

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# La dose efficace

-----

## Utilisation et limites dans les domaines industriel et médical

*F. Paquet*  
*IRSN, CIPR*

# Pourquoi débattre (encore) de la dose efficace ?

- Grandeur réglementaire
- Grandeur originale issue d'un concept ambitieux
- Grandeur pratique et largement utilisée
- Grandeur critiquée

The British Journal of Radiology, 81 (2008), 521–523

COMMENTARY

# Effective dose: a flawed concept that could and should be replaced

**D J BRENNER**, PhD, DSc

Center for Radiological Research,  
Columbia University Medical Center, New York

# COMMENTARY

## Effective dose: a flawed concept

*The British Journal of Radiology*, 82 (2009), 348–351

### Correspondence

(The Editors do not hold themselves responsible for opinions expressed by correspondents)

**Effective dose: a flawed concept that could and should be replaced. Comments on a paper by D J Brenner (*Br J Radiol* 2008;81:521–3)**

Some of the specific criticisms of effective dose made by Brenner concern (i) the ICRP choice of tissue-weighting factors ( $w_T$  values), (ii) the lack of age-dependence in  $w_T$  values, (iii) the inclusion of hereditary effects with cancer in the choice of  $w_T$  values, and (iv) confusion between absorbed, equivalent and effective dose.

The Editor, Sir

T  
q  
w  
u



## Effective dose: a radiation protection quantity

H-G. Menzel<sup>a</sup>, J. Harrison<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *European Organization for Nuclear Research, CERN, CH-1211, Geneva 23, Switzerland; e-mail: hans.menzel@cern.ch*

<sup>b</sup> *International Commission on Radiological Protection and Health Protection Agency, UK*

# Pourquoi débattre (encore) de la dose efficace ?

- Grandeur réglementaire
- Grandeur originale issue d'un concept ambitieux
- Grandeur pratique et largement utilisée
- Grandeur critiquée
- **Grandeur (très) souvent utilisée de façon abusive**

# Pourquoi débattre (encore) de la dose efficace ?

- Grandeur réglementaire
  - **Grandeur originale issue d'un concept ambitieux**
  - **Grandeur pratique et largement utilisée**
  - Grandeur critiquée
  - **Grandeur (très) souvent utilisée de façon abusive**
- 

# 1. Les origines de la dose efficace

## Les débuts de la radioprotection

Un fil conducteur :

Limiter les expositions afin  
de prévenir les effets radio-induits

Concept d'organe critique  
Concept de dose admissible (~ dose limite)

Public Vs  
Travailleurs

*Deux doses absorbées*  
- E/m en Rads (ICRU, 1953)  
- Dose (Rem) = Dose (Rad) x EBR

Limites de dose

1928

1934

1937

1950

1955

1959

1962

Dose vie  
Limites spécifiques  
selon organes

Energie absorbée équivalente, couplée avec EBR  
Organes hématopoïétiques les plus sensibles

# Dès la fin des années 50, les concepts nécessaires à la construction de la dose efficace étaient déjà réunis

- Relation linéaire entre dose et leucémie/cancers osseux
- Effets différentiels selon type de rayonnement
- Sensibilités différentielles des tissus
- Notion « d'accumulation temporelle » de la dose ( → additivité)
- Notion d'acceptabilité des risques
  
- Homme de référence
- Sensibilité selon âge

# 1. Les origines de la dose efficace

## *Deux doses absorbées*

- *Dose absorbée en Rads*
- *Dose absorbée en Rems*

Souhait de disposer d'une grandeur unique,  
intégrant l'ensemble des détriments

Justification  
Optimisation  
Limitation

**Dose efficace (E)**  
Facteurs de pondération  $w_R$   
Nouveaux  $w_T$  avec plus de tissus

1977

1991

2007

Dose absorbée en Gy  
Dose équivalente ( $H=DQN$ ) en Sv  
Dose équivalente collective  
Dose équivalente engagée  
**Dose équivalente efficace ( $H \times w_T$ )**  
Limite 50 mSv

Nouveaux facteurs  $w_R$  et  $w_T$   
Fantômes de référence  
Clarifications sur E

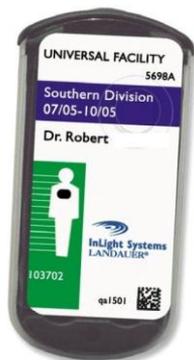
# 2. La dose efficace aujourd'hui

## Pour la plupart d'entre nous

### Une obligation



### Des méthodes



### Des règles



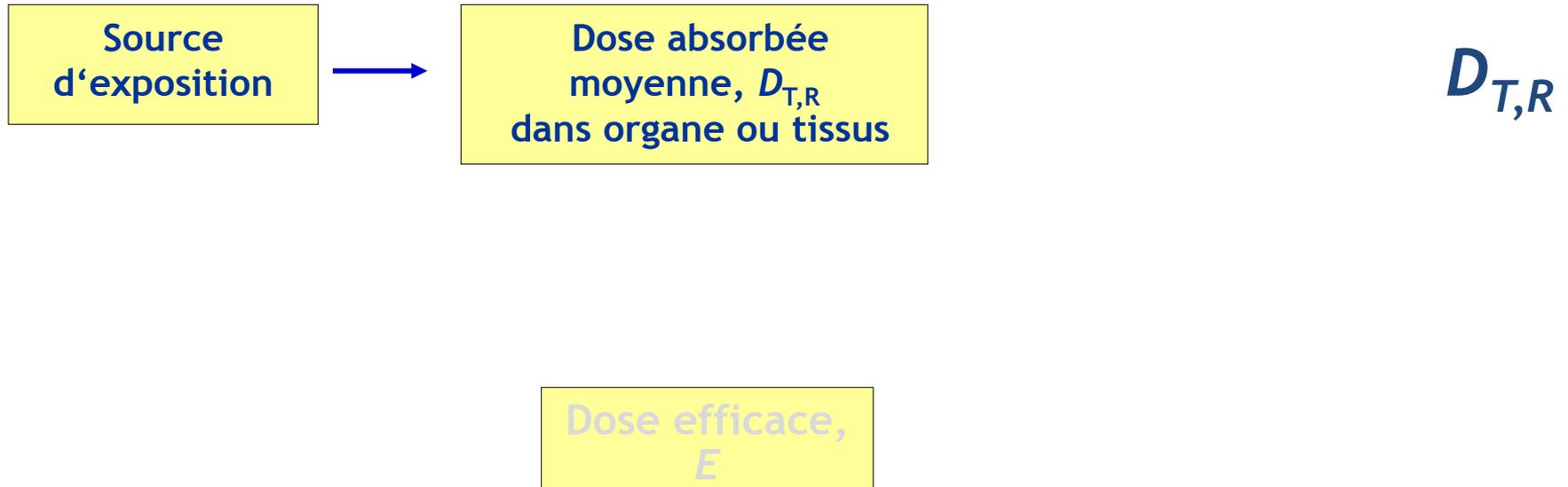
# 2. La dose efficace aujourd'hui

## Pour la CIPR

Dose efficace,  
*E*

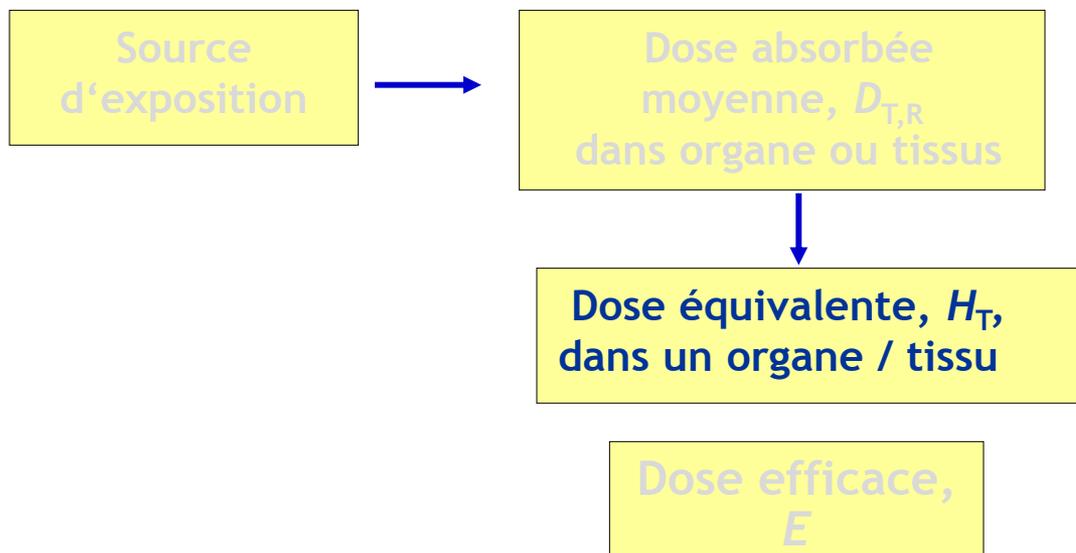
## 2. La dose efficace aujourd'hui

### Pour la CIPR



# 2. La dose efficace aujourd'hui

## Pour la CIPR



$$D_{T,R}$$

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

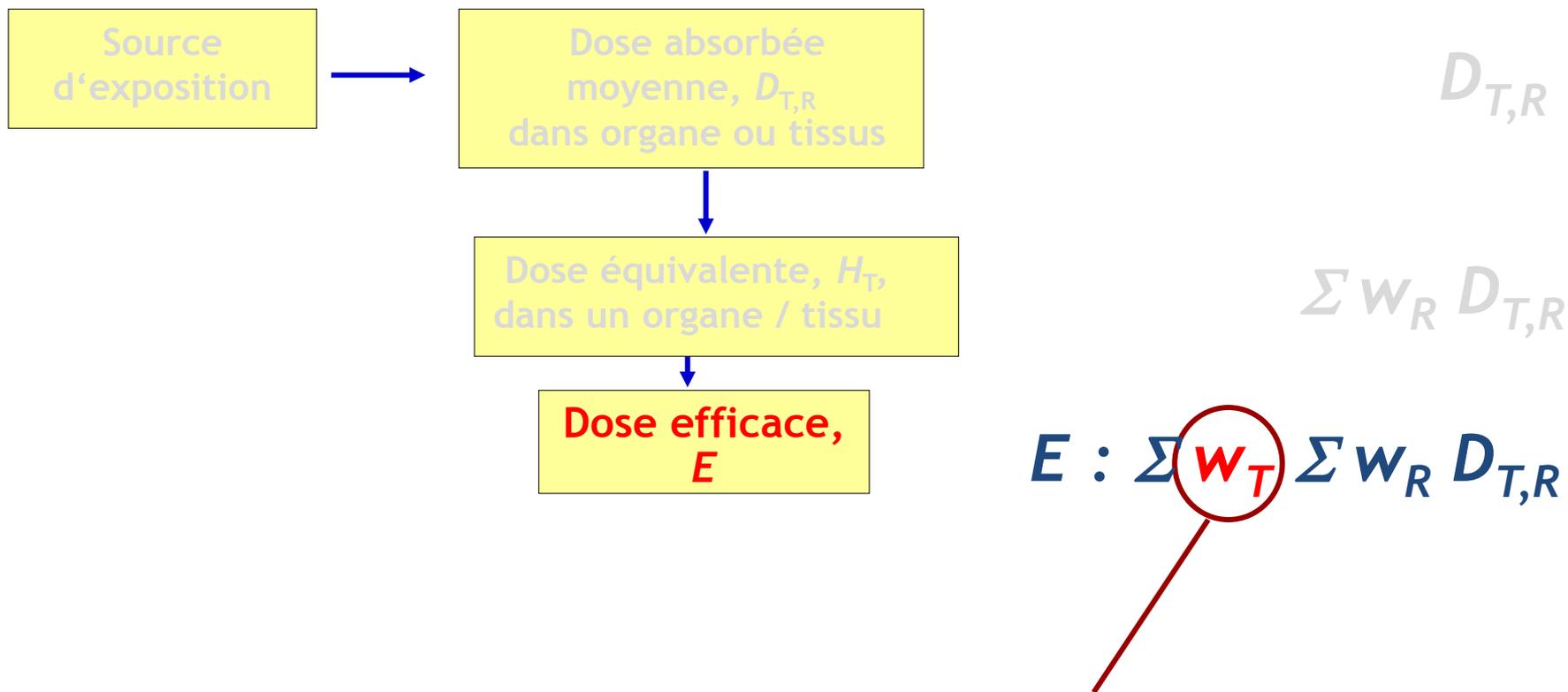
Tient compte de la toxicité relative des différents rayonnements

$W_R$

- Photons : 1
- Electrons, Muons : 1
- Protons : 2
- Alpha : 20
- Neutrons :  $\Delta$

## 2. La dose efficace aujourd'hui

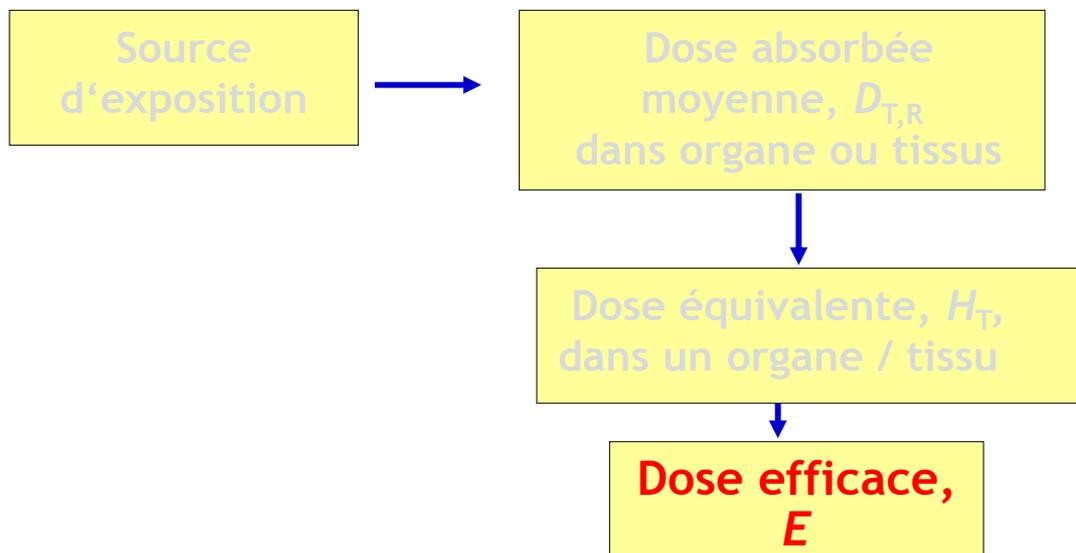
### Pour la CIPR



Tient compte de la sensibilité relative des différents tissus

# 2. La dose efficace aujourd'hui

## Pour la CIPR



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

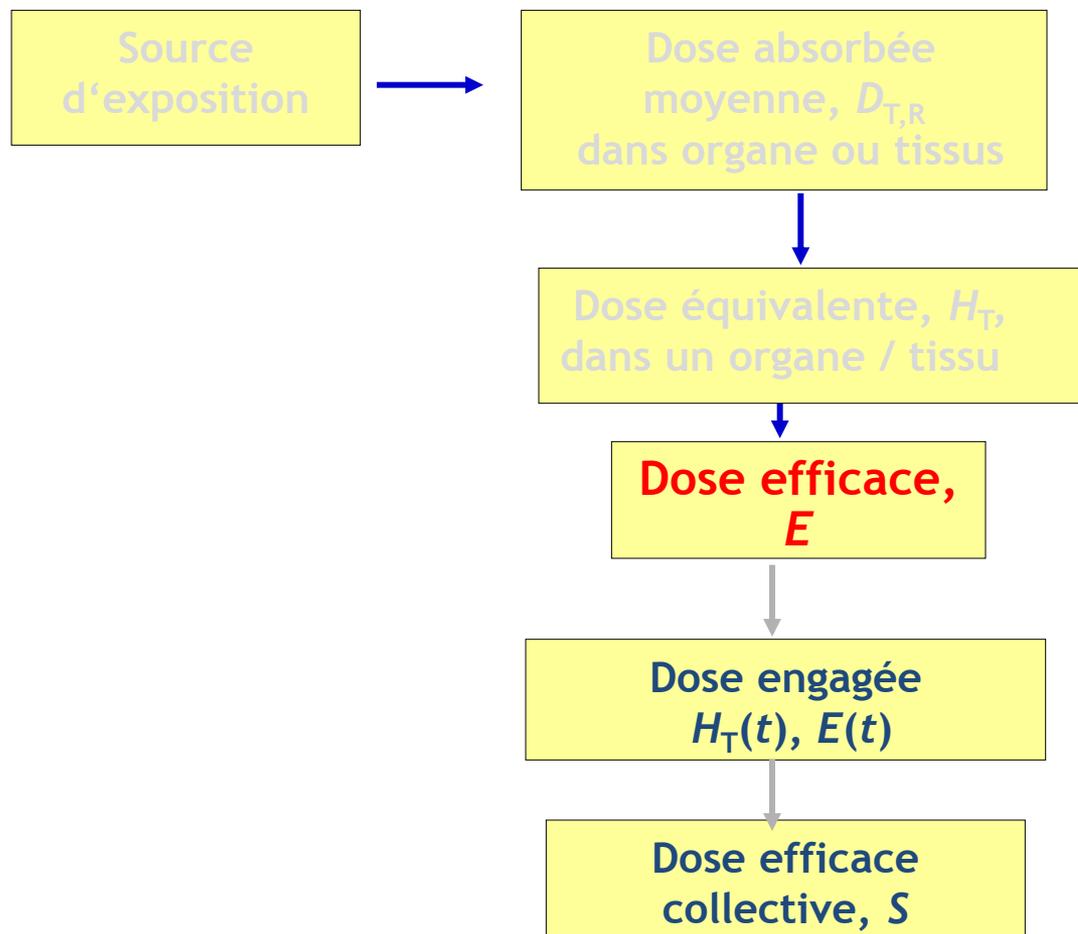
$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R}$$

The equation shows the calculation of effective dose (E) as the sum of the product of tissue weighting factors (W<sub>T</sub>) and organ weighting factors (W<sub>R</sub>) multiplied by the absorbed dose (D<sub>T,R</sub>) in each organ. A red circle highlights the W<sub>T</sub> term, with a red line pointing to the text below.

Tient compte de la sensibilité relative des différents tissus

## 2. La dose efficace aujourd'hui

### Pour la CIPR



## 2. La dose efficace aujourd'hui

En résumé,

Grandeur complexe, multidimensionnelle, intégrant

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

# 3. Les fondements (et limites) de la dose efficace

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

# 1. Les hypothèses

## 1.1. La relation linéaire sans seuil (LNT)

Relation linéaire sans seuil

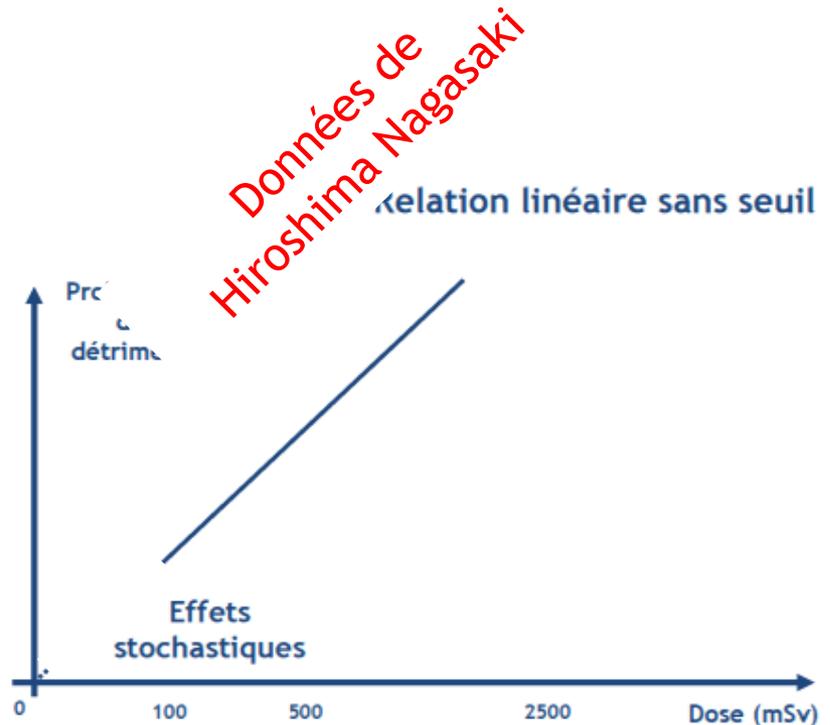
La dose efficace est  
indissociable de  
la relation  
linéaire sans seuil



# 1. Les hypothèses

## 1.1. La relation linéaire sans seuil (LNT)

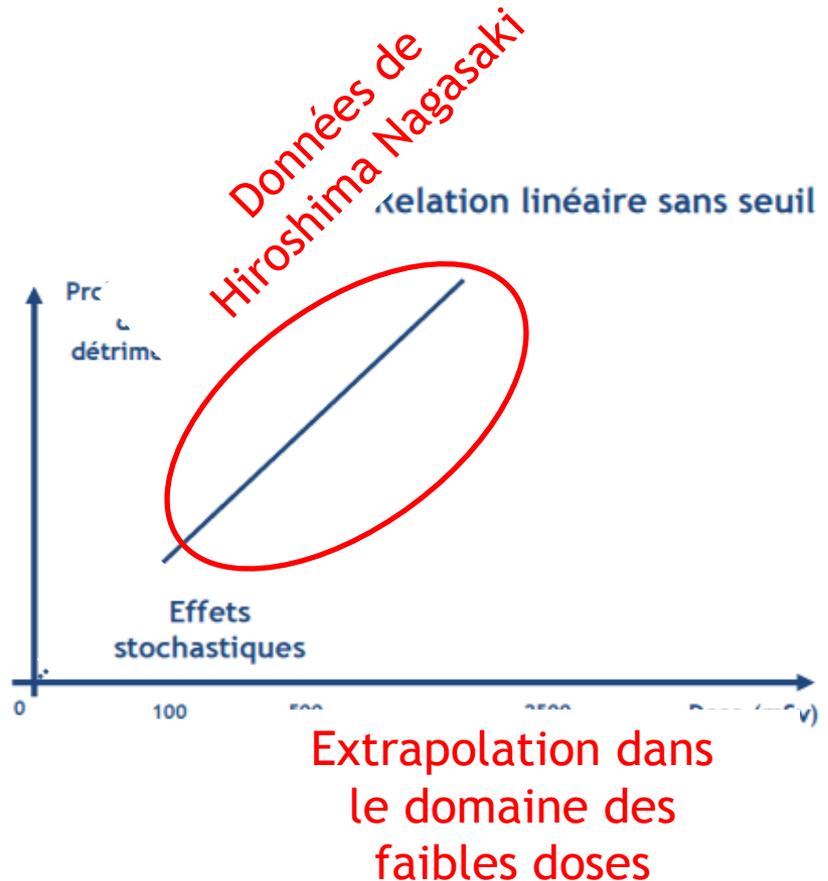
Elle repose sur le détriment observé à HN, extrapolé dans le domaine des faibles doses



# 1. Les hypothèses

## 1.1. La relation linéaire sans seuil (LNT)

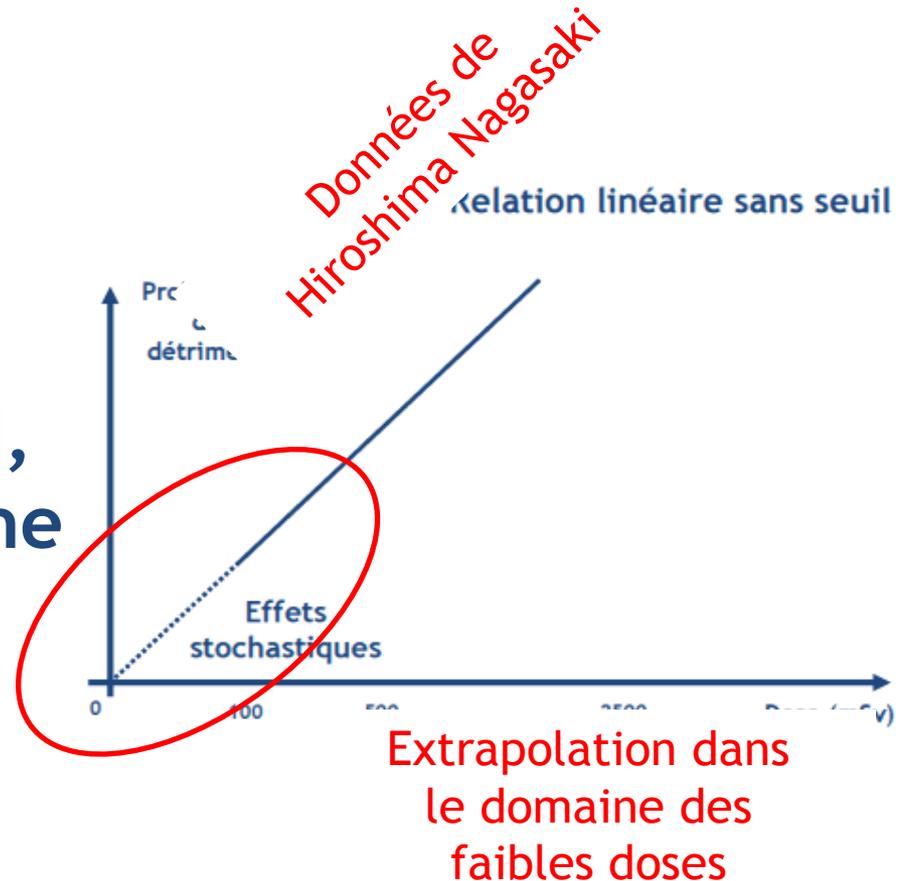
Elle repose sur le détriment observé à HN, extrapolé dans le domaine des faibles doses



# 1. Les hypothèses

## 1.1. La relation linéaire sans seuil (LNT)

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



# 1. Les hypothèses

## 1.1. *La relation linéaire sans seuil (LNT)*

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

Détriment =  $f(\text{dose})$

# *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

# 1. Les hypothèses

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

## 1.2. L'additivité des doses

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

# 1. Les hypothèses

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

## 1.2. L'additivité des doses

- A faibles doses la dose équivalente aux organes est donnée par la somme pondérée des énergies moyennes déposées
- A faibles doses, le détriment total d'une personne exposée est donné par la somme pondérée des doses équivalentes des organes isolés

# 1. Les hypothèses

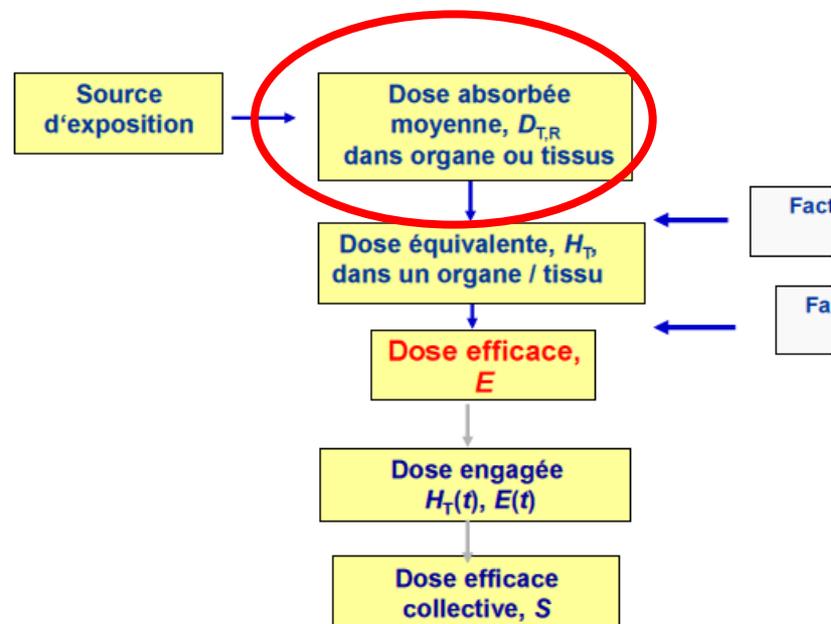
## 1.2. *L'additivité des doses*

- A faibles doses la dose équivalente aux organes est donnée par la somme pondérée des énergies moyennes déposées
- A faibles doses, le détriment total d'une personne exposée est donné par la somme pondérée des doses équivalentes des organes isolés
- Les doses espacées dans le temps sont additives
- Les doses internes et externes sont additives

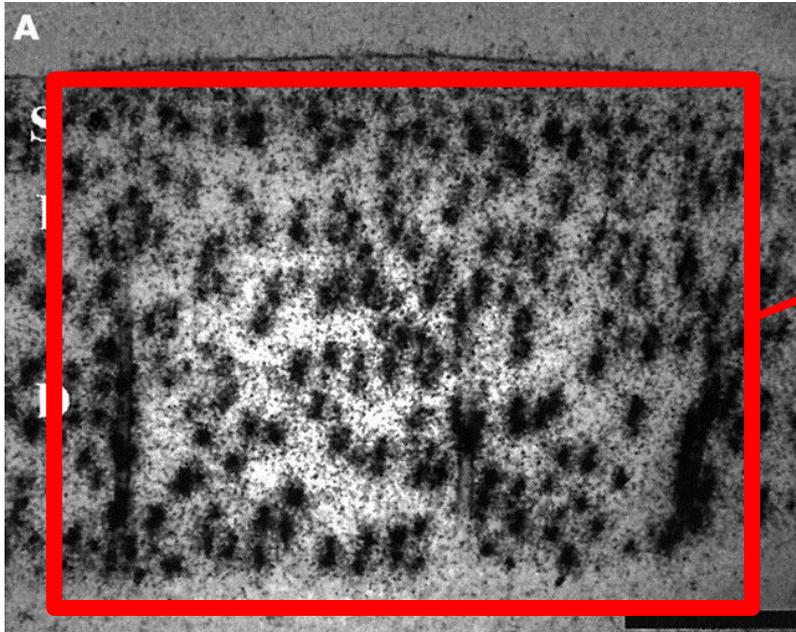
## 2. Les approximations

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

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



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



$^{35}\text{S}$  dans un cartilage de lapin

Moyenne des dépôts

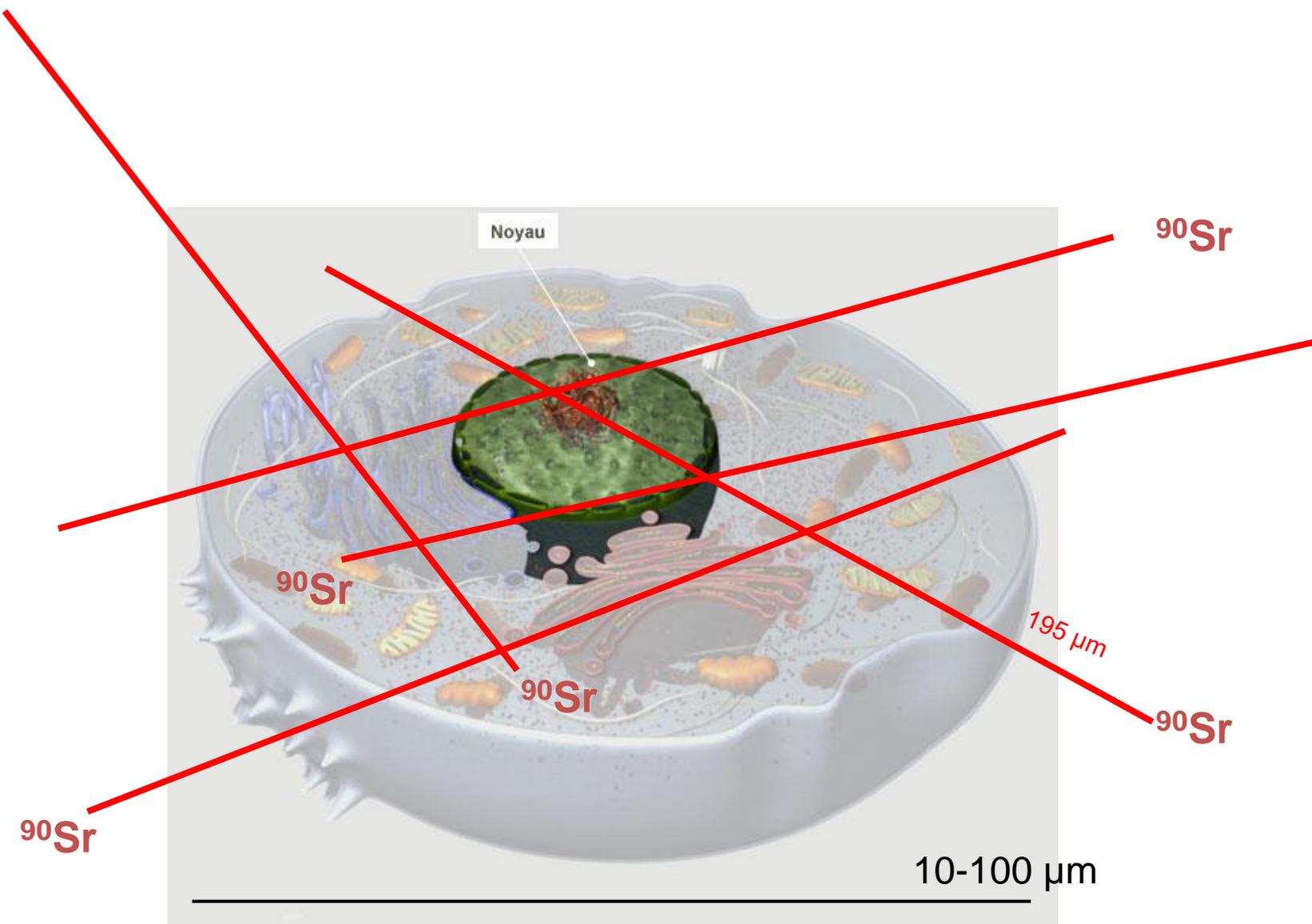
Pu dans surface osseuse de rat

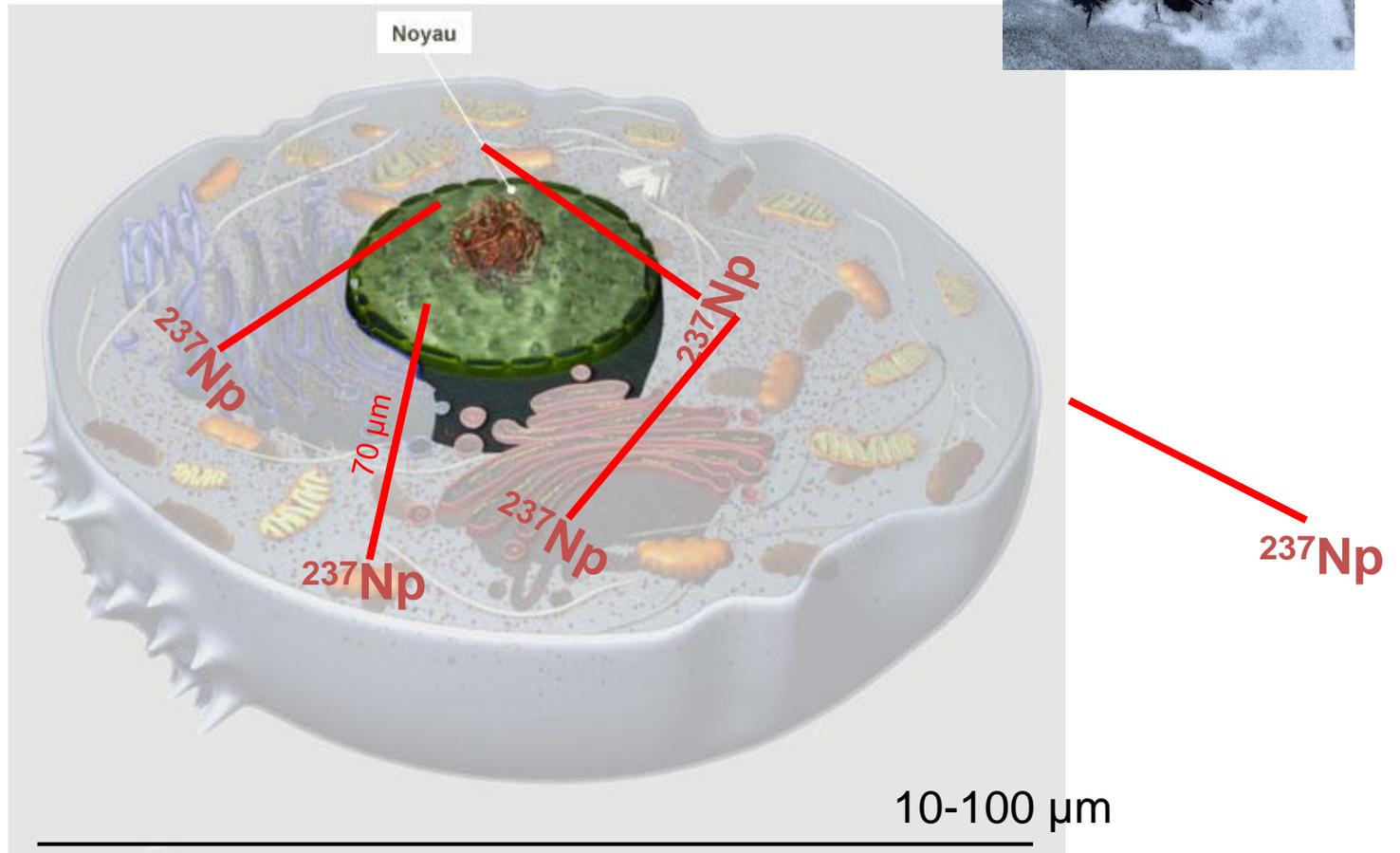


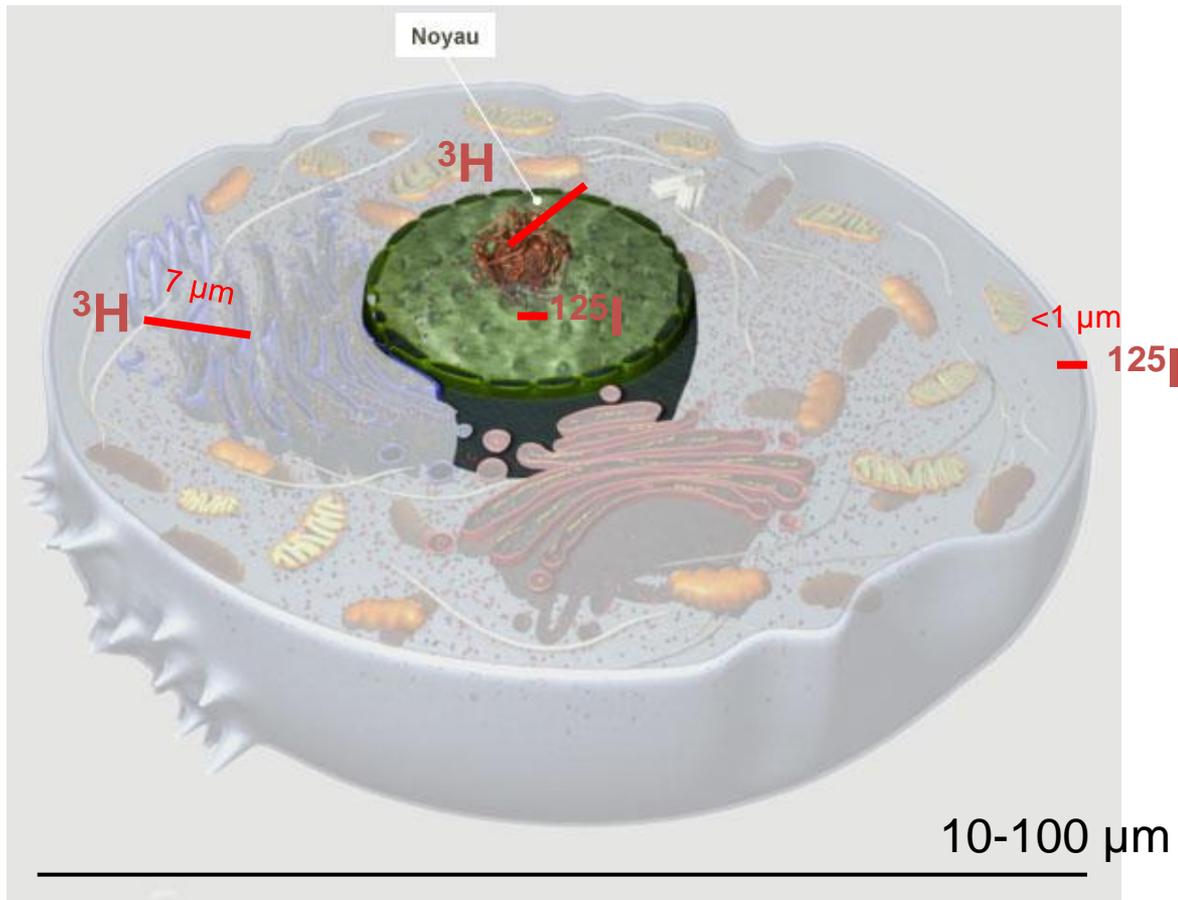
Il est estimé que la dose moyenne à l'organe\*  $D_T$  était un bon indicateur, corrélé avec le risque stochastique de l'organe (tissu) considéré.

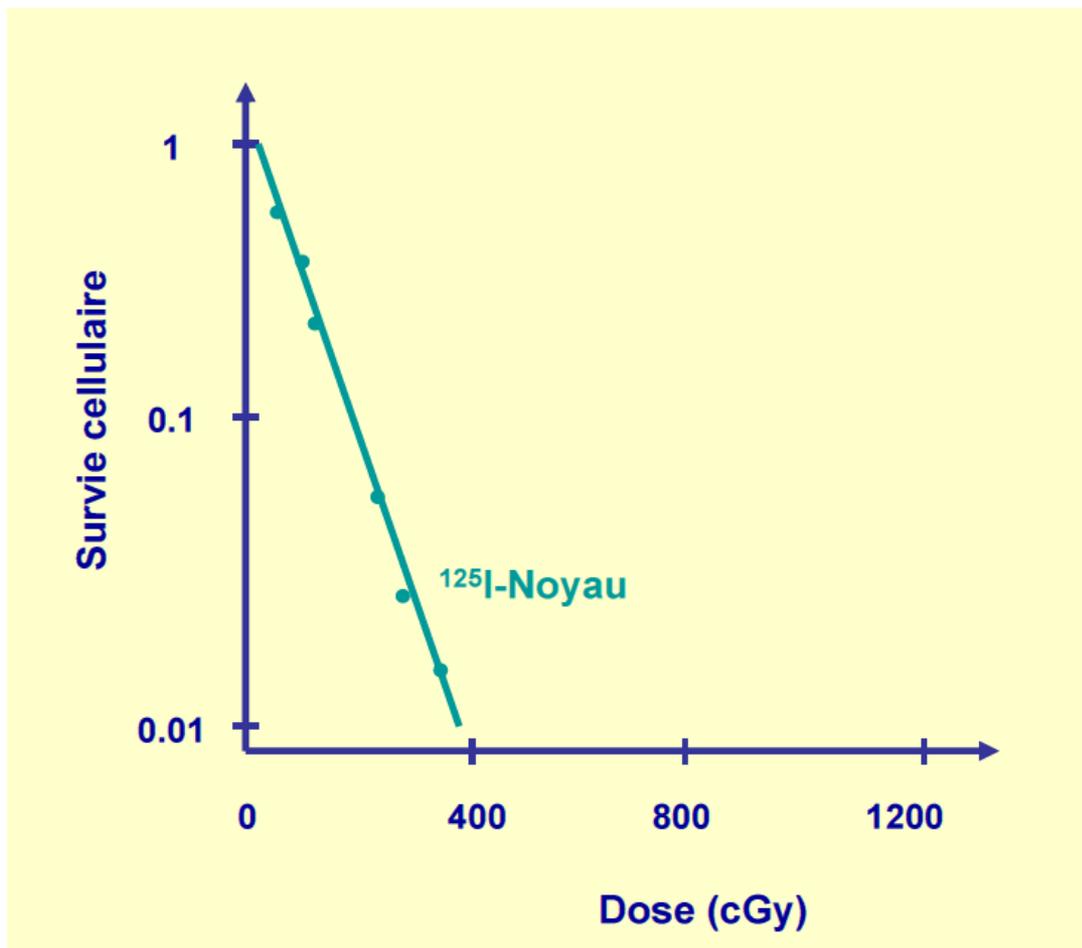
*\*Des exceptions sont consenties pour le tractus respiratoire, le tractus alimentaire, les surfaces osseuses et la peau où la dose est calculée par rapport à une région précise ou par rapport à des cellules cibles*

**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 détrimement**

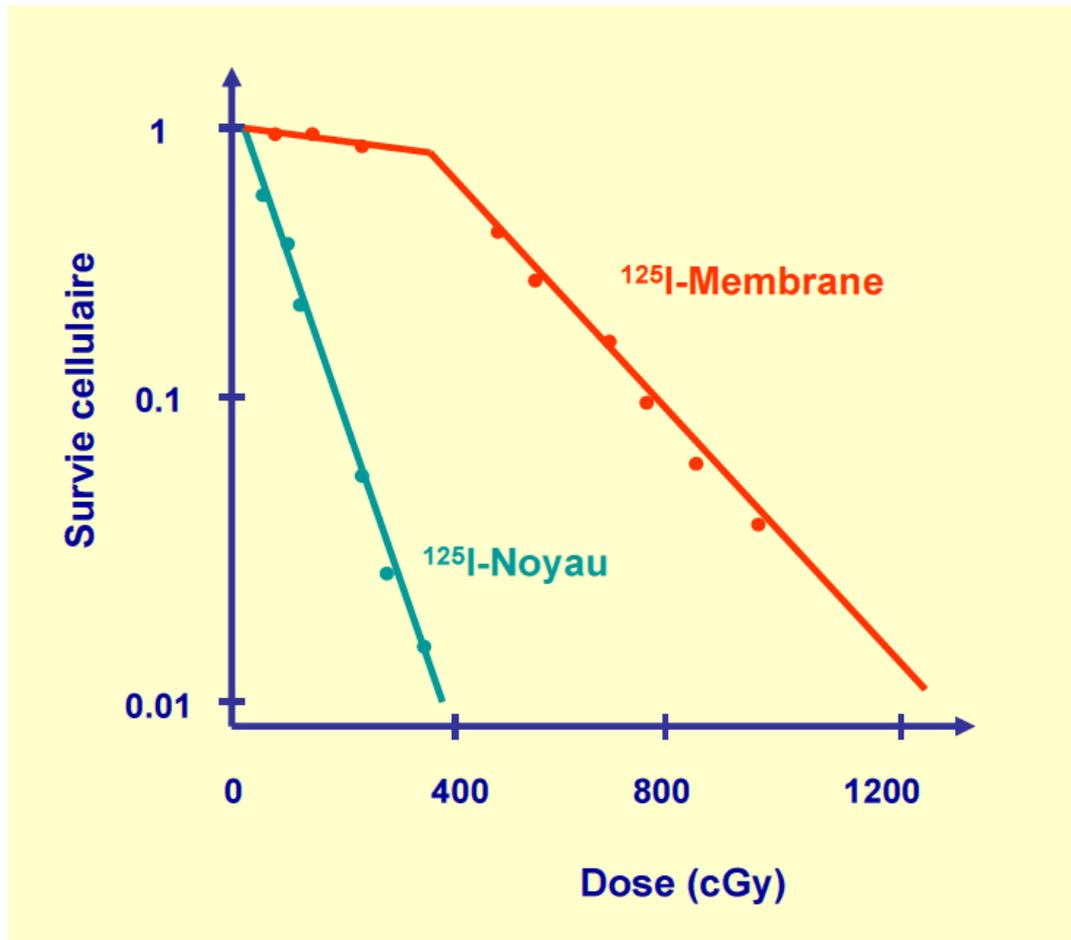




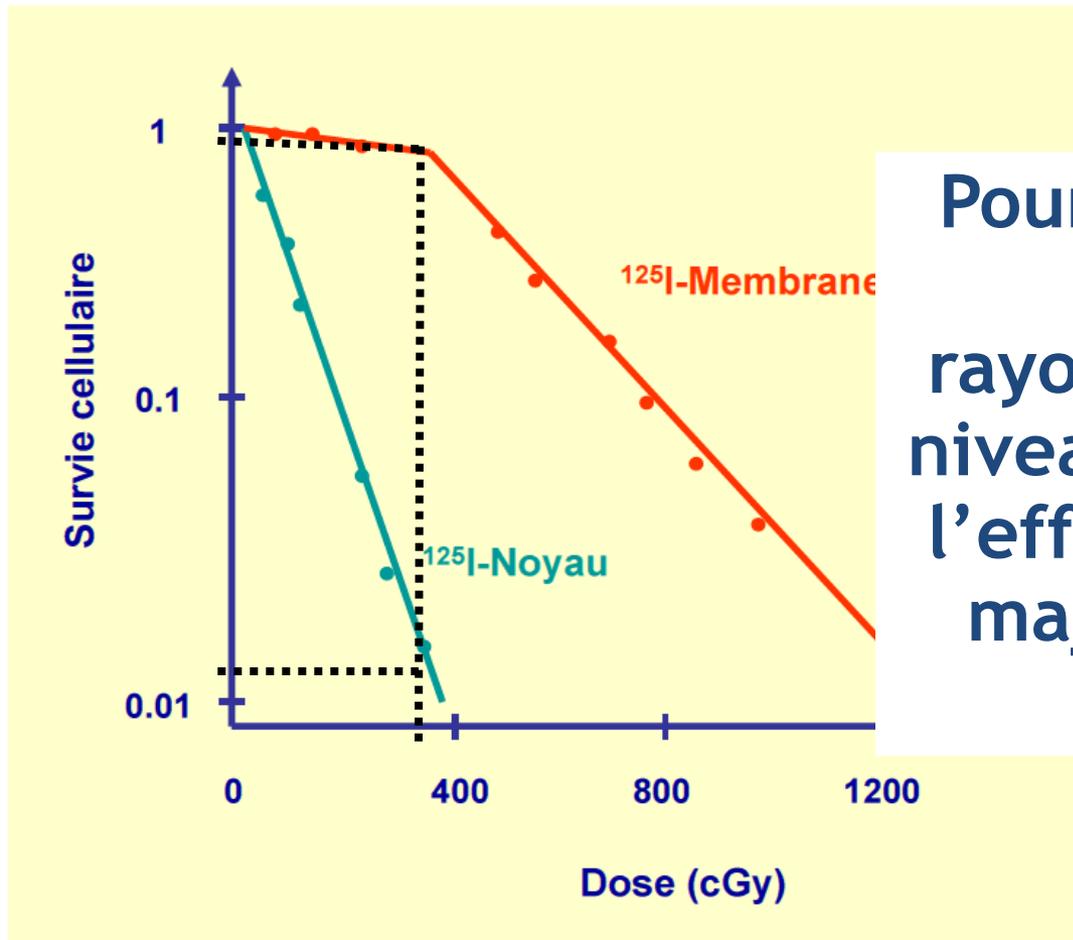




Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de  $^{125}\text{I}$   
(redessiné d'après les données de Sastry, 1992)



Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de <sup>125</sup>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

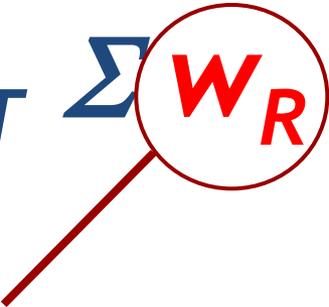
Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de <sup>125</sup>I  
 (redessiné d'après les données de Sastry, 1992)

**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**

## 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)

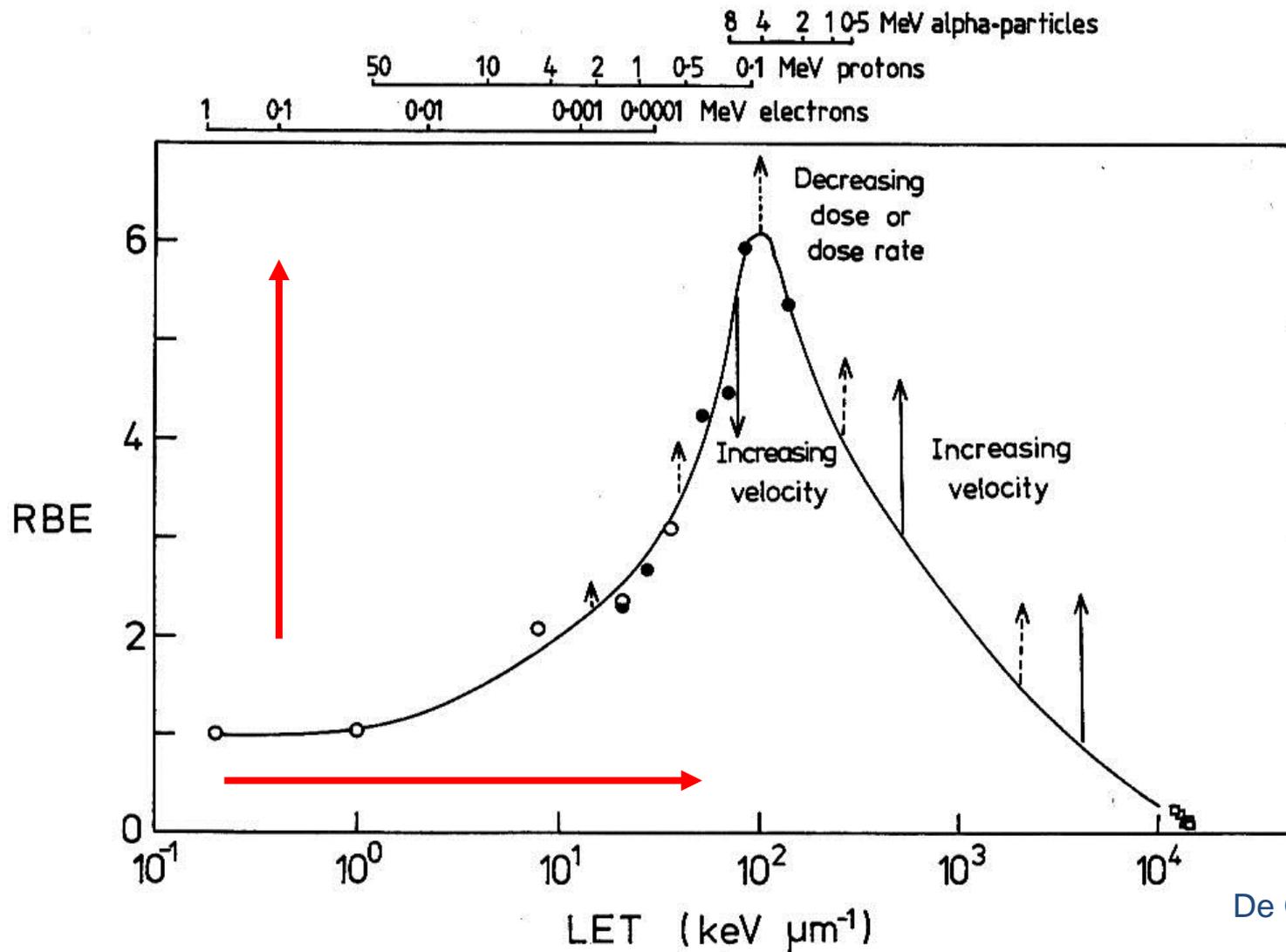
$W_R$

Photons : 1  
Electrons, Muons : 1  
Protons : 2  
Alpha : 20  
Neutrons :  $\Delta$

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

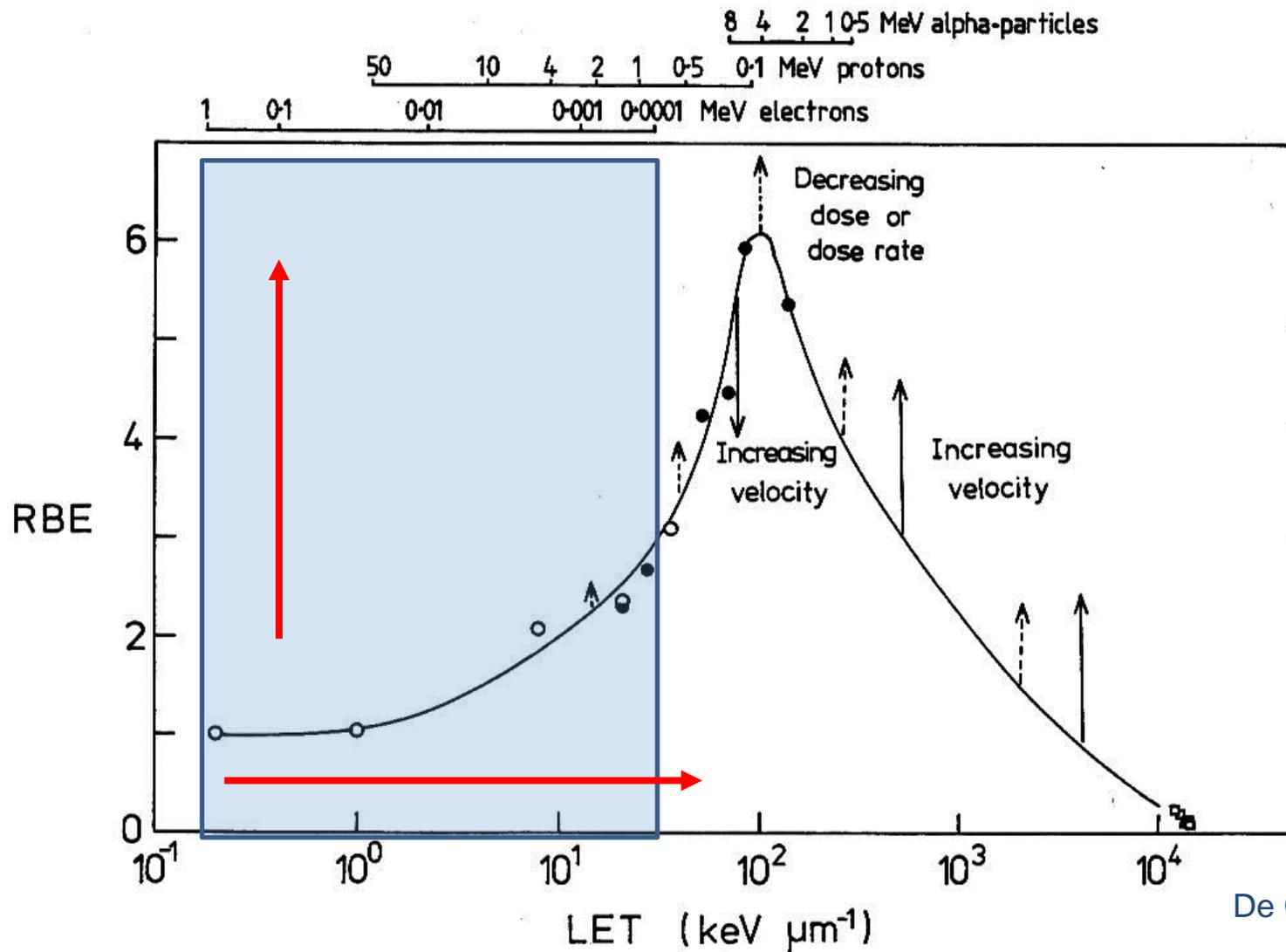
*Efficacité Biologique Relative (EBR) : définie comme étant le rapport de la dose d'un rayonnement de référence (rayons X, rayonnement gamma) à la dose du rayonnement étudié produisant un même effet biologique*

# Les EBR varient en fonction du TEL des rayonnements



De Goodhead, 1994

## 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 simplifications

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

## 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 $w_T$

- Les facteurs de pondération tissulaires sont issus principalement des études des survivants de Hiroshima et Nagasaki
- Les coefficients de risque de cancer par organe ont été “adaptés” pour tenir compte des spécificités des autres populations
- Ils incluent les incidences de cancer et les effets héréditaires, pondérée par leur mortalité, la perte de qualité de vie, la baisse de l’espérance de vie

# Les facteurs de pondération tissulaire $w_T$

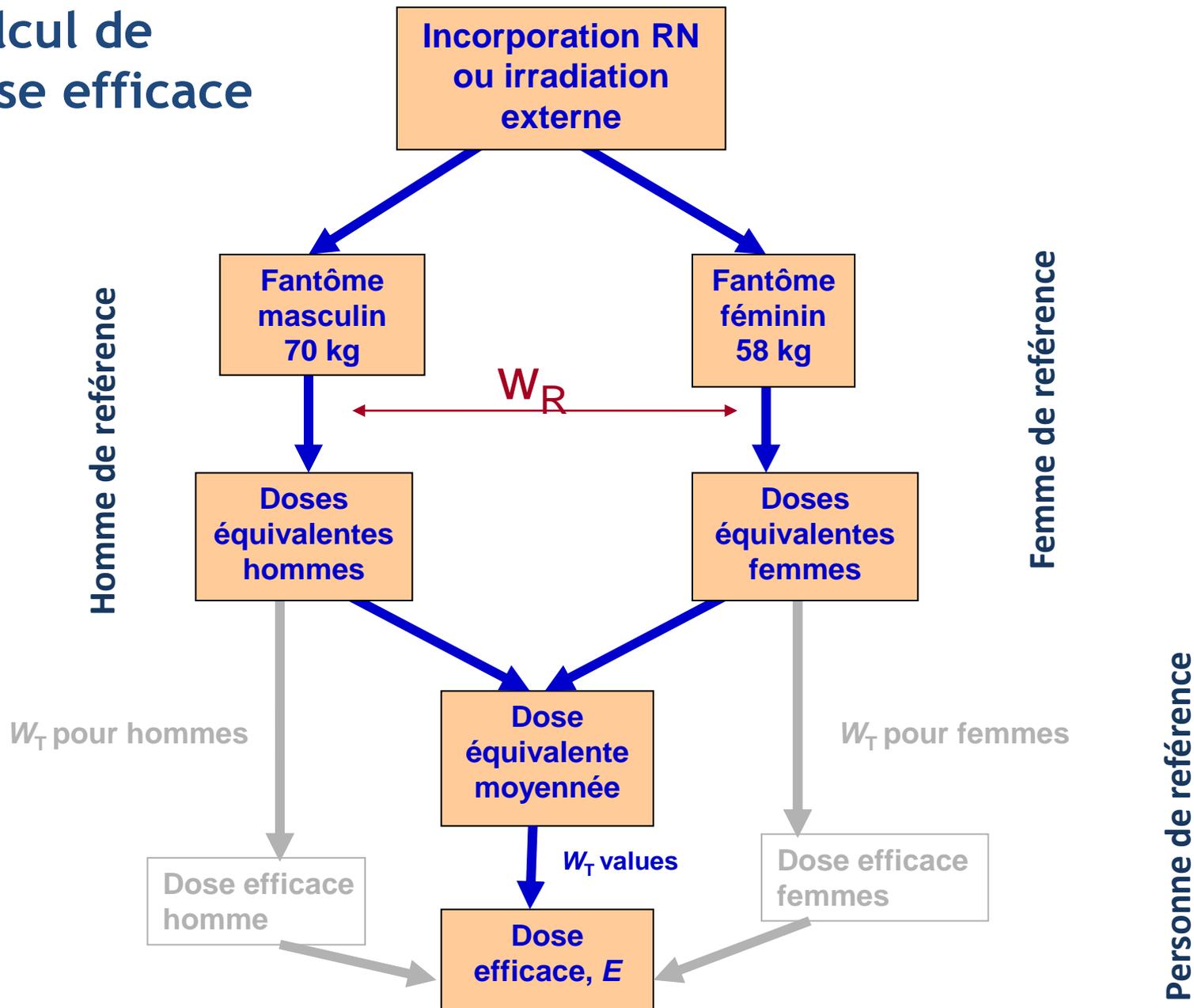
## *Regroupés en quatre groupes*

<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***

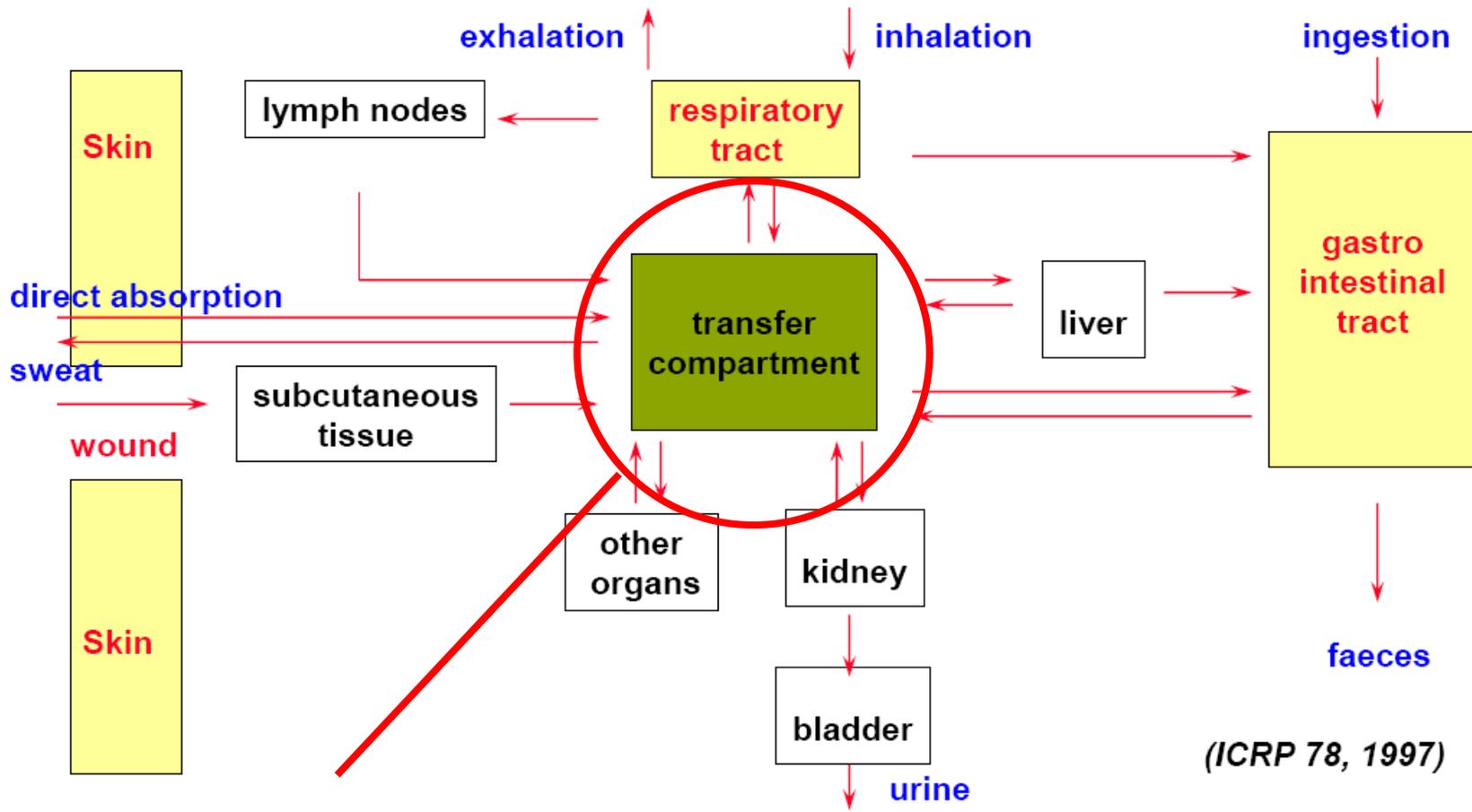
# le calcul de la dose efficace



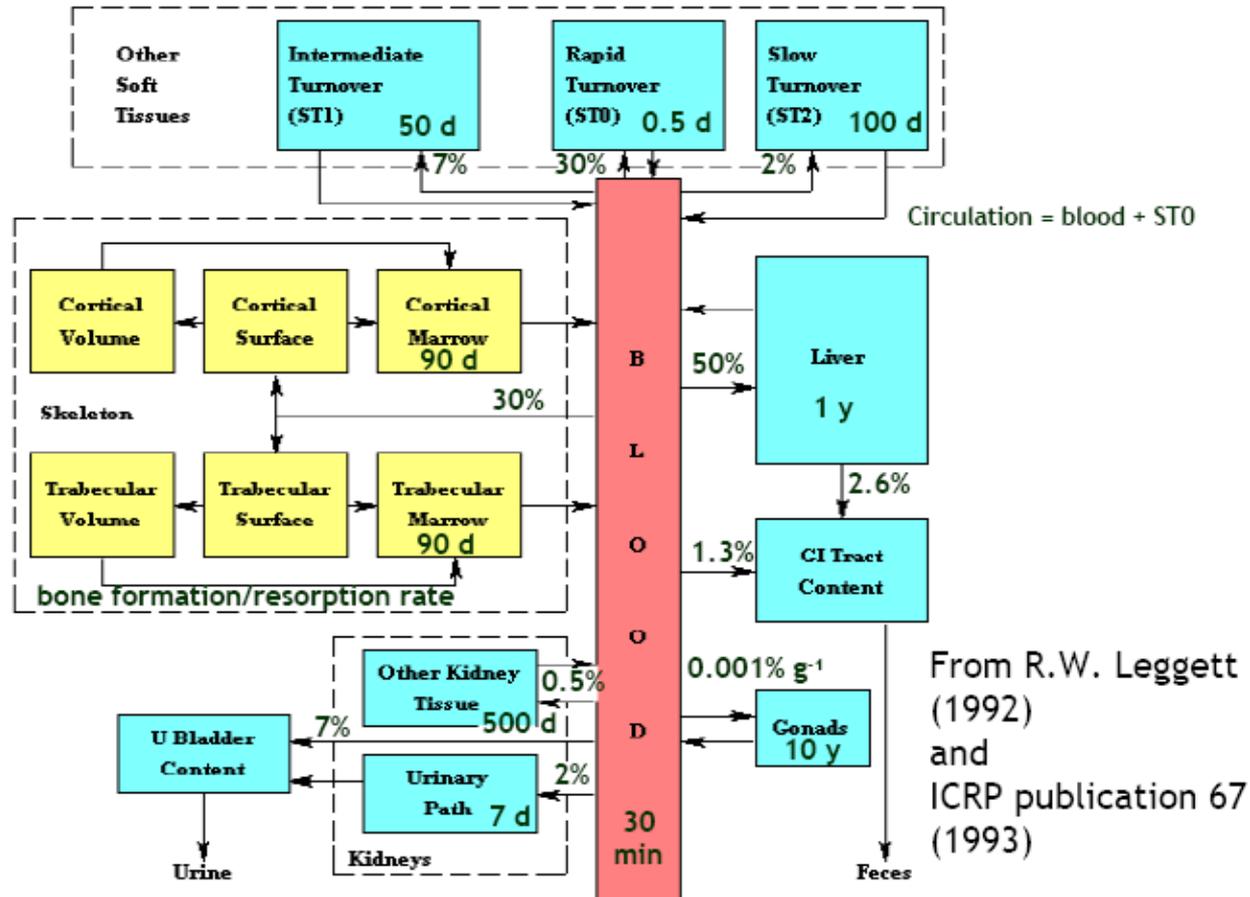
# 3. Les simplifications

- Le comportement des RN est décrit par des modèles génériques

# Modèle biocinétique générique



# Structure of the human Am biokinetic model



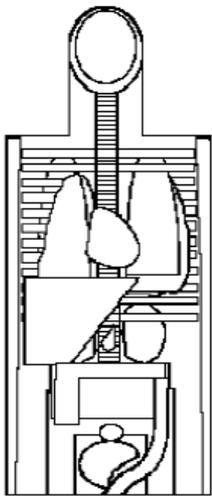
Ces modèles peuvent être complexes mais n'en sont pas moins obligatoirement réducteurs

# 3. Les simplifications (suite)

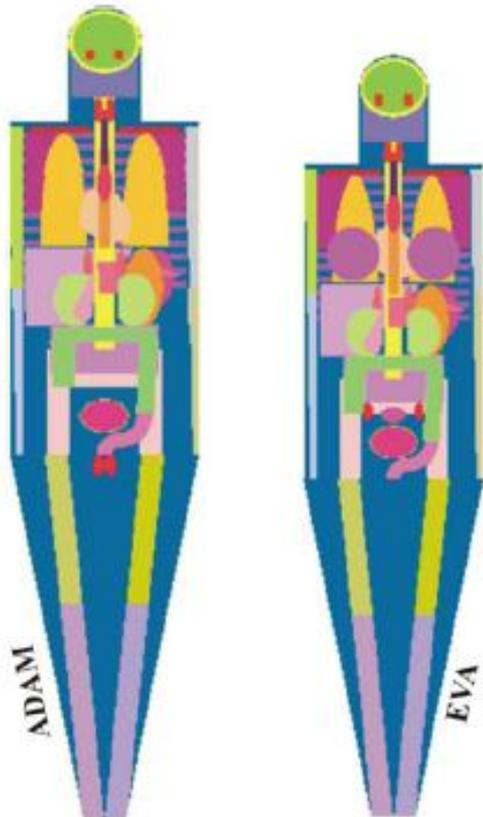
- Le comportement des RN est décrit par des modèles génériques
- Les doses sont calculées pour des hommes et femmes de référence, en utilisant des fantômes de référence

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

# 1970 s Les fantômes mathématiques



68 régions



Taille et forme du corps et des tissus sont représentés par des équations

The brain is an ellipsoid given by

$$\left(\frac{x}{6}\right)^2 + \left(\frac{y}{9}\right)^2 + \left(\frac{z - 86.5}{6.5}\right)^2 \leq 1,$$

and the volume is 1,470 cm<sup>3</sup> (Fig. 4).

Fantomes MIRD5 ou ADAM et EVA

2000s

## Les fantômes numériques

female

163 cm, 60 Kg

3.9 million voxels

voxel size: 15.2 mm<sup>3</sup>

slice thickness: 4.84 mm

In-plane resolution:

1.775 mm

male

176 cm, 73 Kg

1.9 million voxels

voxel size: 36.5 mm<sup>3</sup>

Slice thickness: 8 mm

In-plane resolution:

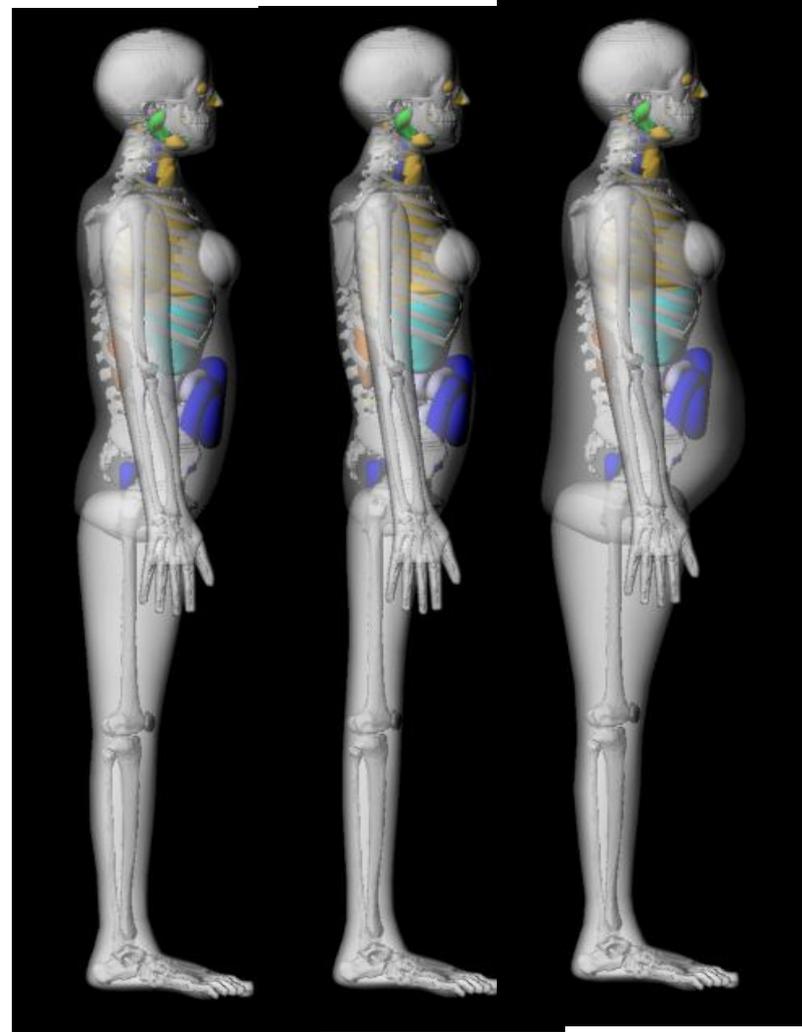
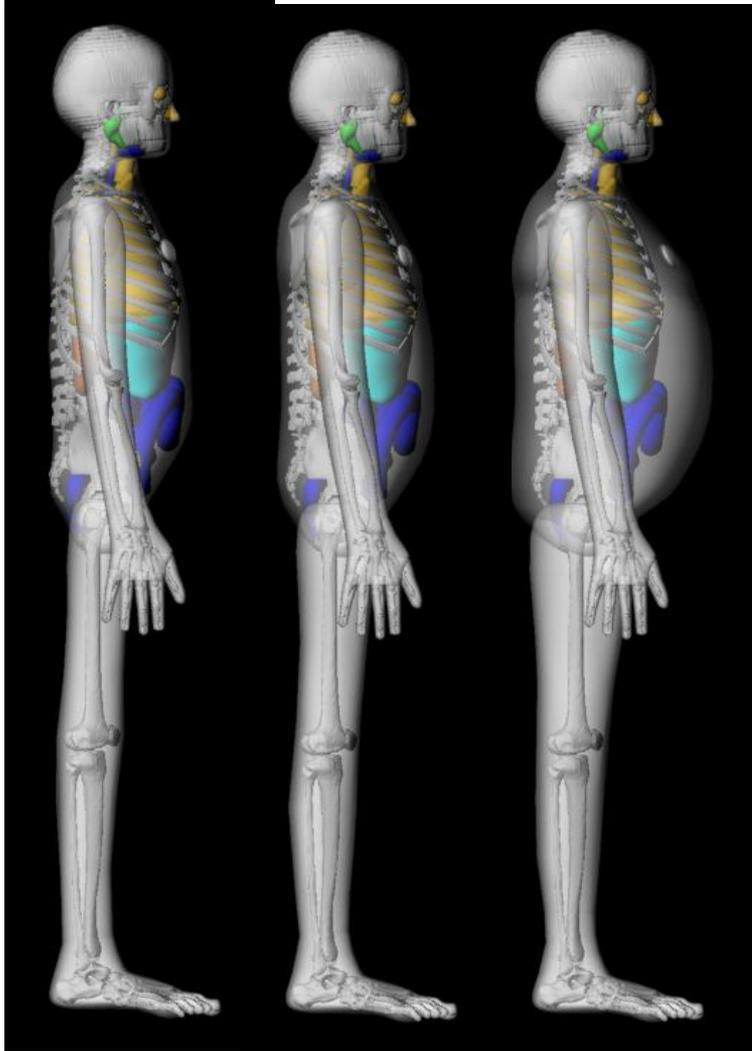
2.137 mm

D'après M. Zankl



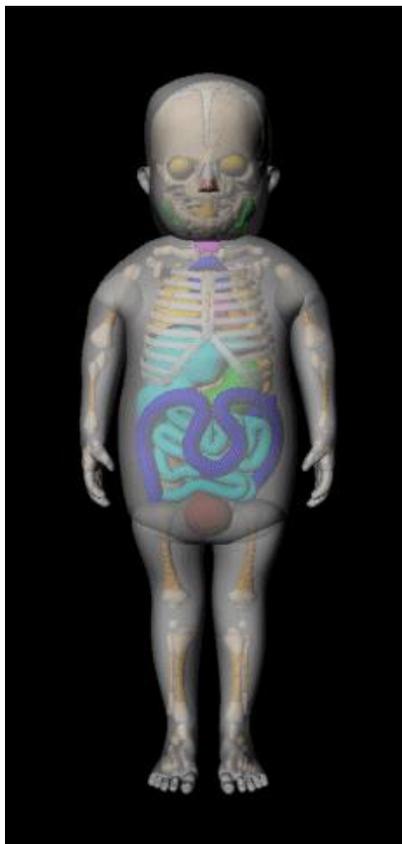
2000s

# Les fantômes numériques



*D'après Bolch*

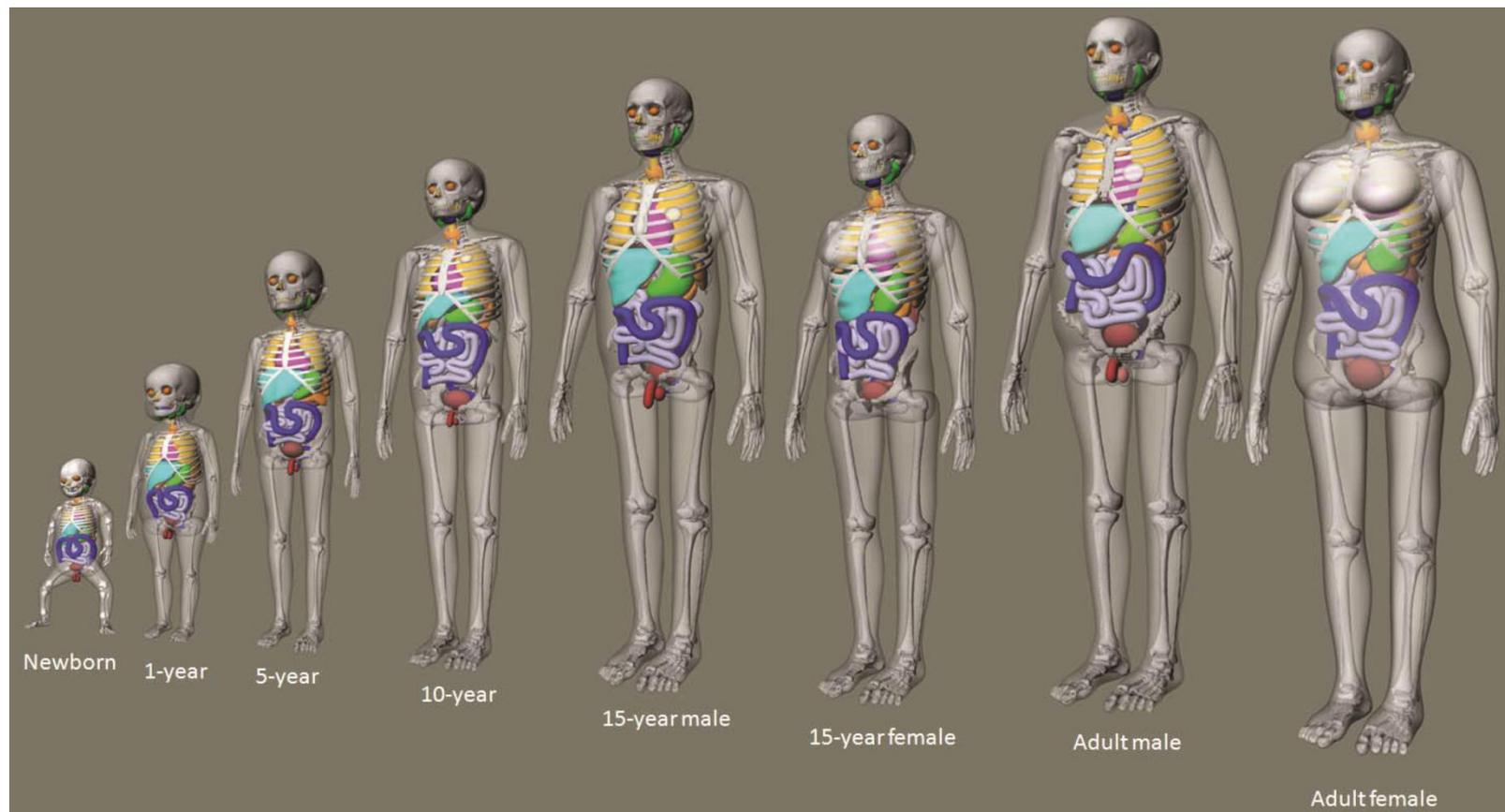
## 2000s Les fantômes numériques



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

2000s

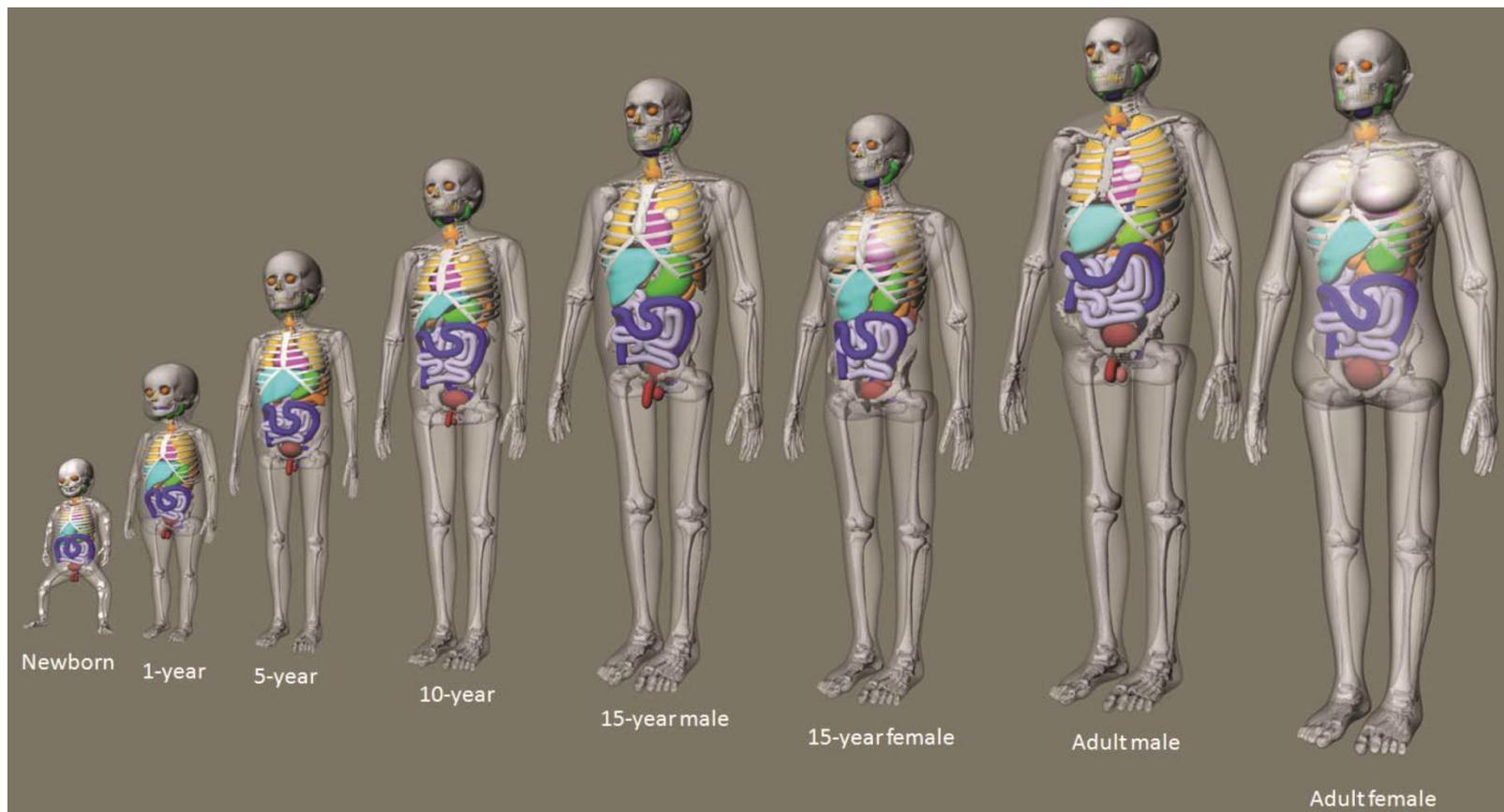
## Les fantômes numériques



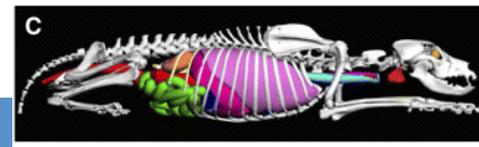
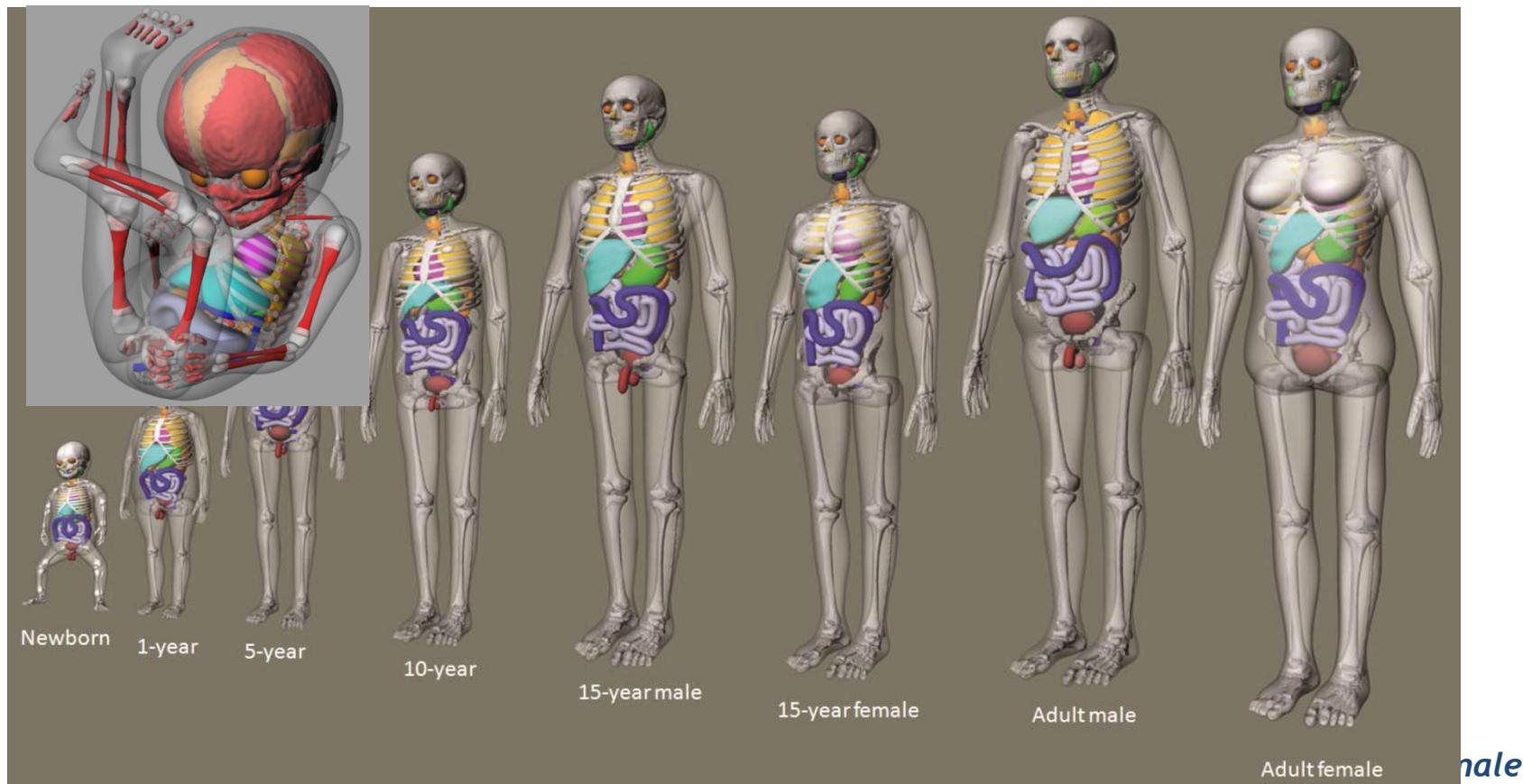
male

2000s

# Les fantômes numériques

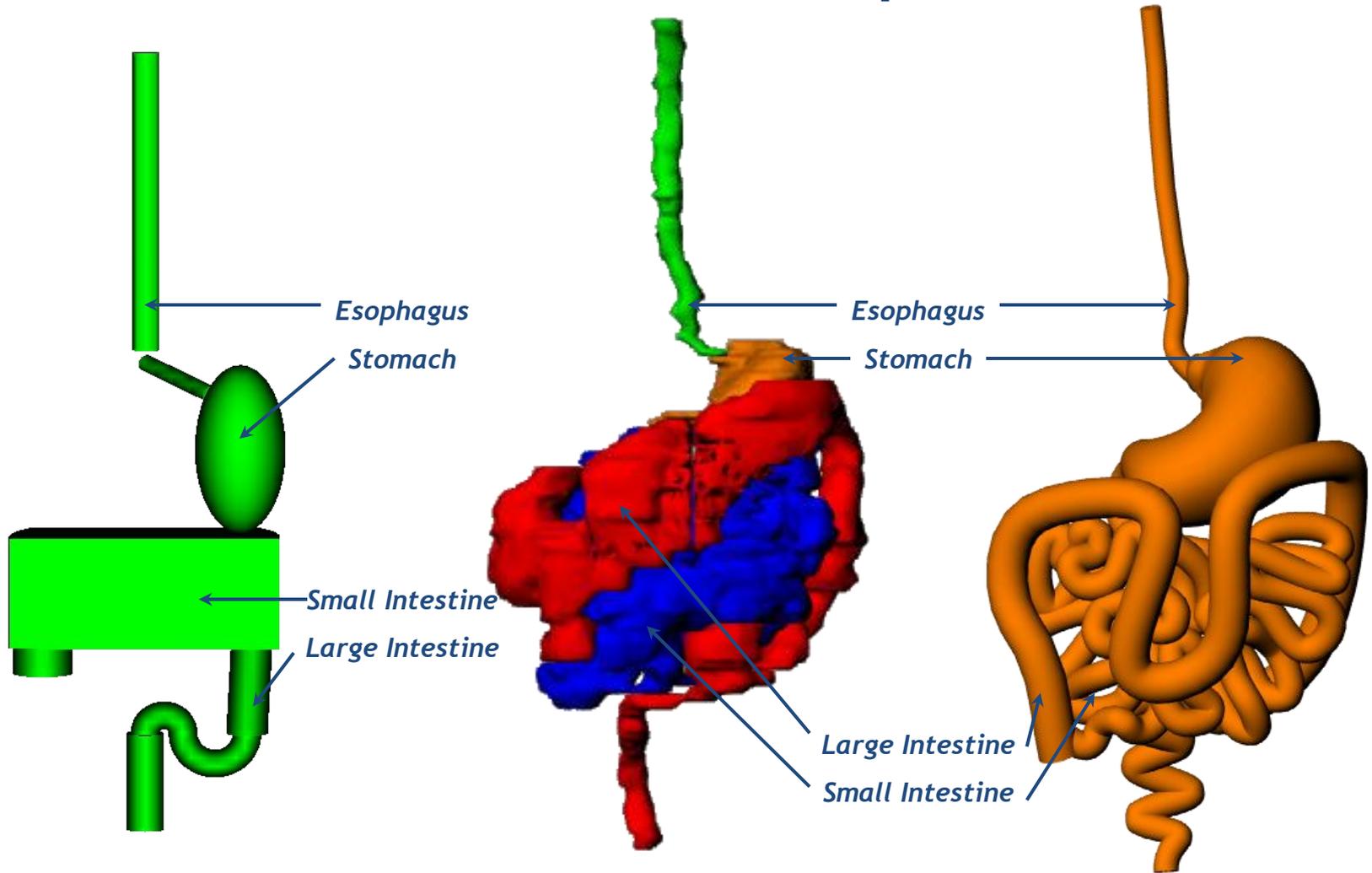


# 2000s Les fantômes numériques



2000s

# Les fantômes numériques



*Stylized Phantom*  
**phantom**

*Voxel Phantom*

*Hybrid*

*D'après Bolch*

*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. 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
- **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)

# En conséquence....

La dose efficace (collective) ne peut pas :

- être utilisée pour estimer le risque de cancers consécutifs à un traitement médical (ex. mortalité due aux scanners)
- être utilisée pour estimer le risque de cancers consécutifs à un accident (ex. ECRR à Tchernobly)
- de façon générale être utilisée pour comparer des détriments lorsque les caractéristiques des groupes exposés ne sont pas semblables

# 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**

# 4. Les applications de la dose efficace

## Dans le domaine industriel

Justification

Optimisation

Limitation

## Dans le domaine médical

Justification

Optimisation

Limitation

# 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)

# 4. 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

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

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

$H^{a,s}_T$  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 a 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*