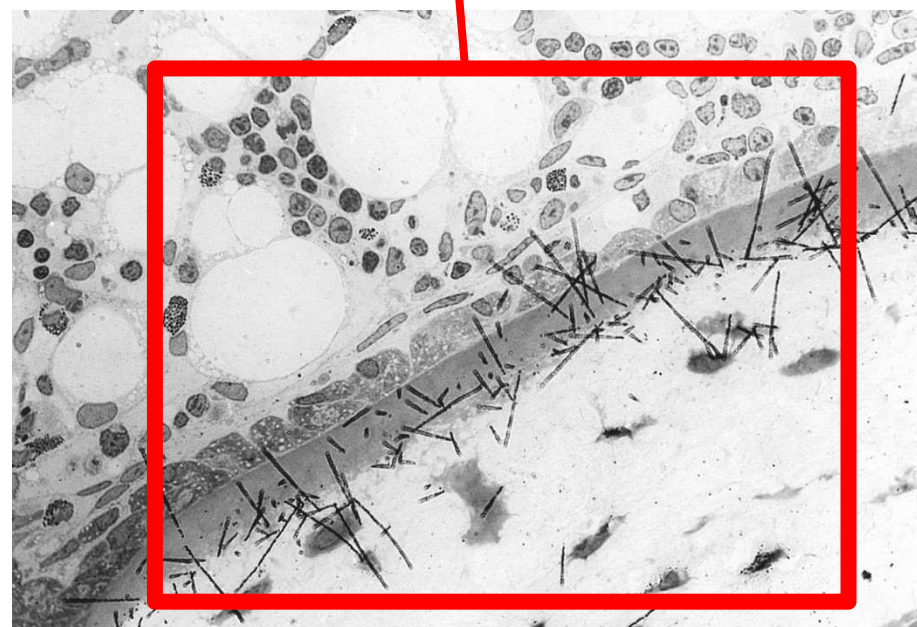
**Des exceptions sont consenties pour le tractus respiratoire, le tractus alimentaire, les surfaces osseuses et la peau où la dose est calculée par rapport à une région précise ou par rapport à des cellules cibles*



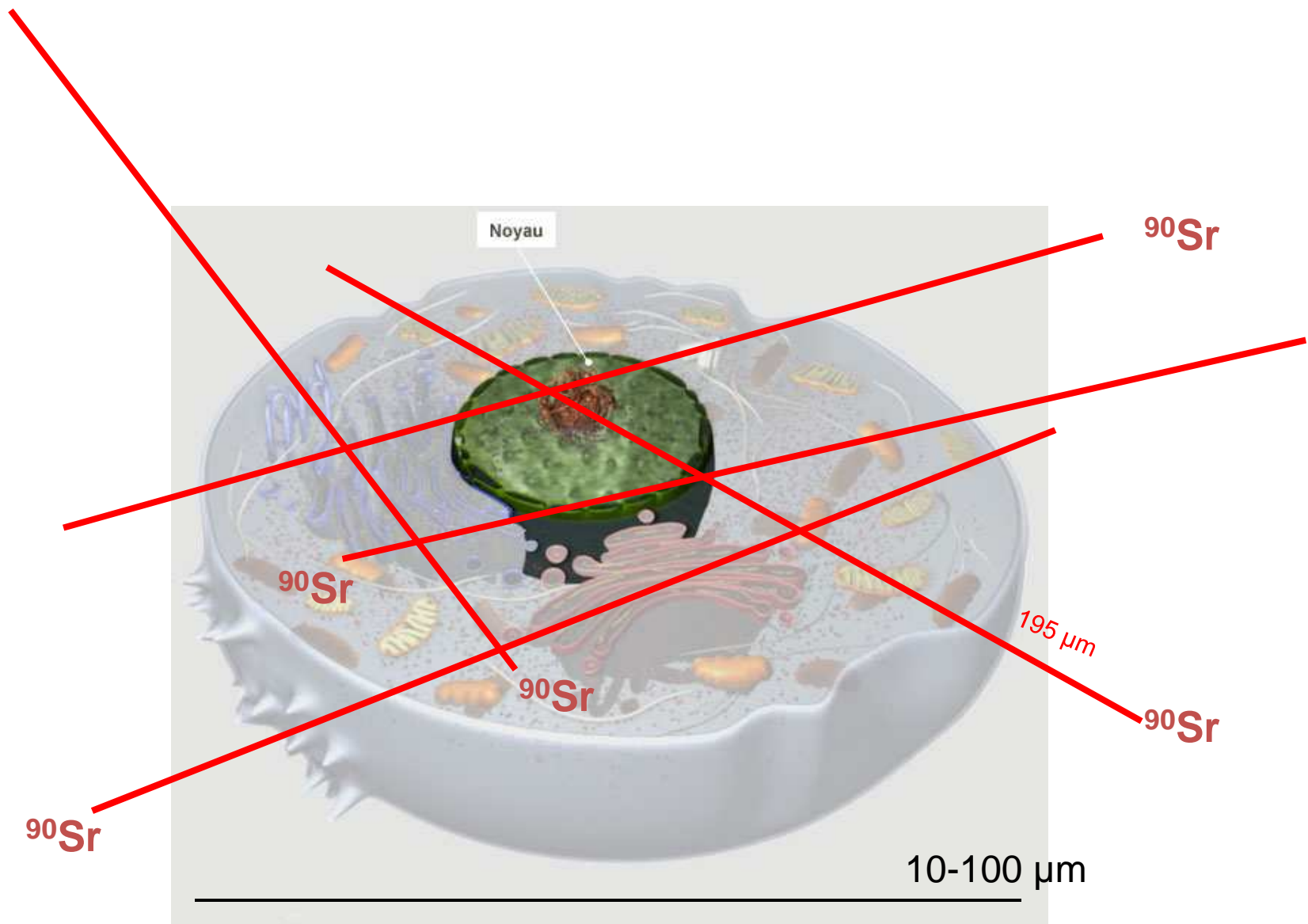
³⁵S dans un cartilage de lapin

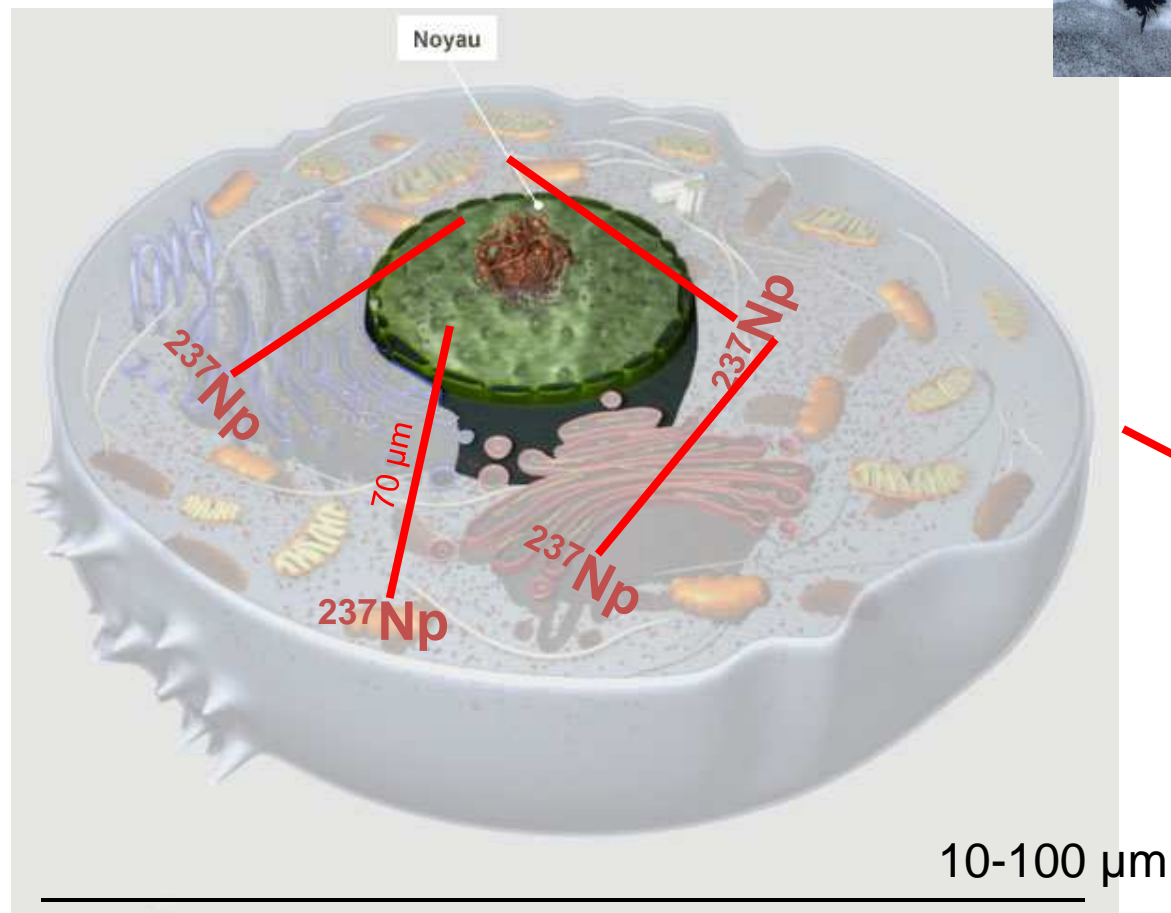
Moyenne des dépôts

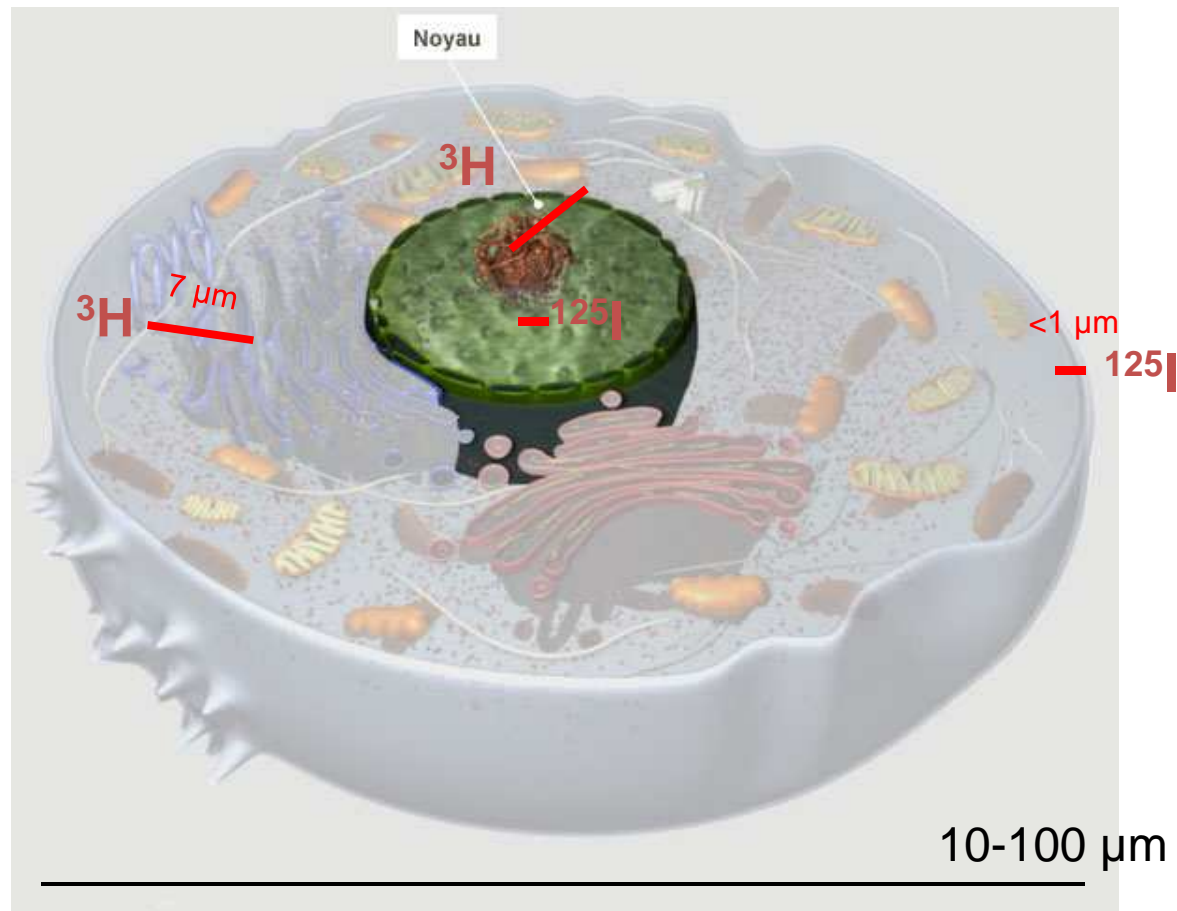
Pu dans surface osseuse de rat

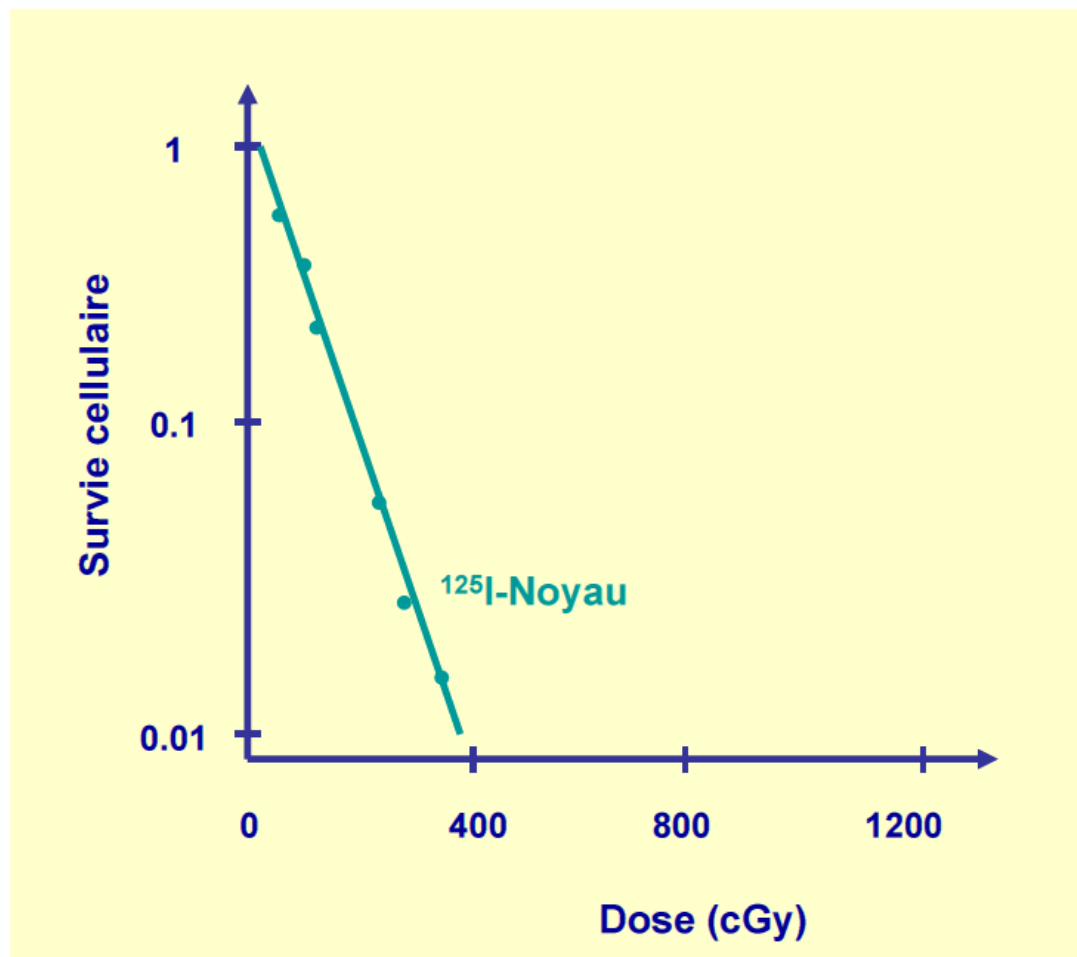


Dans le cas des contaminations internes avec des émetteurs de très faible énergie (Auger, X mous ou beta mous) ayant un tropisme particulier, le dépôt d'énergie n'est plus du tout corrélé avec le détriment

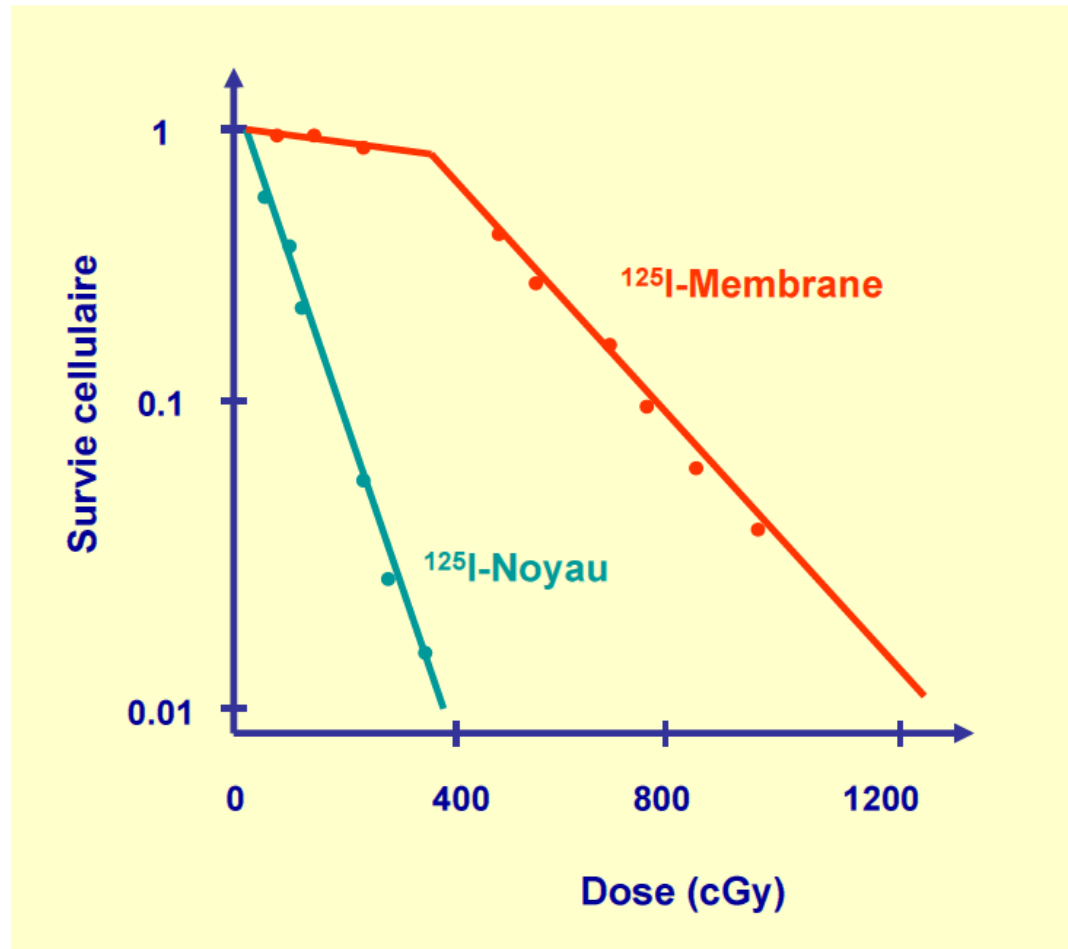




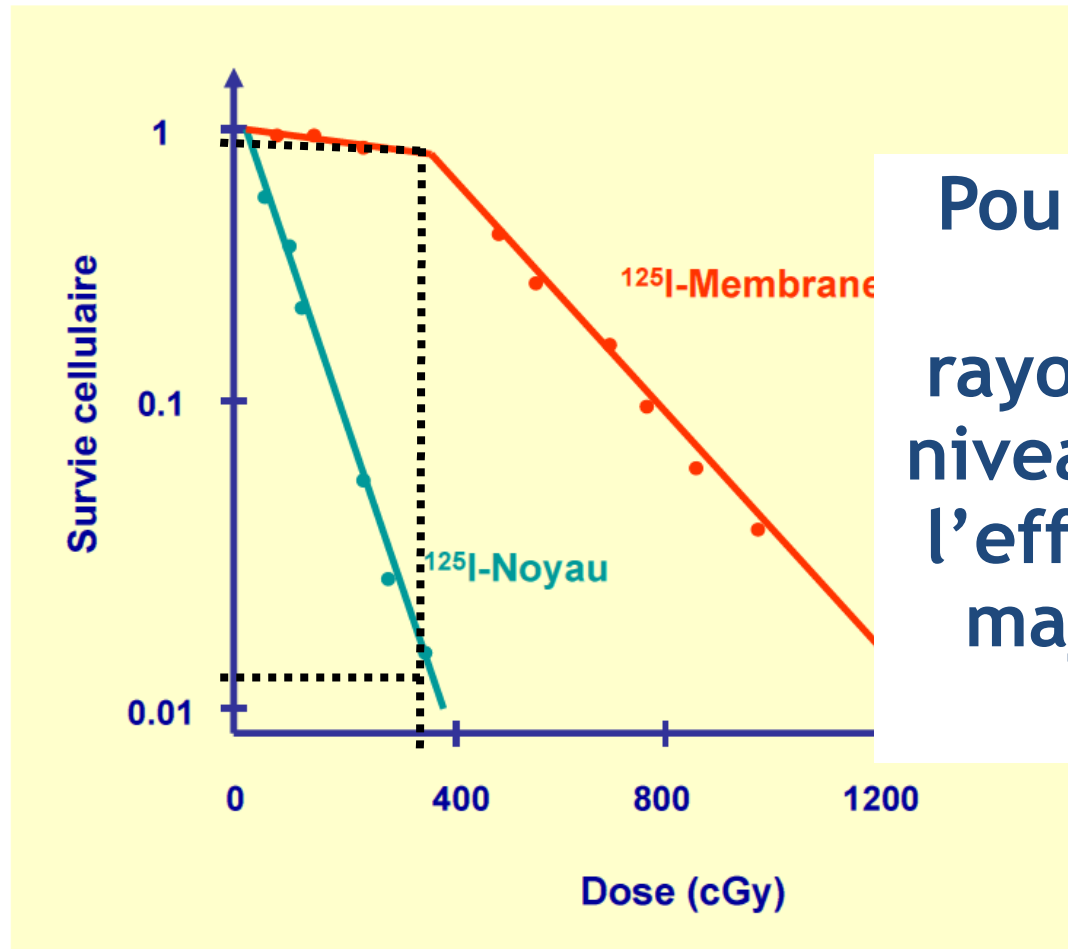




Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de ^{125}I
(redessiné d'après les données de Sastry, 1992)



Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de ^{125}I
(redessiné d'après les données de Sastry, 1992)



Pour une même dose de rayonnement au niveau cellulaire, l'effet peut être majeur ou nul

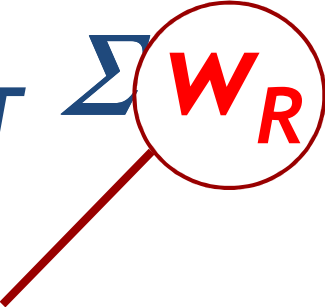
Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de ¹²⁵I
 (redessiné d'après les données de Sastry, 1992)

La CIPR recommande de NE PAS utiliser la dose efficace dans le cas d'émetteurs AUGER

De la même façon les irradiations externes très hétérogènes (accident, médical) ne devraient pas être gérées par la dose efficace

3.2. Les approximations (suite)

- La dose absorbée est moyennée sur l'ensemble de l'organe (sauf cas particuliers)
- Les effets différentiels des différents types de rayonnements (hors neutrons) sont exprimés par seulement 3 valeurs

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$


Tient compte de la toxicité relative
des différents rayonnements (par rapport
au risque de détriment)

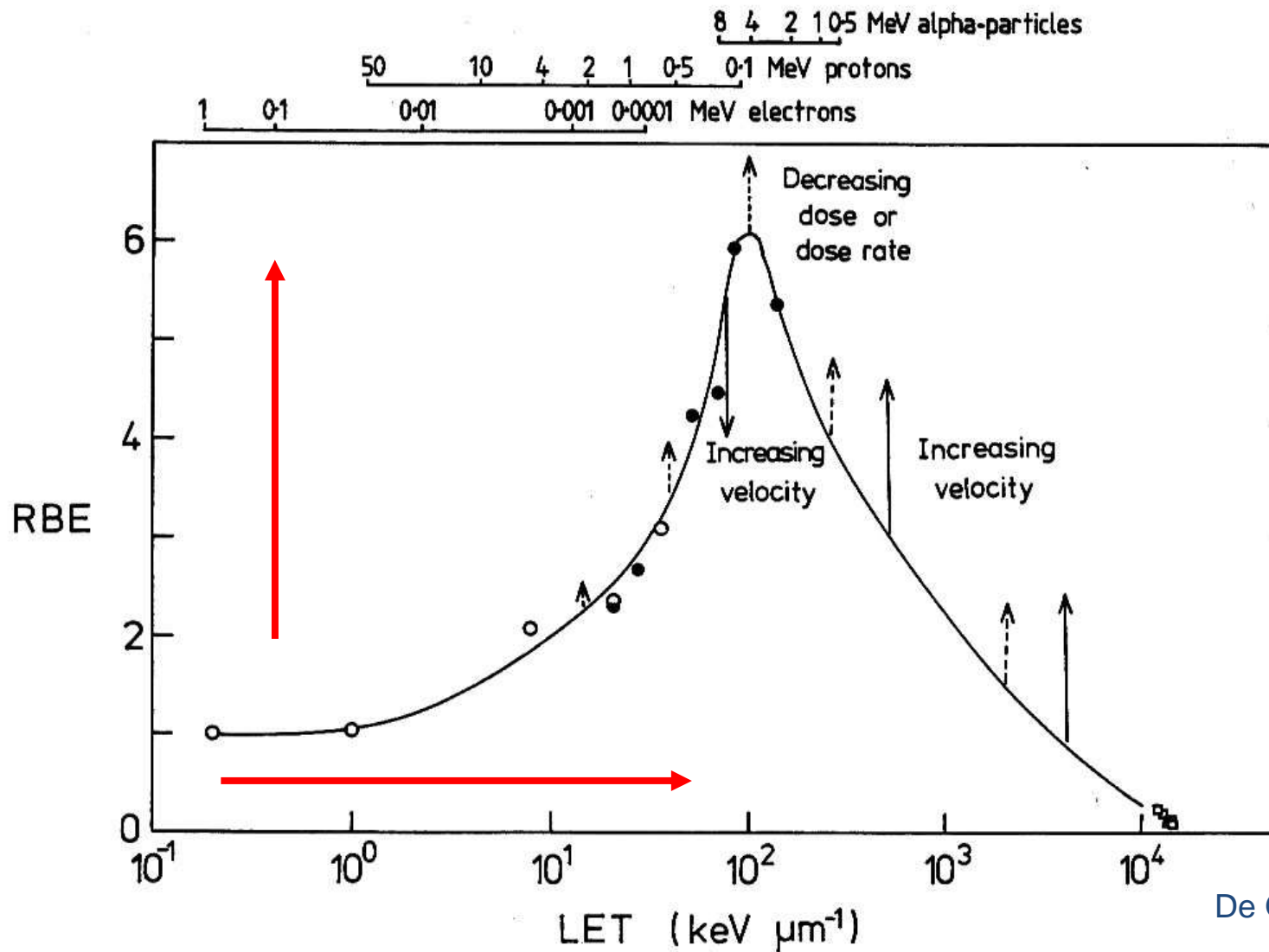
W_R

Photons : 1
Electrons, Muons : 1
Protons : 2
Alpha : 20
Neutrons : Δ

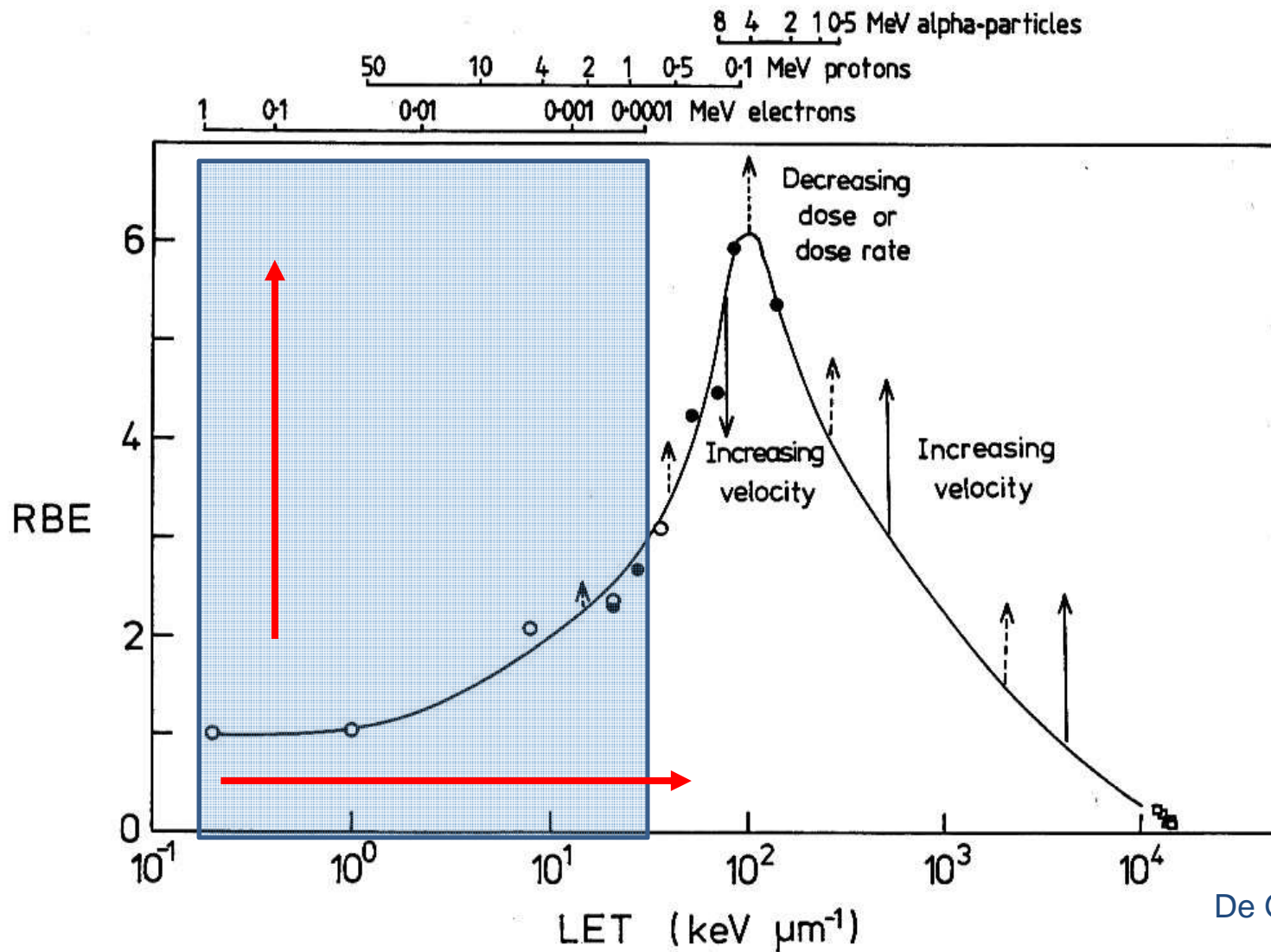
Les facteurs de pondération pour les rayonnements sont dérivés des EBR des différents types de rayonnement

Efficacité Biologique Relative (EBR) : définie comme étant le rapport de la dose d'un rayonnement de référence (rayons X, rayonnement gamma) à la dose du rayonnement étudié produisant un même effet biologique

Les EBR varient en fonction du TEL des rayonnements



Efficacité biologique relative pour l'inactivation cellulaire par les RI



De Goodhead, 1994

Efficacité biologique relative pour l'inactivation cellulaire par les RI

Les EBR varient en fonction du TEL des rayonnements

Elles dépendent de l'effet recherché, des conditions expérimentales (SPS, dose, débit de dose,..)

La transposition des EBR, grandeurs scientifiques variables en W_R discrètes est voulue pour des raisons de simplification

Ces grandeurs reflètent donc un jugement d'expert et ne peuvent servir qu'à des fins de gestion

3.2. Les approximations (suite)

- La dose absorbée est moyennée sur l'ensemble de l'organe (sauf cas particuliers)
- Les effets différentiels des différents types de rayonnements (hors neutrons) sont exprimés par seulement 3 valeurs
- **La sensibilité différentielles des tissus pour les effets stochastiques est résumée par 4 groupes de valeurs, moyennées selon les sexes, les ages et généralisées sur toutes les populations**

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$

Tissue or organ	ICRP 26	ICRP 60	ICRP 103
Gonads	0,25	0,20	0,08
Red bone marrow	0,12	0,12	0,12
Colon	-	0,12	0,12
Lung	0,12	0,12	0,12
Stomah	-	0,12	0,12
Bladder	-	0,05	0,04
Breast	0,15	0,05	0,12
Liver	-	0,05	0,04
Oesophagus	-	0,05	0,04
Thyroid	0,03	0,05	0,04
Skin	-	0,01	0,01
Bone surfaces	0,03	0,01	0,01
Remainder tissues	0,3	0,05	0,12
Brain			0,01
Salivary glands			0,01

Les facteurs de pondération tissulaire w_T

Regroupés en quatre groupes

<i>ICRP 103</i>	0.01	surfaces osseuses, peau, cerveau, glandes salivaires
	0.04	vessie, foie, oesophage, thyroïde
	0.08	gonades
	0.12	moelle osseuse, colon, poumon, estomac, sein, reste

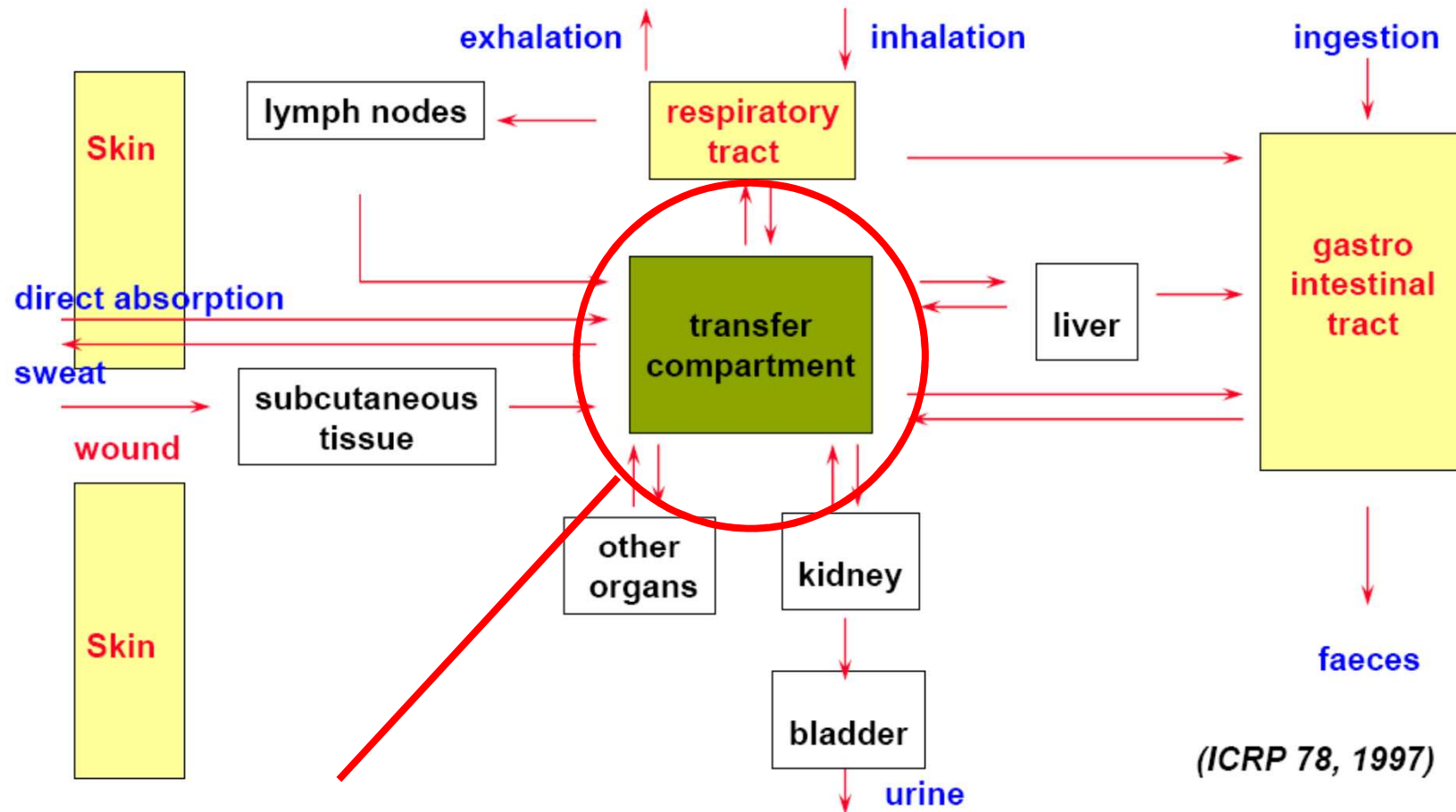


***Représentent des valeurs de gestion
et non des valeurs scientifiques***

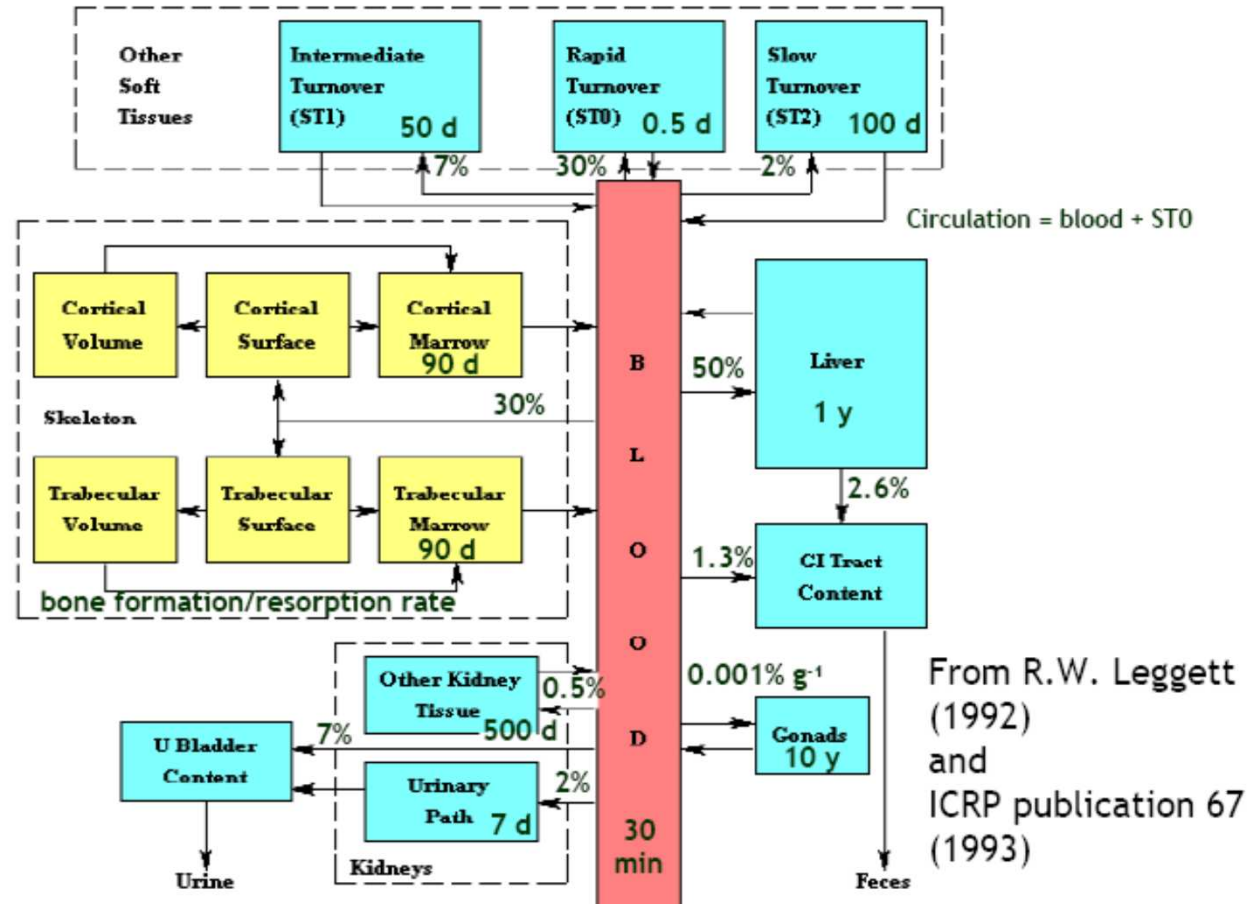
3.3. Les simplifications

- Le comportement des RN est décrit par des modèles génériques

Modèle biocinétique générique



Structure of the human Am biokinetic model



Ces modèles peuvent être complexes mais n'en sont pas moins obligatoirement réducteurs

3.3. Les simplifications (suite)

- Le comportement des RN est décrit par des modèles génériques
- Les doses sont calculées pour des hommes et femmes de référence, en utilisant des fantômes de référence

(représentant des travailleurs ou des personnes du public âgés de 3 mois, 1, 5, 10, 15 ans ou adulte)

2000s

Les fantômes numériques

female
163 cm, 60 Kg
3.9 million voxels
voxel size: 15.2 mm³
slice thickness: 4.84 mm
In-plane resolution:
1.775 mm

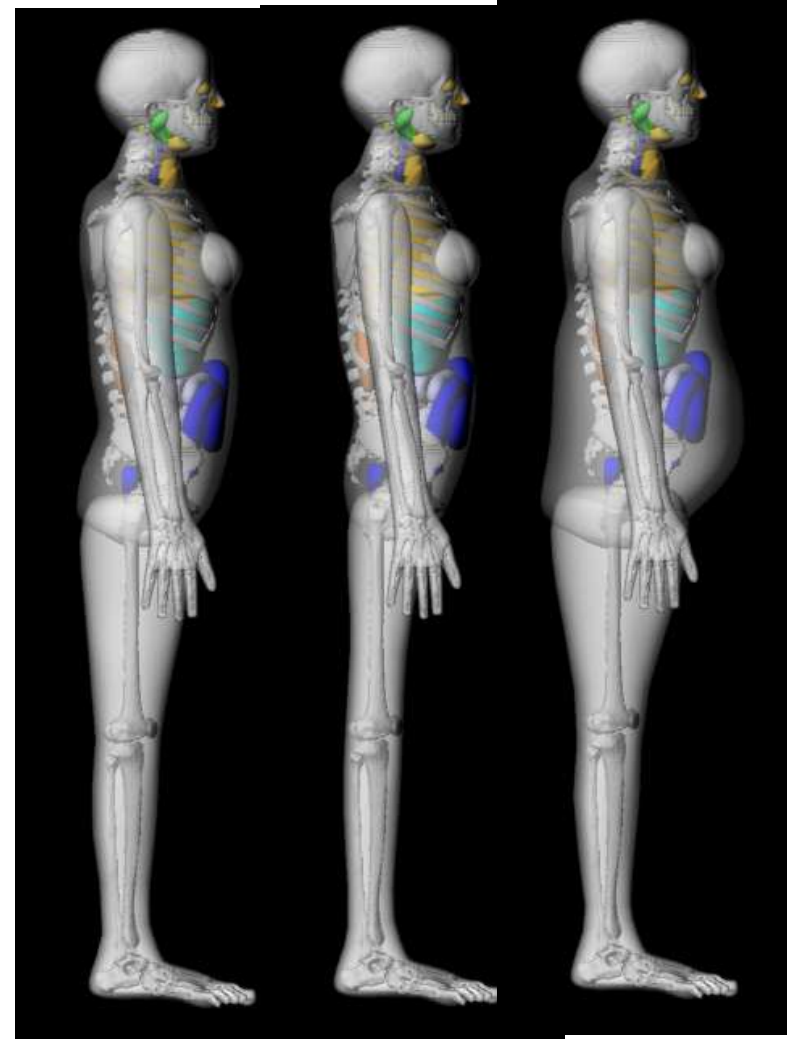
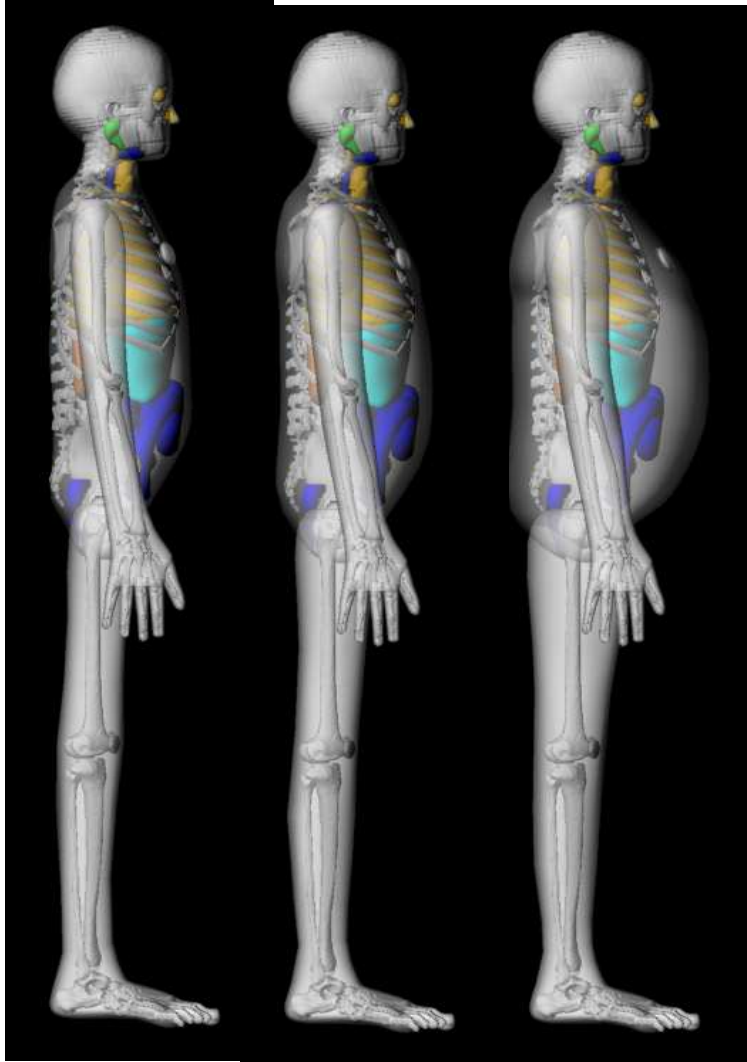
male
176 cm, 73 Kg
1.9 million voxels
voxel size: 36.5 mm³
Slice thickness: 8 mm
In-plane resolution:
2.137 mm

D'après M. Zankl



2000s

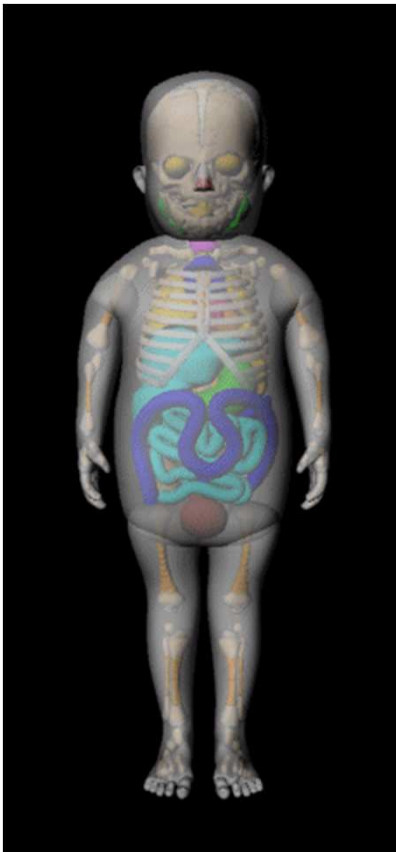
Les fantômes numériques



D'après Bolch

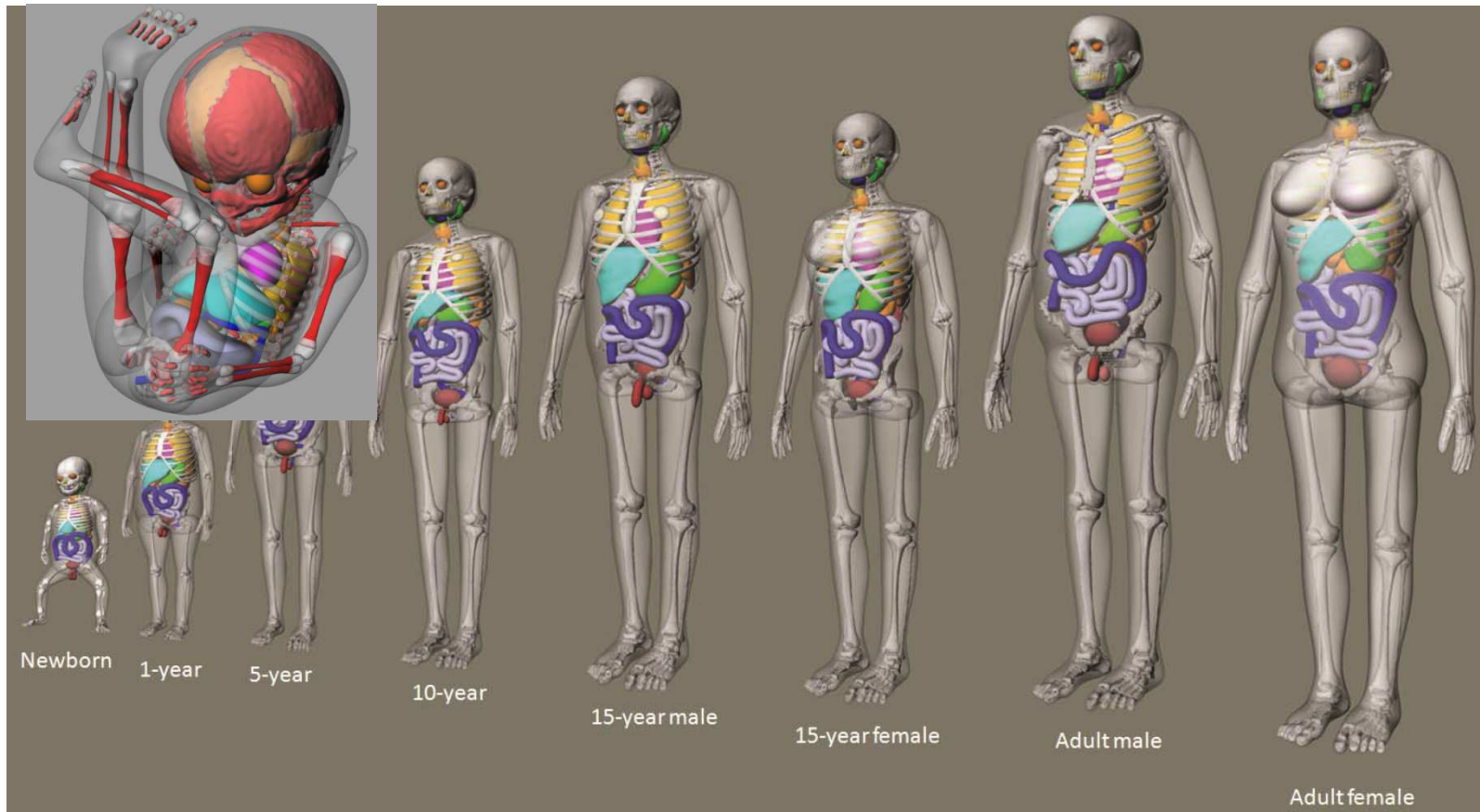
2000s

Les fantômes numériques



Fantômes pédiatriques pour enfants âgés de 3 mois, 1,5, 10, 15 ans

2000s Les fantômes numériques

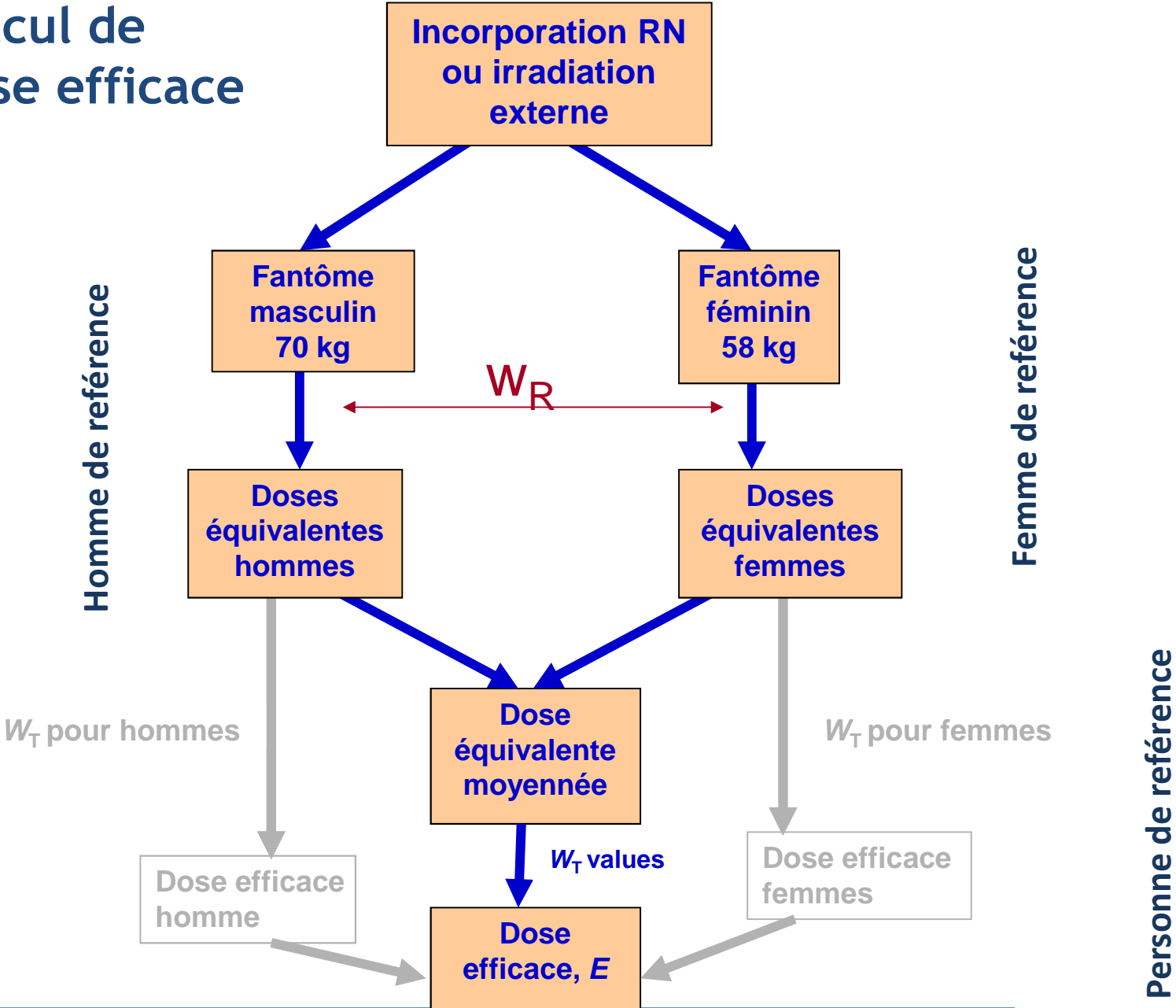




3.3. Les simplifications (suite)

- Le comportement des RN est décrit par des modèles génériques
- Les doses équivalentes sont calculées pour des hommes et femmes de référence, en utilisant des fantômes de référence
- **La dose efficace est le résultat d'une moyenne entre les hommes et les femmes**

le calcul de la dose efficace



En conséquence,

La dose calculée n'est donc pas la dose de l'individu suivi mais celle qu'aurait reçue un individu de référence exposé dans les mêmes conditions que l'individu en question

3.3. Les simplifications (suite)

Les coefficients de dose produits pour les expositions externes et contaminations internes sont calculés pour des conditions standard (ex . les doses résultant de blessure ne sont pas incluses)

$$E \cong H_p(10) + E(50)$$

$$E(50) = \sum_j e_{j,\text{inh}}(50) \cdot I_{j,\text{inh}} + \sum_j e_{j,\text{ing}}(50) \cdot I_{j,\text{ing}}$$

3. Les fondements et limites de la dose efficace

- Conclusions-

- La dose efficace ne concerne que les effets stochastiques
- Sa construction repose sur la LNT (et donc sur l'extrapolation des effets fortes doses vers faibles doses)
- Elle n'est "valide" que en dessous de 100 mSv
- Elle renvoie à une probabilité de détriment (et non d'effet)

3. Les fondements et limites de la dose efficace

- Conclusions-

- Elle indique la dose d'une personne de référence, exposée dans les mêmes conditions que l'individu surveillé
- Elle n'est, par définition, pas sujette aux incertitudes
- Elle est construite uniquement pour des applications dans le domaine de la radioprotection (optimisation, limitation)
- Elle a été conçue exclusivement pour les travailleurs et les membres du public (hors domaine médical)

En conséquence....

La dose efficace ne peut pas :

- être utilisée pour l'estimation d'un risque individuel (utiliser des valeurs individuelles: sexe, masse, physiologie, sensibilité, antécédents)
- être utilisée lorsque les doses reçues risquent de provoquer des réactions tissulaires
- être utilisée pour l'évaluation des doses en épidémiologie

Dans ces derniers cas, utiliser la dose absorbée aux organes, pondérée par les EBR adéquats

En conséquence....

La dose efficace ne peut pas :

- être utilisée dans le cas d'irradiation très hétérogène (irradiation médicale externe ou médecine nucléaire, accident, contamination Auger,..)
- être utilisée en cas de contamination par blessure
- être utilisée en cas de traitement médical (ex. décorporation)

4. Les applications de la dose efficace

Dans le domaine industriel

Justification

Optimisation

Limitation

Exemples d'applications dans le domaine industriel

1. Optimisation

Calcul prospectif de dose, individuel ou collectif afin de

- limiter les temps d'exposition
- définir les protections individuelles et collectives (écrans, masque,..)
- comparer avec les contraintes de doses ou niveaux de référence
- définir des situations d'exemption ou de renforcement des actions
-

Exemples d'applications dans le domaine industriel

2. Limitation

- Calcul rétrospectif de dose individuel afin de
- démontrer le respect des limites de doses
 - enregistrer la dose (SISERI en France)

4. Les applications de la dose efficace

Dans le domaine
industriel

Justification

Optimisation

Limitation

Dans le domaine
médical

**La dose efficace n'a pas été conçue
initialement pour la protection des patients**

**car les cohortes de patients diffèrent
-en terme de sensibilité-
entre elles mais également des travailleurs ou
des membres du public**

**Néanmoins, sa facilité d'utilisation la rendue
très attractive**

**Elle est de fait très utilisée dans la protection
des patients, à la fois pour la justification
des actes et, dans une moindre mesure pour
leur optimisation**

Exemples d'applications dans le domaine médical

1. Justification

Aide à la décision pour l'utilisation d'une technique

Exemples d'applications dans le domaine médical

2. Optimisation

- Comparaison à des niveaux diagnostiques de référence
- Comparaison de procédures entre hôpitaux
 - N'a de sens que si les patients sont similaires en termes d'âge et de sexe*
- Aide au choix des paramètres d'une technique particulière

Les applications dérivées

- En situation accidentelle, estimation rapide du risque d'un individu, avant évaluation plus précise du risque
- En situation d'urgence, estimation prospective des doses pour planification ou restrospective pour traitement éventuel

La dose efficace est donc conçue pour des actions de gestion des expositions

Or il y a un réel besoin d'une grandeur alternative pour l'estimation des risques, incluant des données sur le risque radiologique selon le sexe et les classes d'âge

5. Les développements

Plusieurs types de travaux sont en cours, allant d'une simple modification de la dose efficace existante à la définition d'une nouvelle grandeur dédiée à l'estimation du risque

5. Les développements

1. Pour les diagnostics avec rayons X

**Dose absorbée aux organes x coeff de risque
âge et sexe dépendant**

(dérivés des données de UNSCEAR 2006, BEIR 2006, ICRP 2007)

5. Les développements

2. Pour les autres applications

(ex. comparaison des impacts des sources médicales et naturelles)

introduction d'un nouveau concept

Dose collective I, pondérée par détriment

$$I = \sum_{a,s} N^{a,s} \sum G_T^{a,s} H_T^{a,s}$$

avec

$N^{a,s}$ nb d'individus dans le groupe d'âge et de sexe fixé

$G_T^{a,s}$ détriment pour groupe et tissus considéré, divisé par risque nominal pour toute la population, du même détriment

$H_T^{a,s}$ dose équivalente pour groupe et tissus considéré

5. Les développements

Les réserves sur ces calculs

- Il faut que la LNT soit vraie !!!!
(pour une simple optimisation des expositions cela n'a pas grande importance..)
- Ces grandeurs ne tiennent pas compte des différences de sensibilité entre individus (indispensable pour calculer le risque)
- Il faut pouvoir calculer les incertitudes

Conclusions générales

- La dose efficace est une grandeur liée au risque mais n'a pas été conçue pour estimer un risque
- Elle doit servir essentiellement à la gestion des expositions et à l'application des principes fondamentaux de radioprotection (optimisation, limitation)
- Son utilisation depuis des décennies à démontré son efficacité

Conclusions générales (suite)

- Son utilisation, plus ou moins pertinente, pour d'autres applications reste pour autant une réalité en raison des besoins en évaluation des risques
- Le développement d'une grandeur complémentaire, voire de nouveaux concepts, reste donc nécessaire

Fin

francois.paquet@irsn.fr