

The logo for IRSN, featuring the letters 'I', 'R', 'S', and 'N' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue. The letters are slightly overlapping.

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Le concept de dose en radioprotection

Utilisation et limites

F. Paquet
IRSN, CIPR

Le concept de dose

En toxicologie et en médecine

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

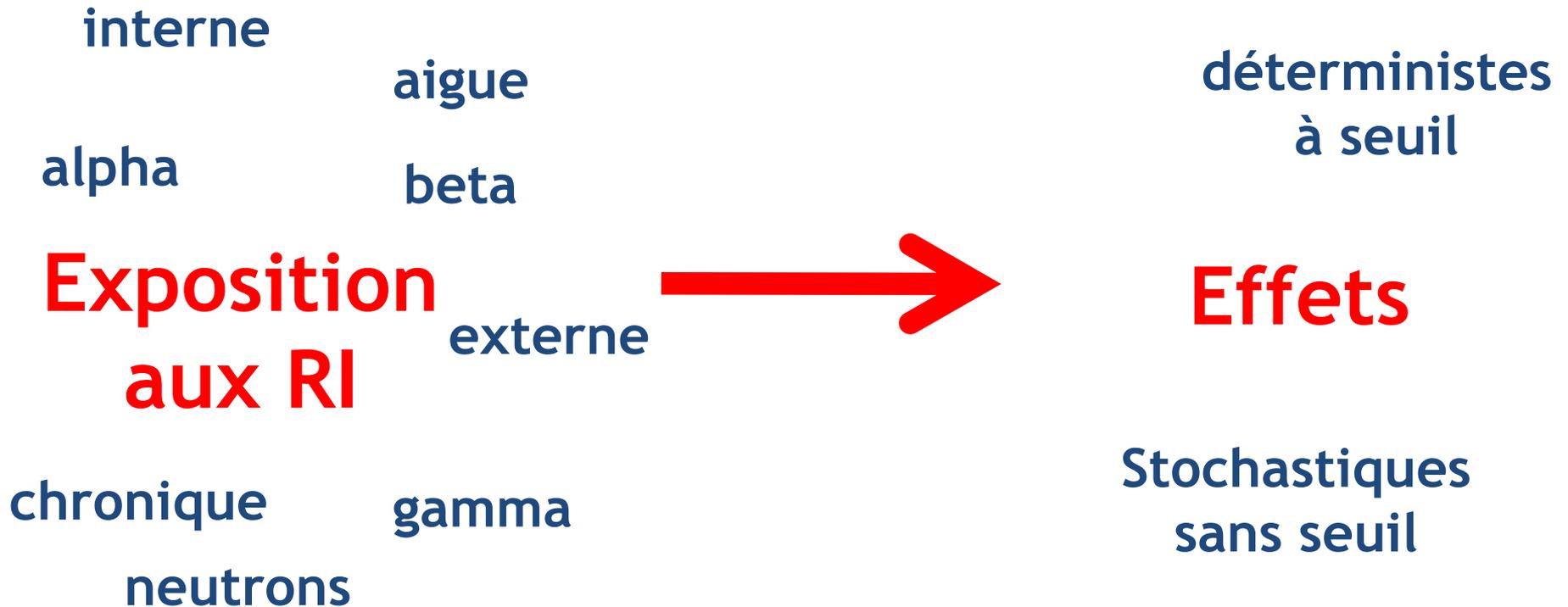
Exprimée en g/unité de masse corporelle

Dose ↔ Effet



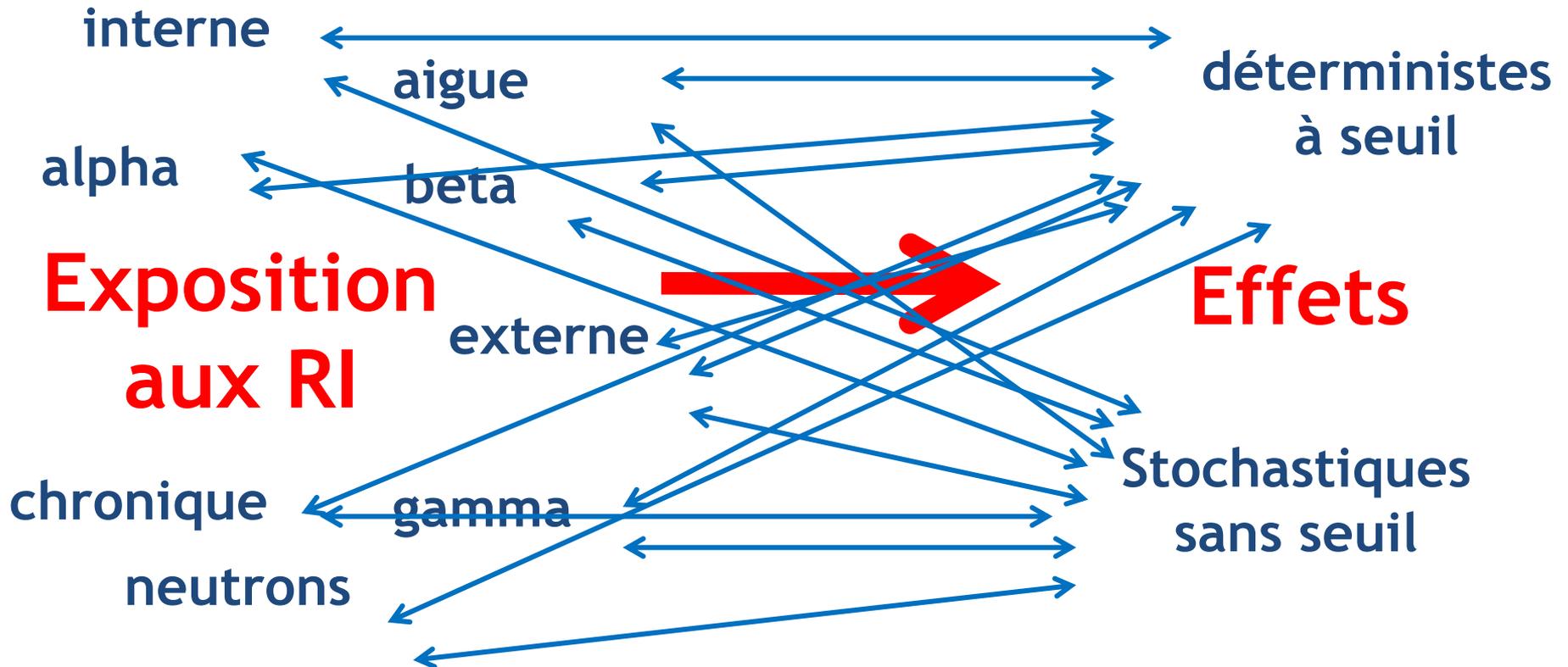
Le concept de dose

En Radioprotection



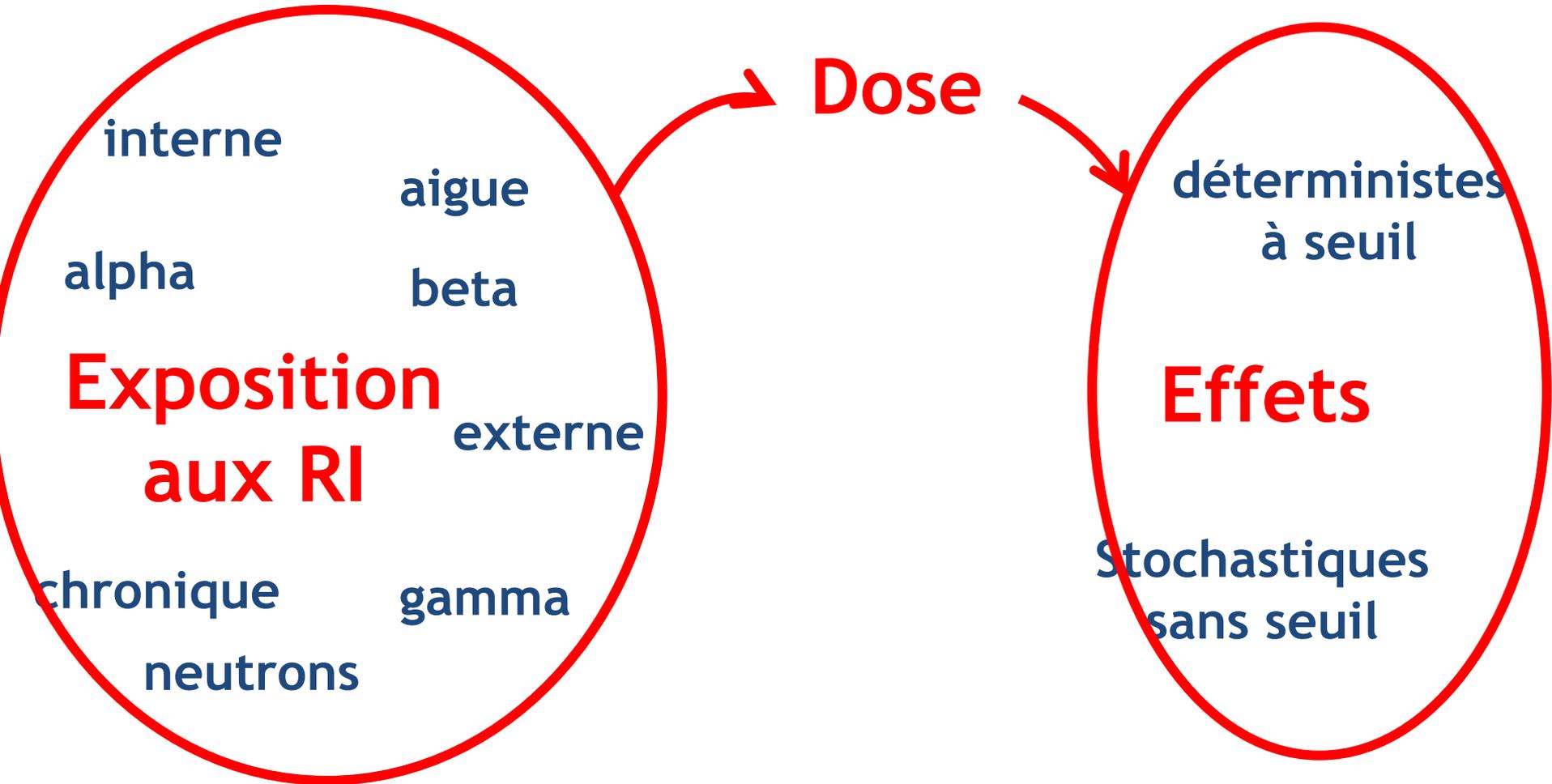
Le concept de dose

En Radioprotection



Le concept de dose

En Radioprotection



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)

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 tissus

$D_{T,R}$

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 tissus



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 multidimensionnelle, artificielle, intégrant

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

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

**Cette dose est la grandeur réglementaire
à consigner dans le dossier médical**

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

Cette
à c

Ne se mesure pas !!!!

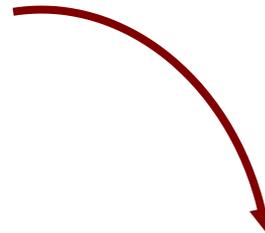
entaire
dical

La détermination de la dose efficace en cas d'irradiation externe

Mesurables

Grandeurs dosimétriques

Kerma, K
Fluence, F
Dose absorbée, D



Grandeurs opérationnelles

Equivalent dose ambient H^*
Equivalent dose directionnel H'
Equivalent dose individuel H_p

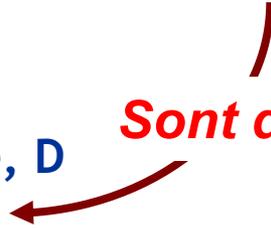


Non mesurables

Grandeurs de Protection

Dose absorbée à l'organe, D
Dose équivalente, H
Dose efficace, E

Sont des estimateurs de



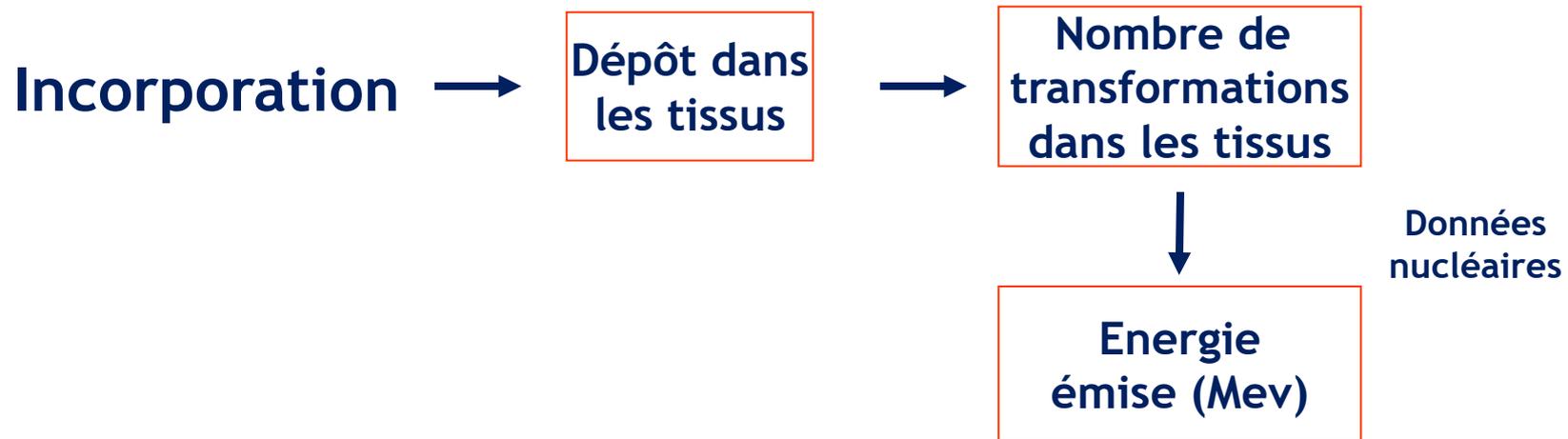
$$H_{op} > H_{prot}$$

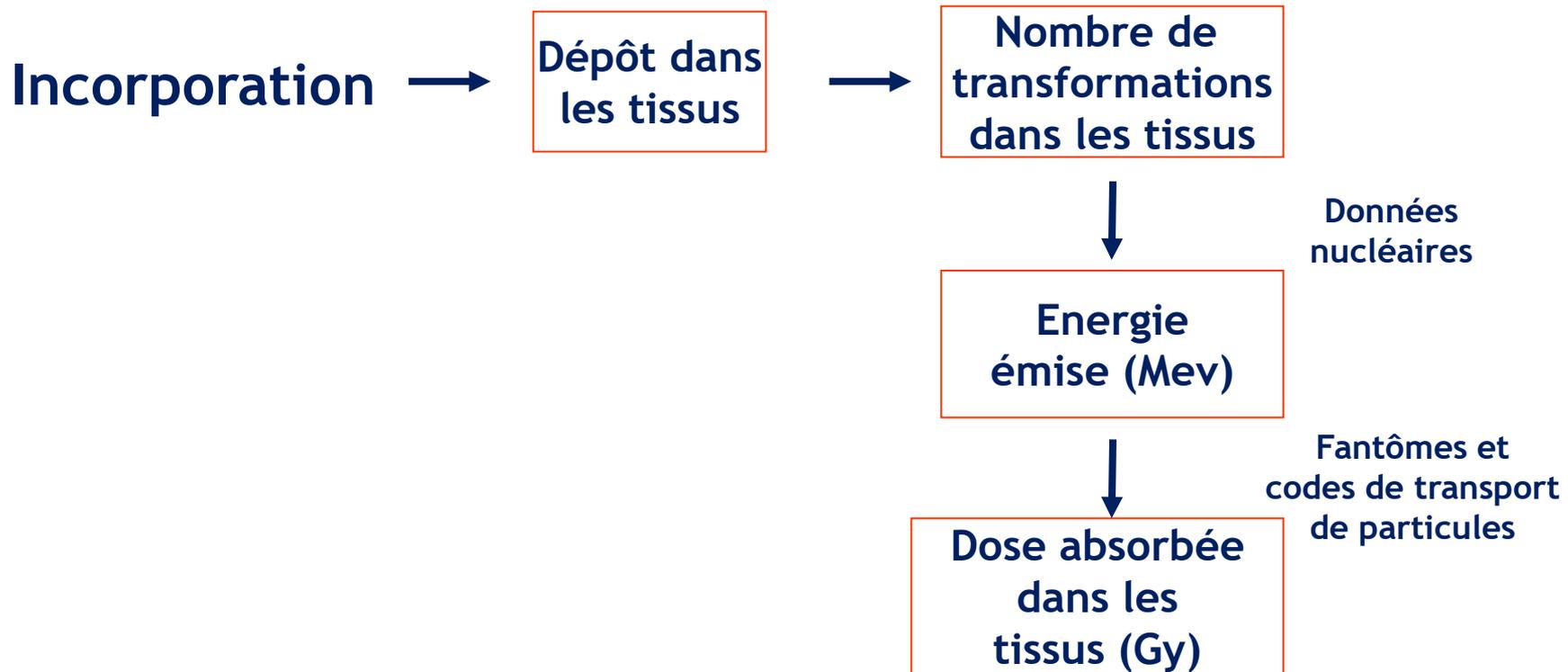
La détermination de la dose efficace en cas de contamination interne

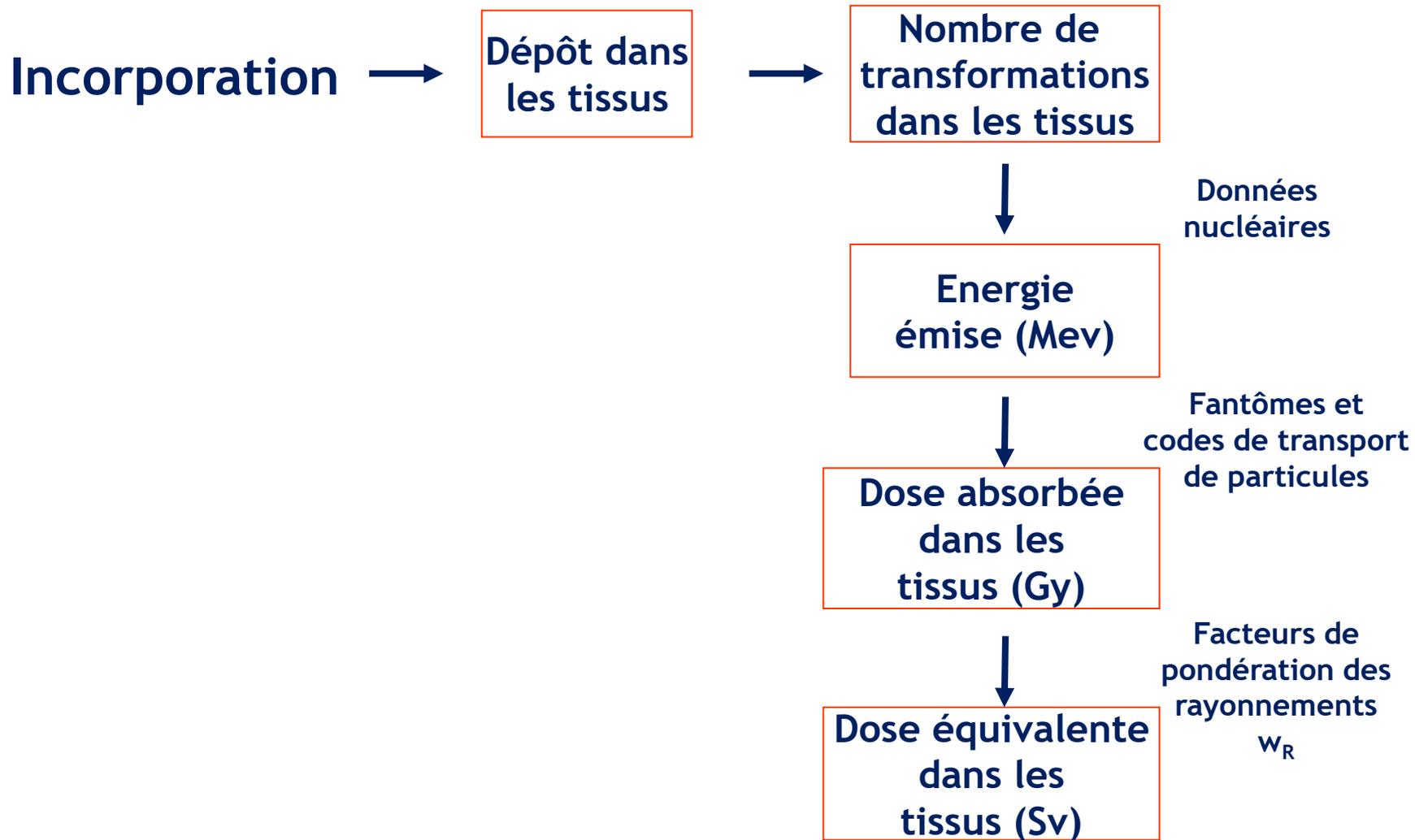
Incorporation

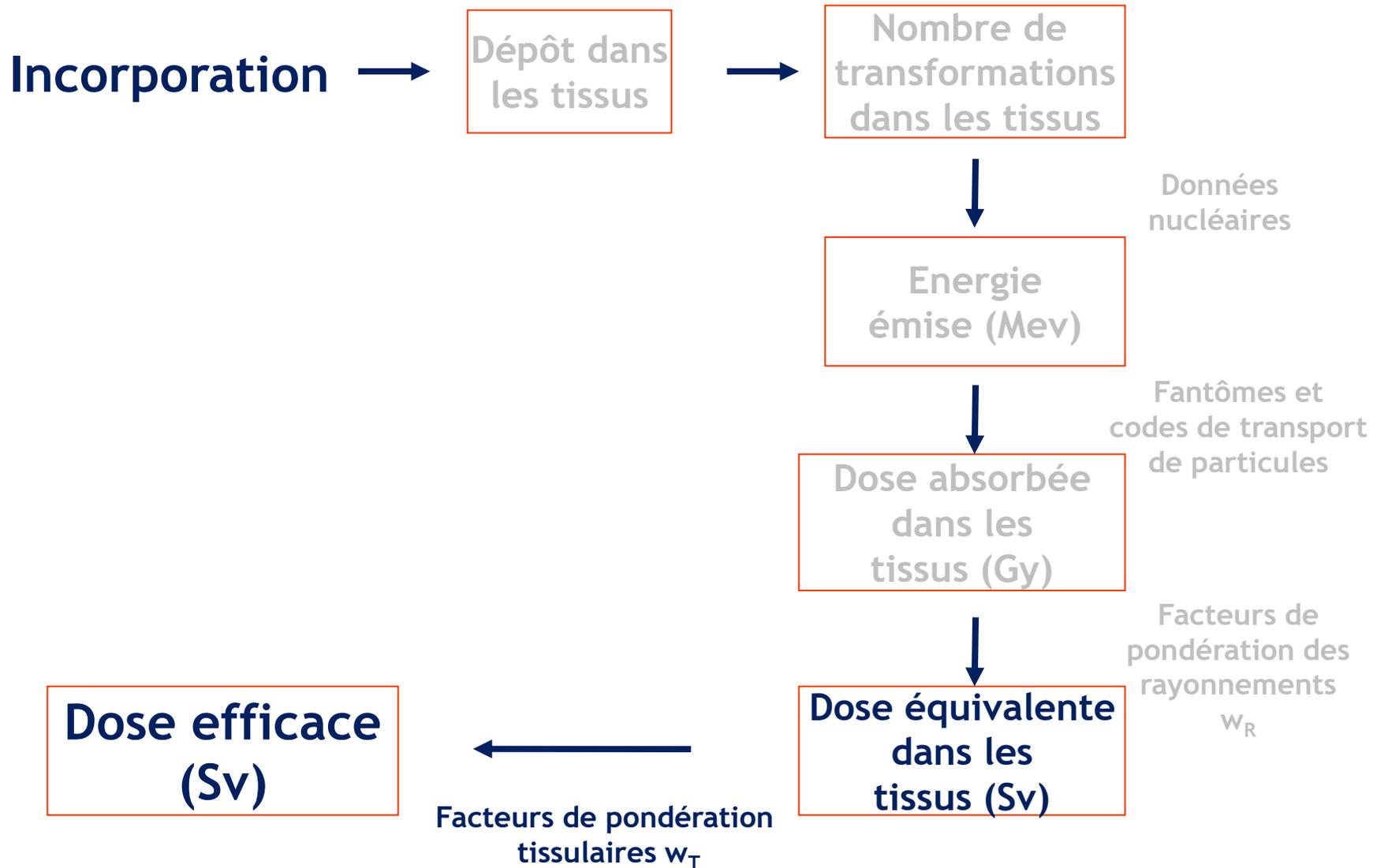
Incorporation → **Dépôt dans
les tissus**











Modèles biocinétiques

Incorporation

Dépôt dans les tissus

Nombre de transformations dans les tissus

Energie émise (MeV)

Dose absorbée dans les tissus (Gy)

Dose équivalente dans les tissus (Sv)

Dose efficace (Sv)

Données nucléaires

Fantômes et codes de transport de particules

Facteurs de pondération des rayonnements w_R

Facteurs de pondération tissulaires w_T

Les modèles biocinétiques

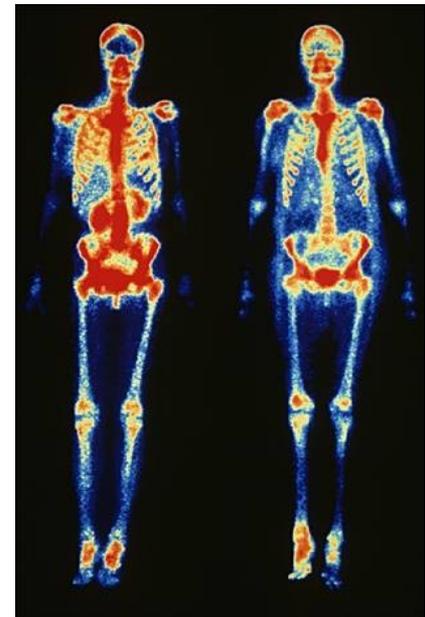
Les modèles biocinétiques sont nécessaires à la détermination des dépôts et des rétentions des radionucléides



Indiquent quels organes sont irradiés

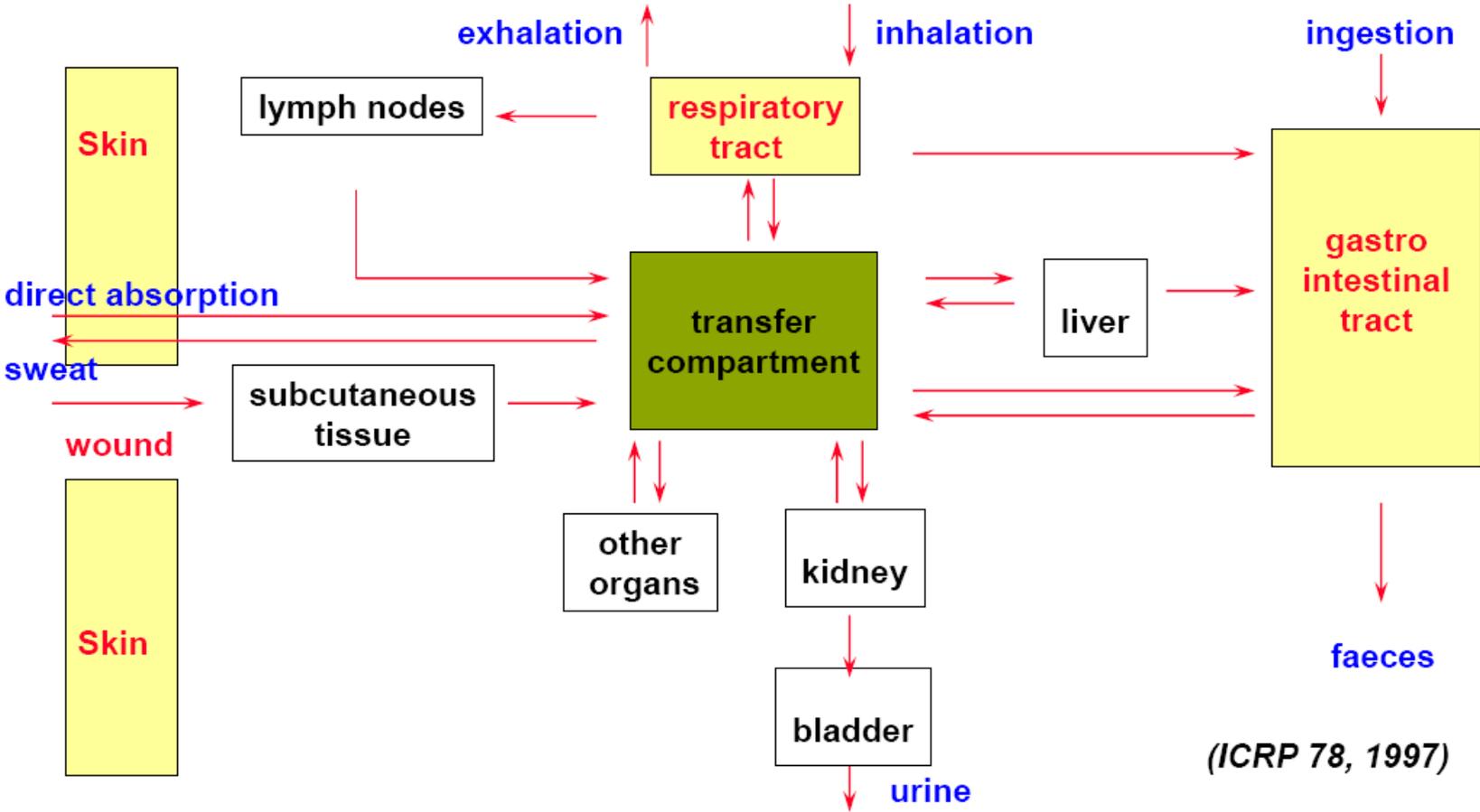


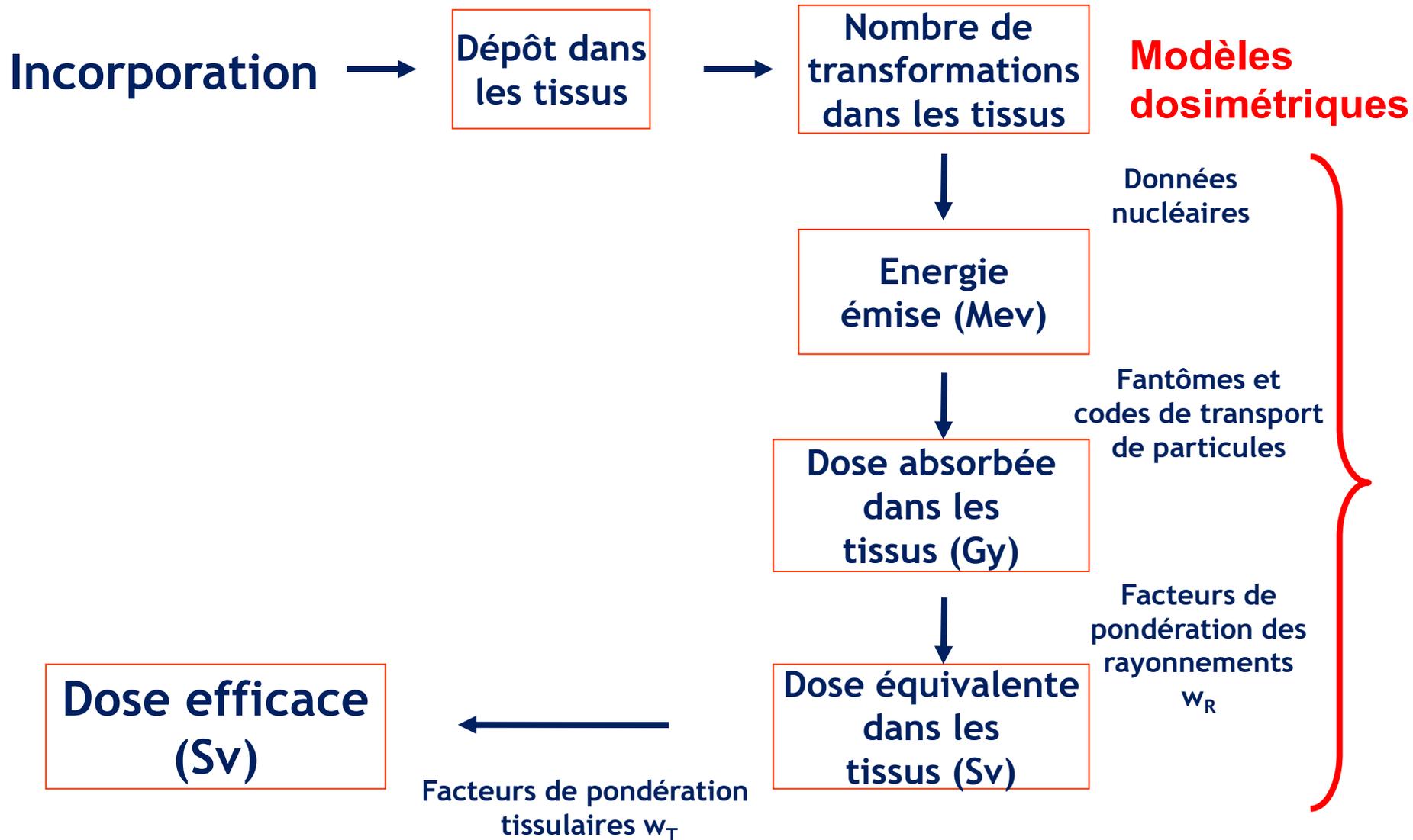
Indiquent combien de temps ils sont irradiés

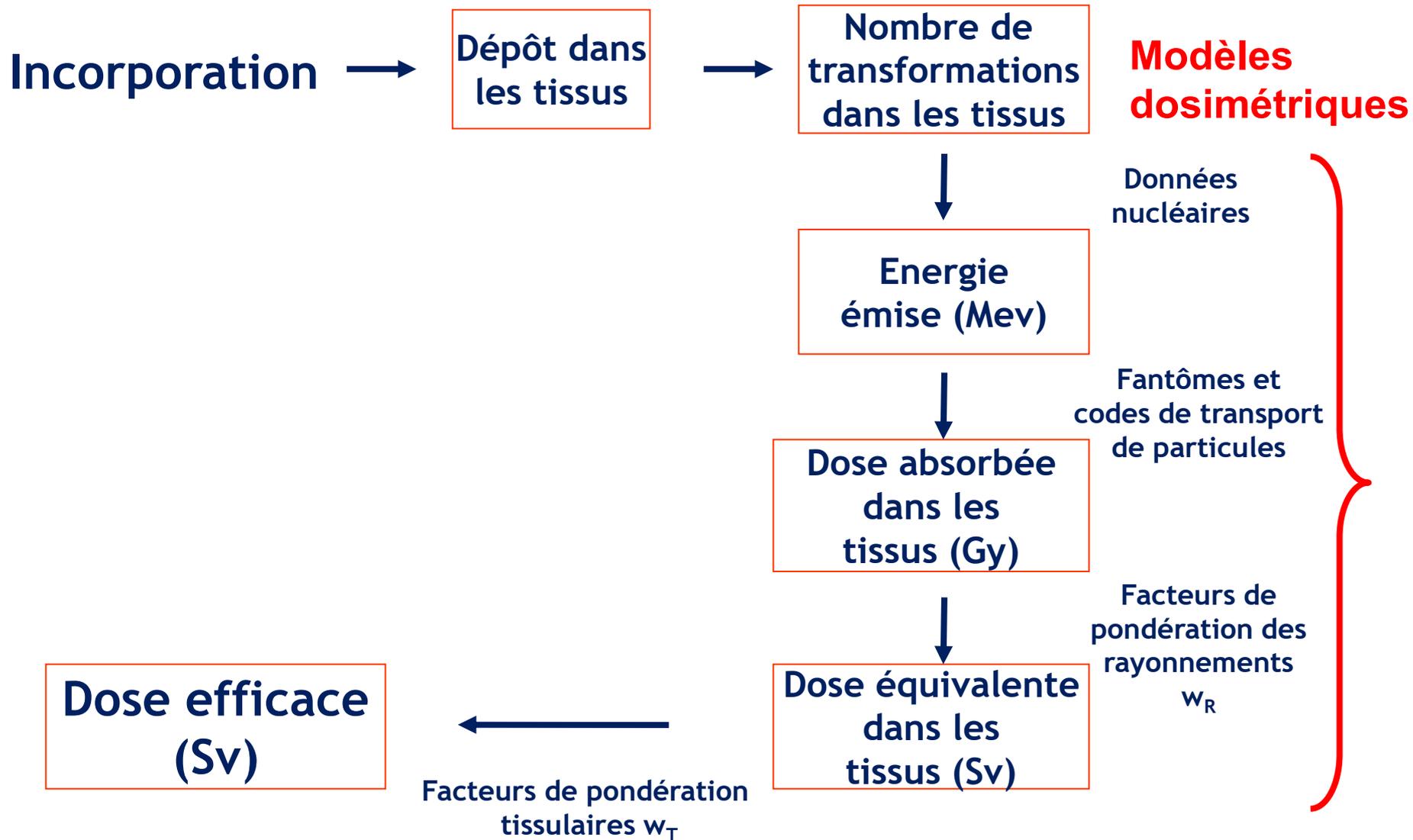


^{99m}Tc in human after scintigraphy

Modèle biocinétique générique







Les modèles dosimétriques

Les modèles dosimétriques sont utilisés pour calculer les dépôts d'énergie dans les tissus

$$\bar{D}(r_T, T_P, G, T_C) = \sum_{r_S} \int_0^{T_C} A(r_S, T_P + \tau, G) S(r_T \leftarrow r_S, T_P + \tau, G) d\tau$$

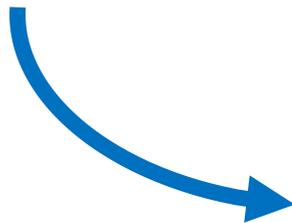
$$\bar{d}(r_T, T_P, G, T_C) = \sum_{r_S} \int_0^{T_C} a(r_S, T_P + \tau, G) S(r_T \leftarrow r_S, T_P + \tau, G) d\tau$$

$$S(r_T \leftarrow r_S, T_P, G) = \sum_i E_i Y_i \Phi(r_T \leftarrow r_S, T_P, G, E_i)$$

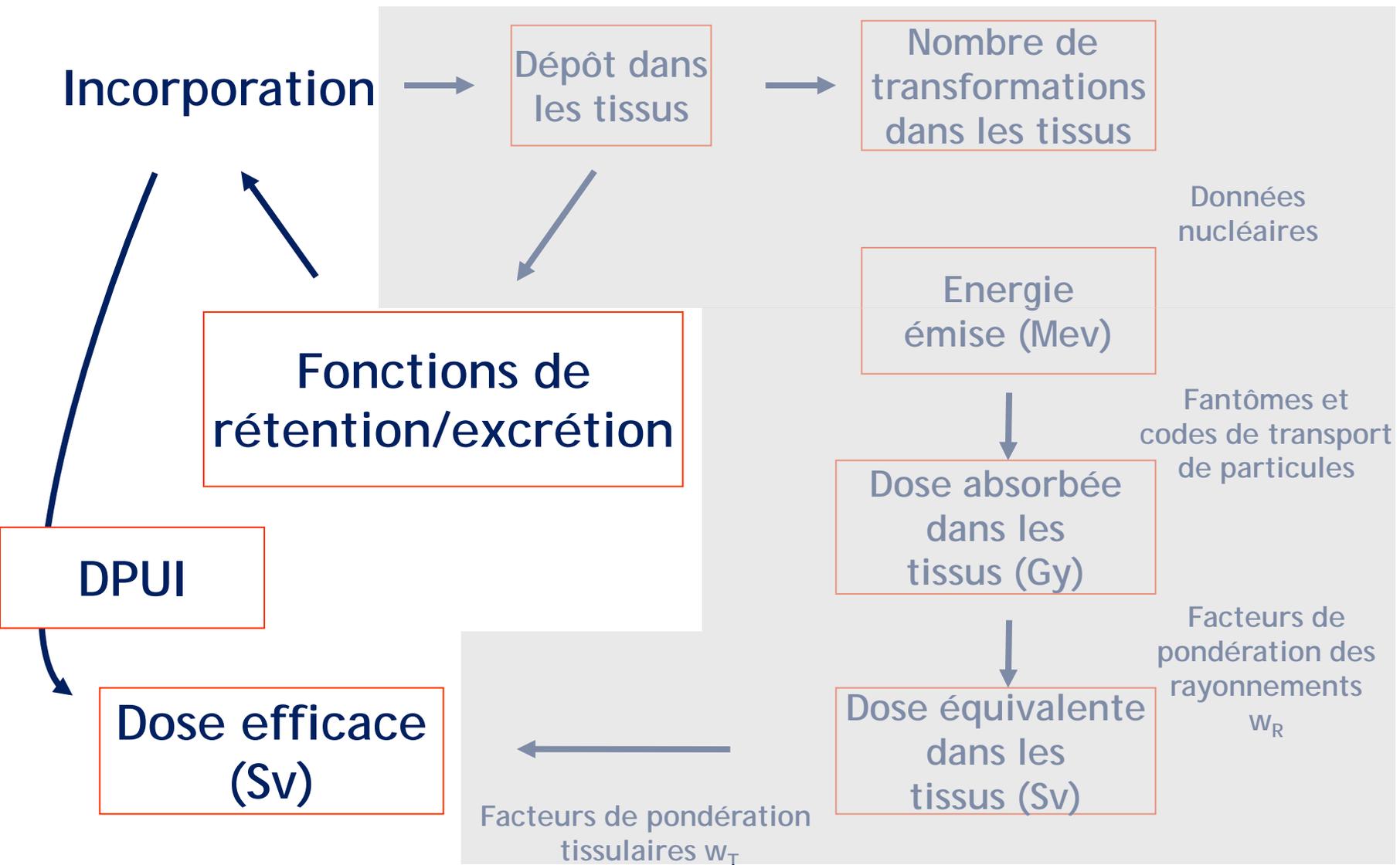
Une simplification nécessaire

Procédure complexe, limitée aux personnes formées

La CIPR a défini des outils et des concepts afin de permettre aux non spécialistes de définir la dose reçue après contamination interne



- Dose par unité d'incorporation (DPUI)
- Fonctions de rétention et d'excrétion



Bq mesurés / 10^{-5} = Bq inhalés

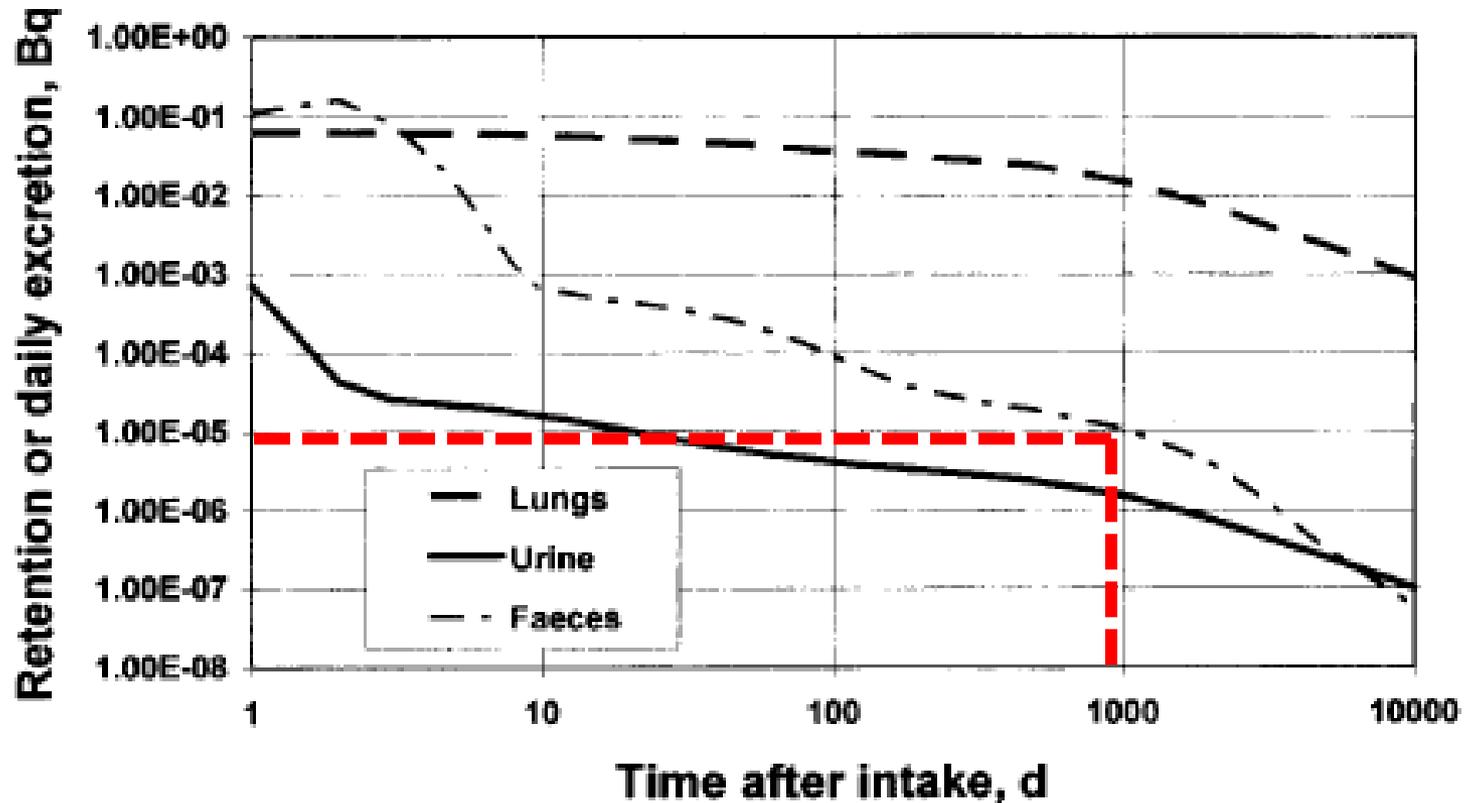


Fig. A.10.3. ^{234}U Inhalation Type S: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

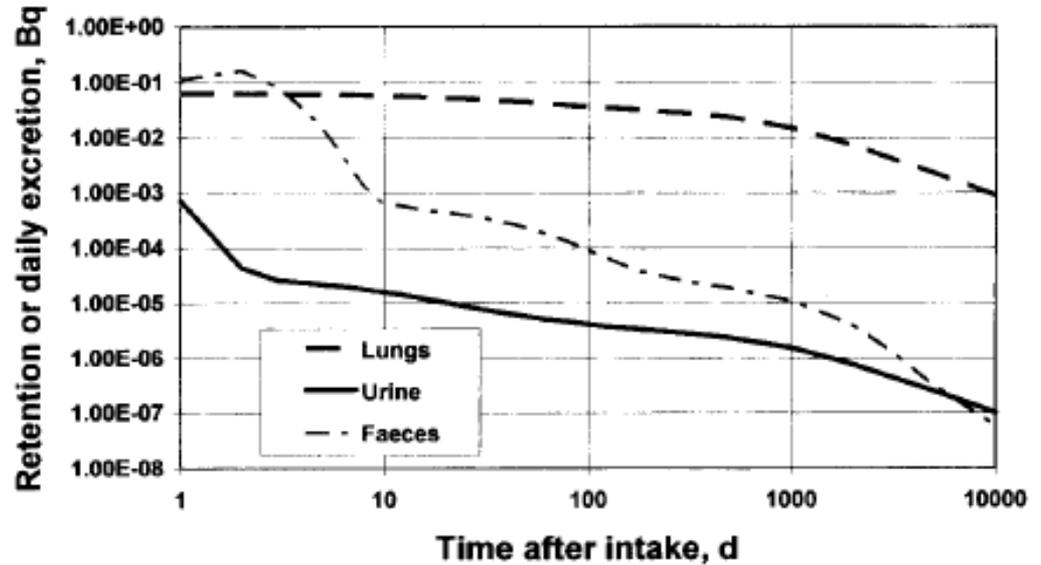


Fig. A.10.3. ²³⁴U Inhalation Type S: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

Type	F	M	S
DPUI μSv/Bq	0.6	2.1	6.8

Pour ²³⁴U

Dose efficace engagée

$$E = e(50) \times I$$

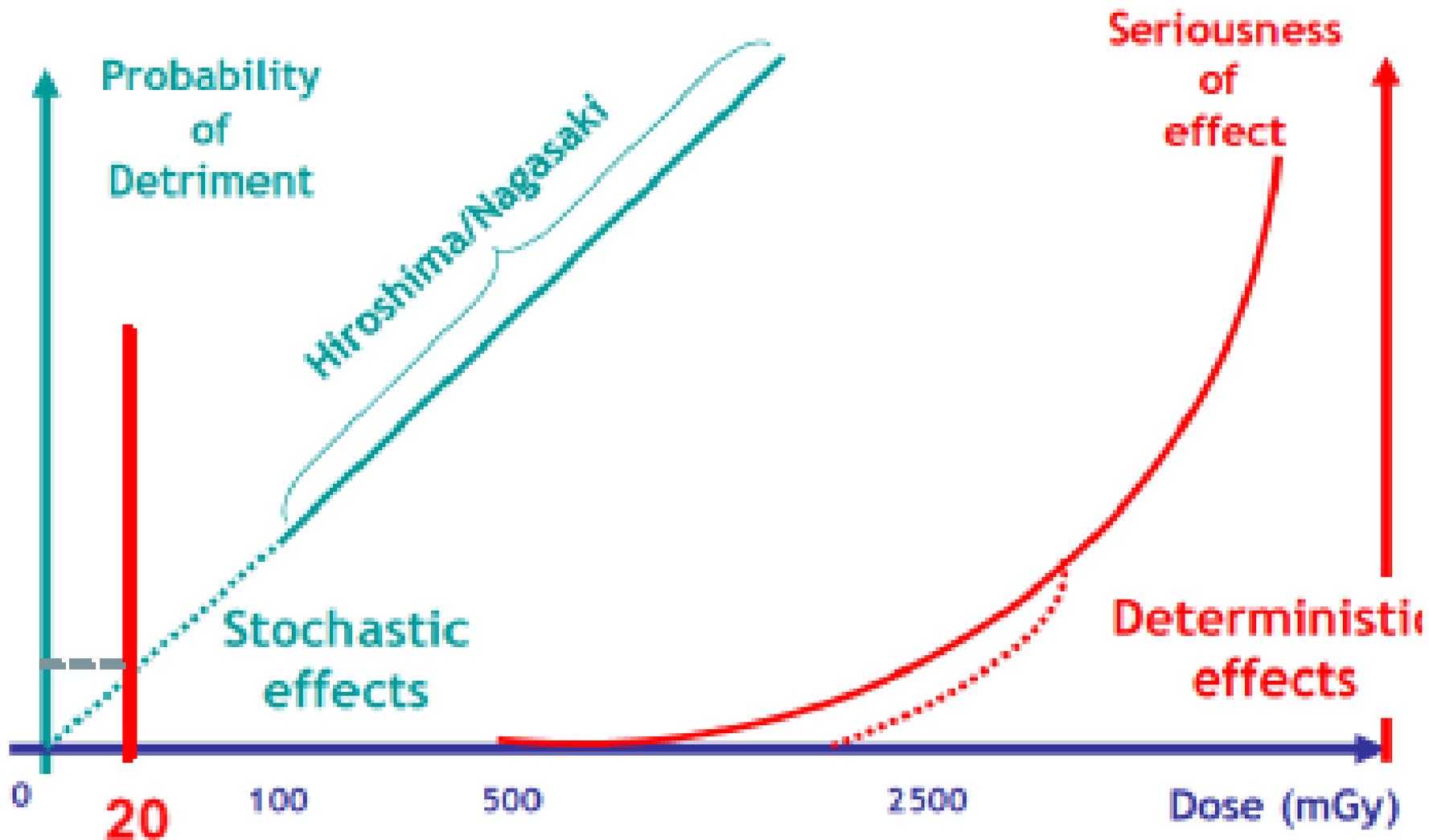
avec $e(50)$ en Sv/Bq

I : Incorporation en Bq

From ICRP 78, 1997

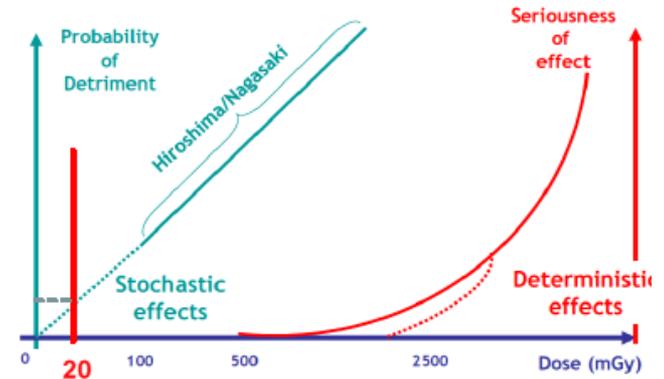
3. Les limites de la dose efficace

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



3.1. Les hypothèses

3.1.1. le domaine d'application



La dose efficace est construite à des fins d'optimisation et de gestion, donc en situation « normale » et donc dans le domaine des faibles doses, en dessous du seuil d'apparition des effets déterministes

Elle ne s'applique donc qu'aux effets stochastiques

3.1. Les hypothèses

3.1.2. *le détriment*

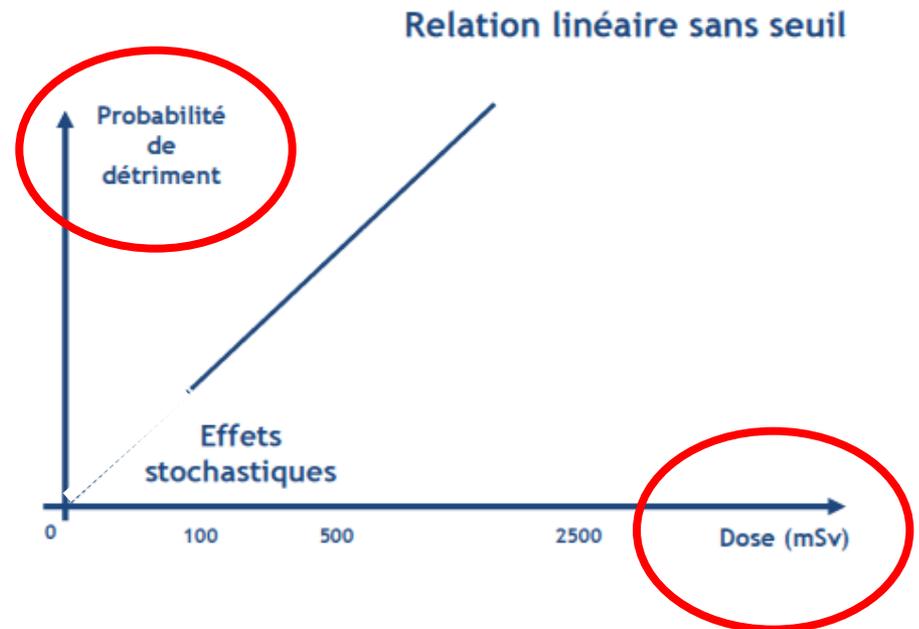
Concept multi-dimensionnel incluant :

- 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

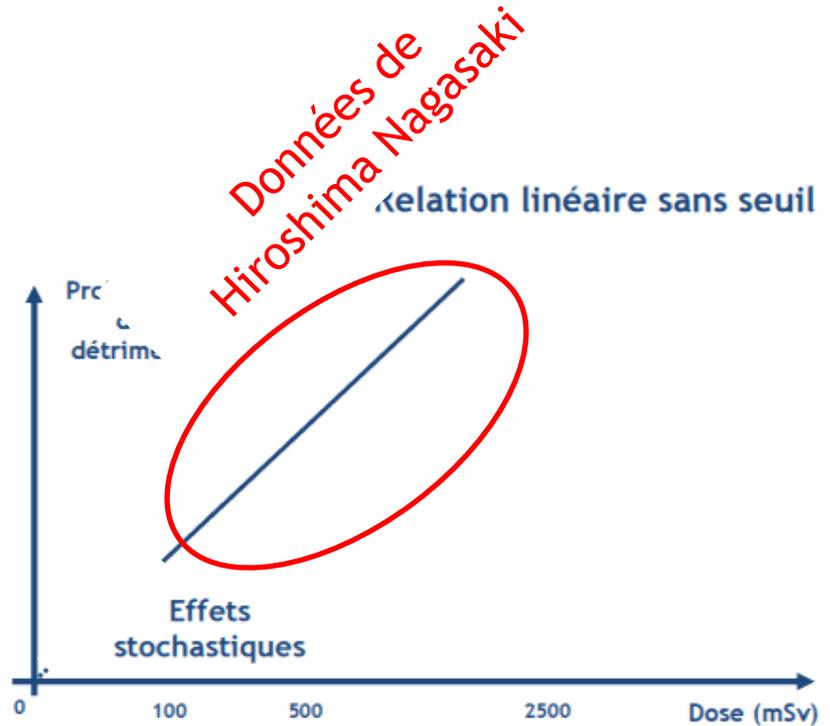
3.1.3. La relation linéaire sans seuil (LNT)



3.1. Les hypothèses

3.1.3. La relation linéaire sans seuil (LSS)

Elle repose sur le détriment observé à HN,

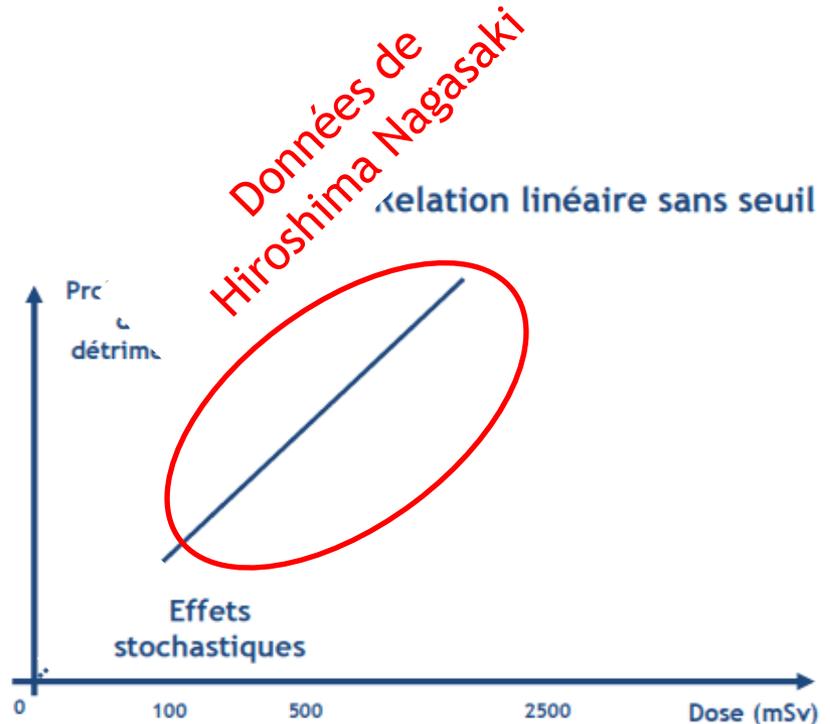


$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

3.1. Les hypothèses

3.1.3. La relation linéaire sans seuil (LSS)

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

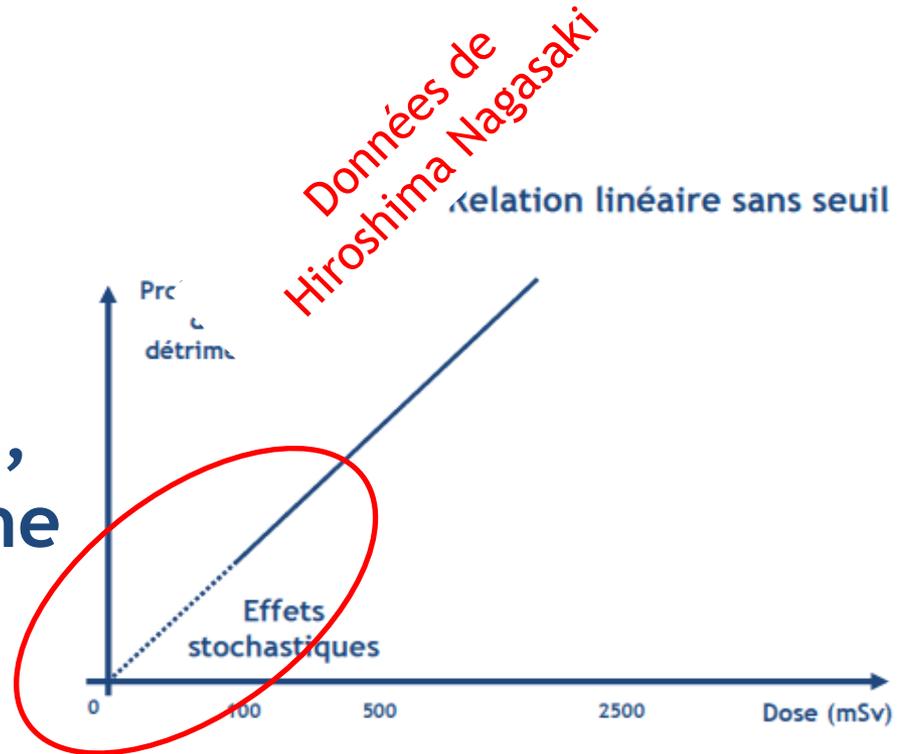


$$E : \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

3.1. Les hypothèses

3.1.3. 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

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

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

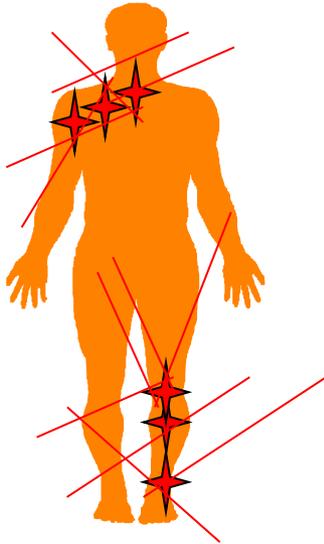
Détriment = $f(\text{dose})$

Dose efficace et LNT sont donc indissociables

3.1. Les hypothèses

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

3.1.4. L'additivité des doses



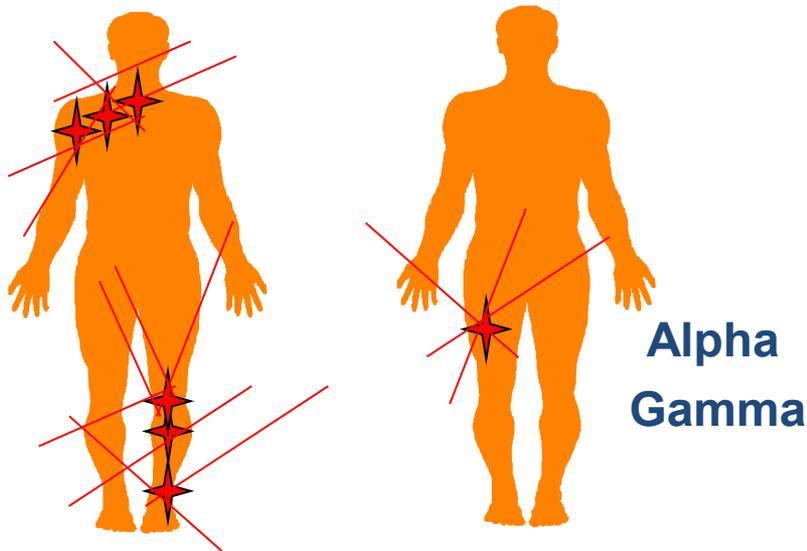
A faibles doses, la dose efficace d'une personne exposée est donnée par la somme pondérée des doses équivalentes des organes isolés

3.1. Les hypothèses

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

3.1.4. L'additivité des doses

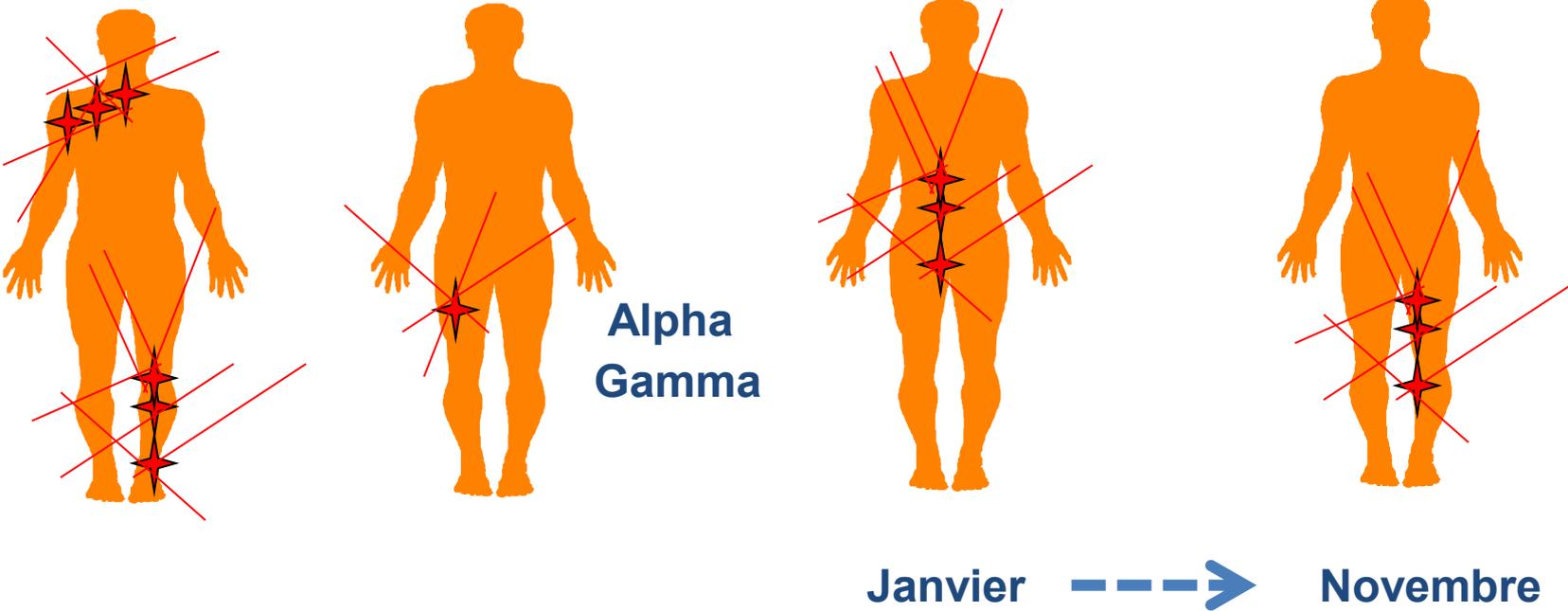
A faibles doses la dose équivalente aux organes est donnée par la somme pondérée des énergies moyennes déposées



3.1. Les hypothèses

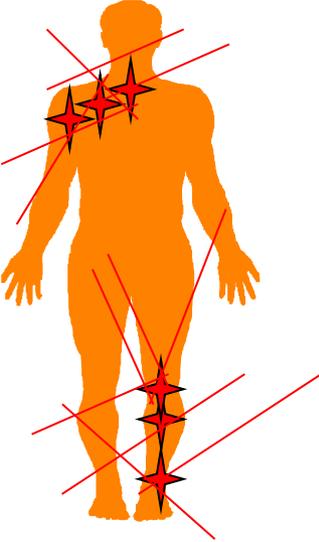
Les doses espacées dans le temps sont additives

3.1.4. L'additivité des doses

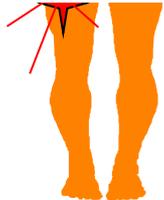


3.1. Les hypothèses

3.1.4. L'additivité des doses



Les doses internes et externes sont additives



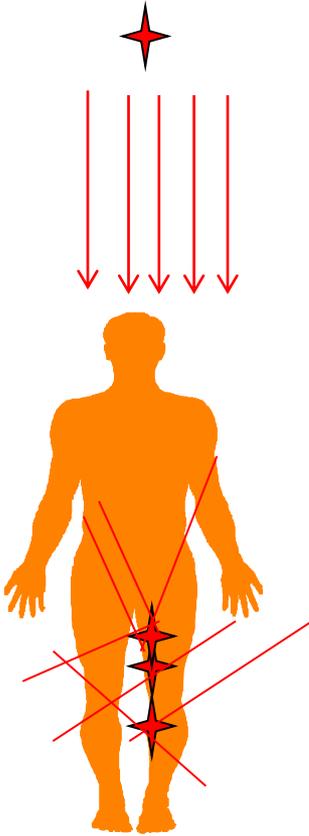
Alpha
Gamma



Janvier



Novembre



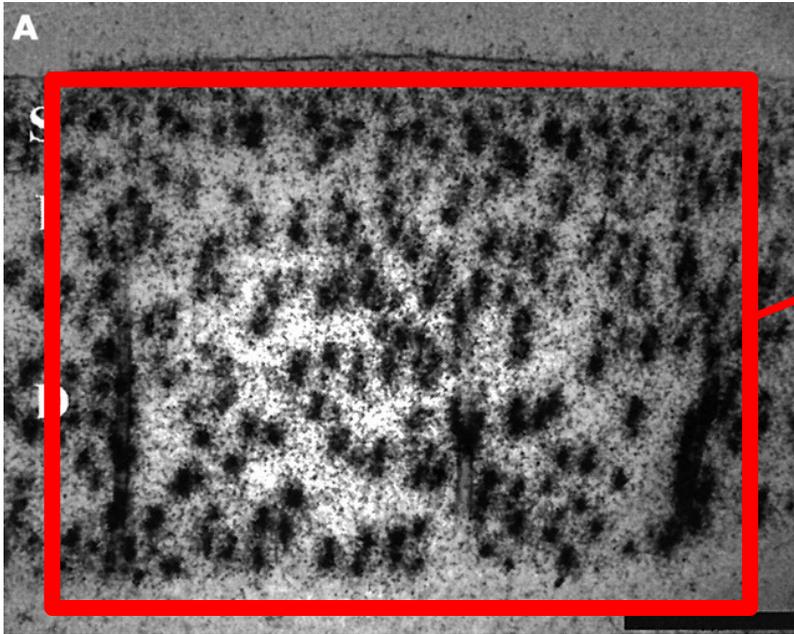
3.2. Les approximations

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

$$D = d\varepsilon / dm$$

N'a de sens que

1/ Si le dépôt d'énergie est homogène



^{35}S dans un cartilage de lapin

Moyenne des dépôts

Pu dans surface osseuse de rat



3.2. Les approximations

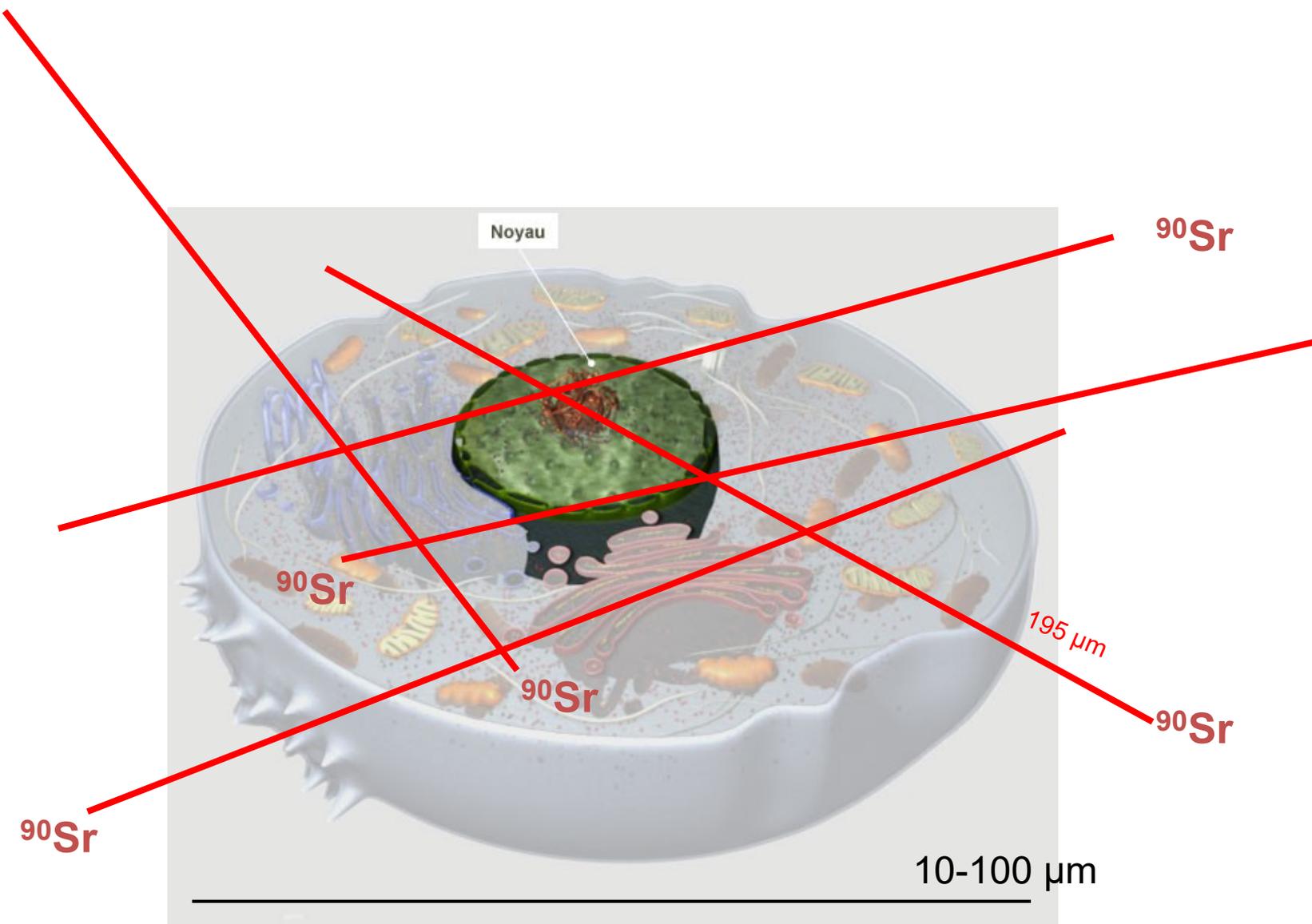
- La dose absorbée est moyennée sur l'ensemble de l'organe (sauf cas particuliers)

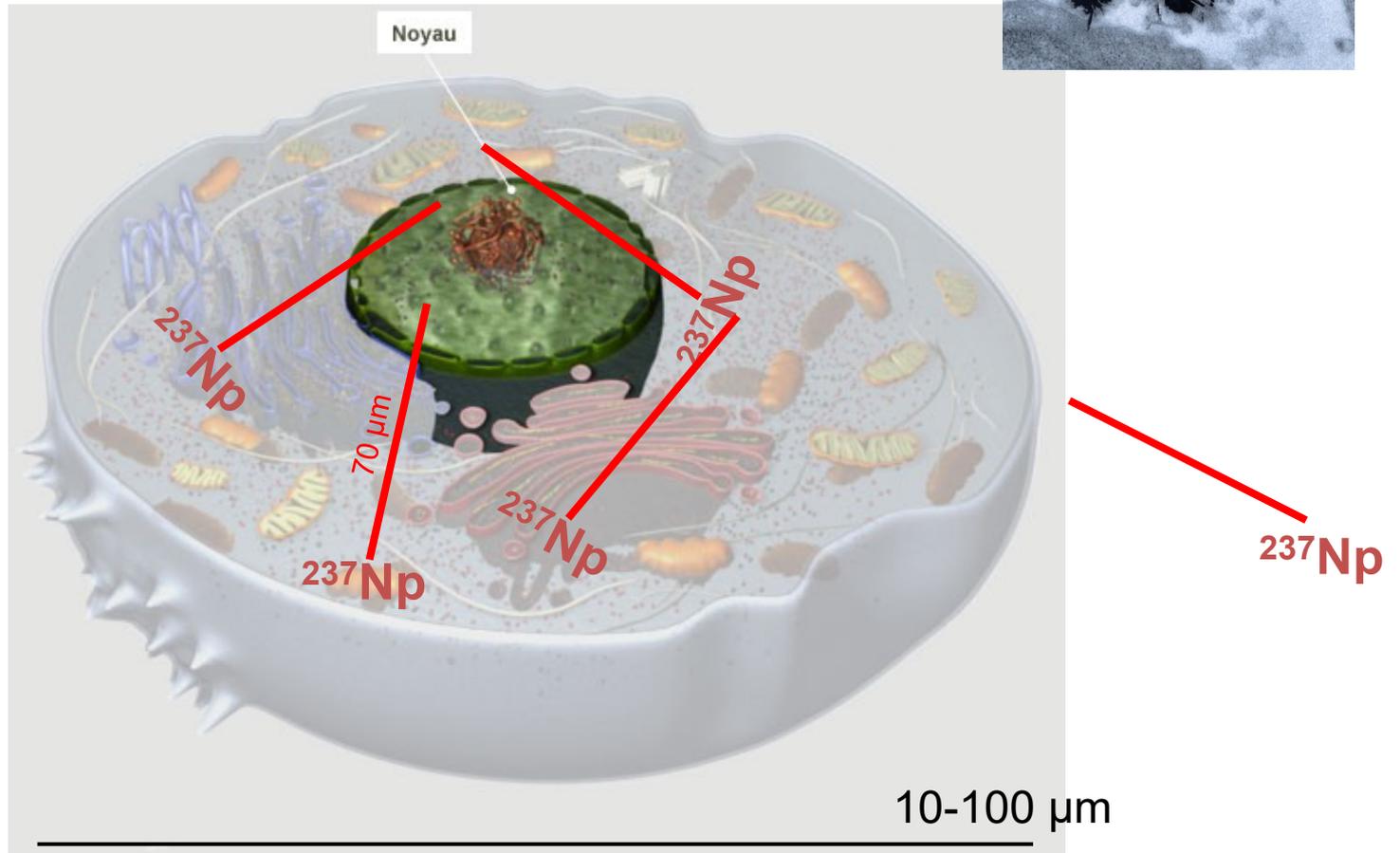
$$D = d\varepsilon / dm$$

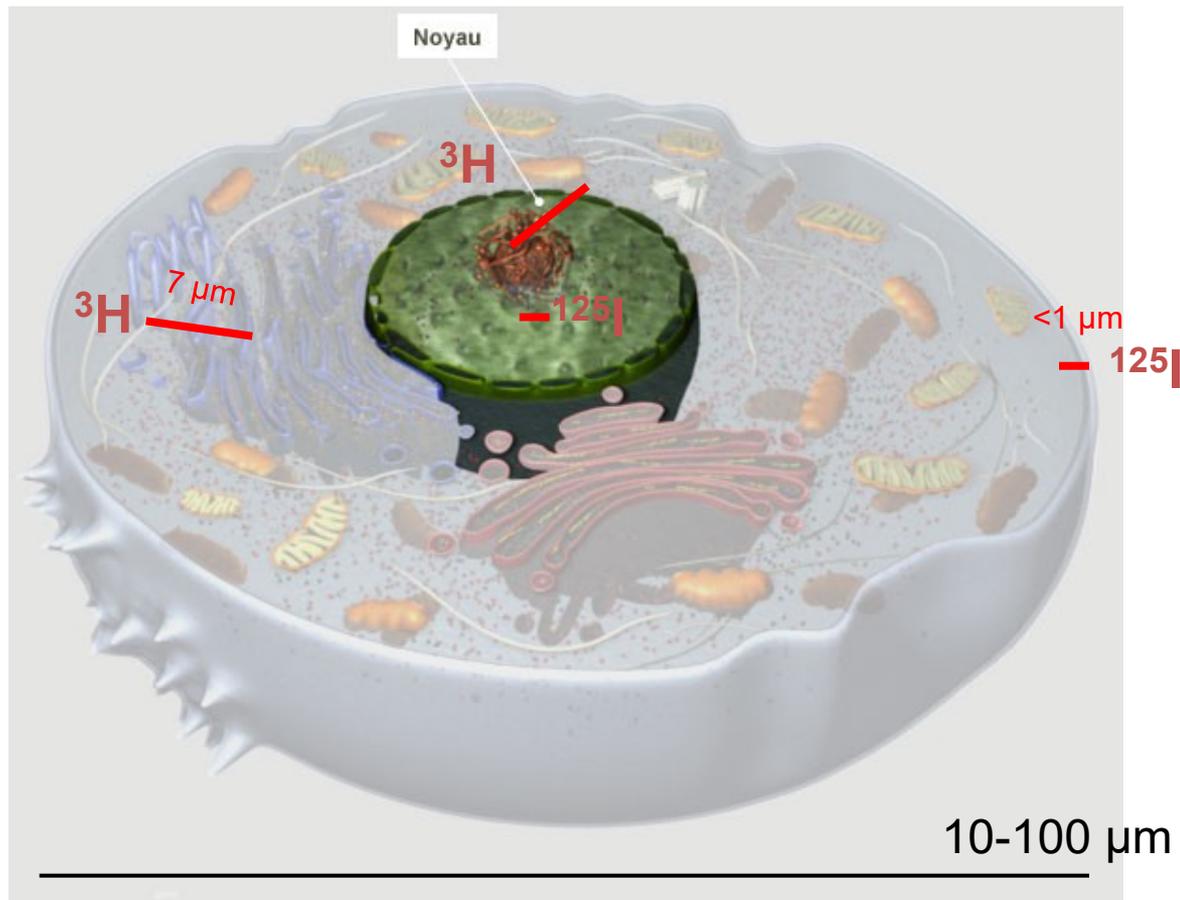
N'a de sens que

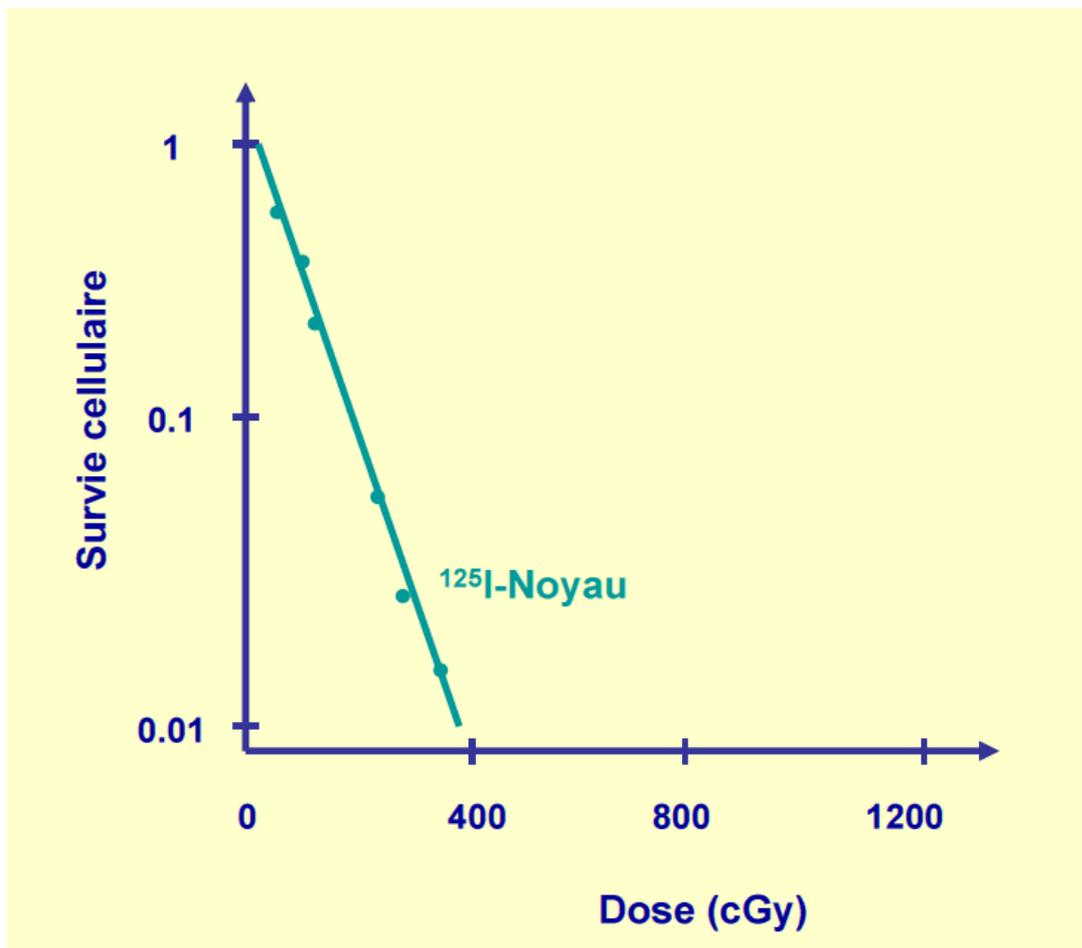
1/ Si le dépôt d'énergie est homogène

2/ Si le dépôt d'énergie est toujours corrélé avec le détriment

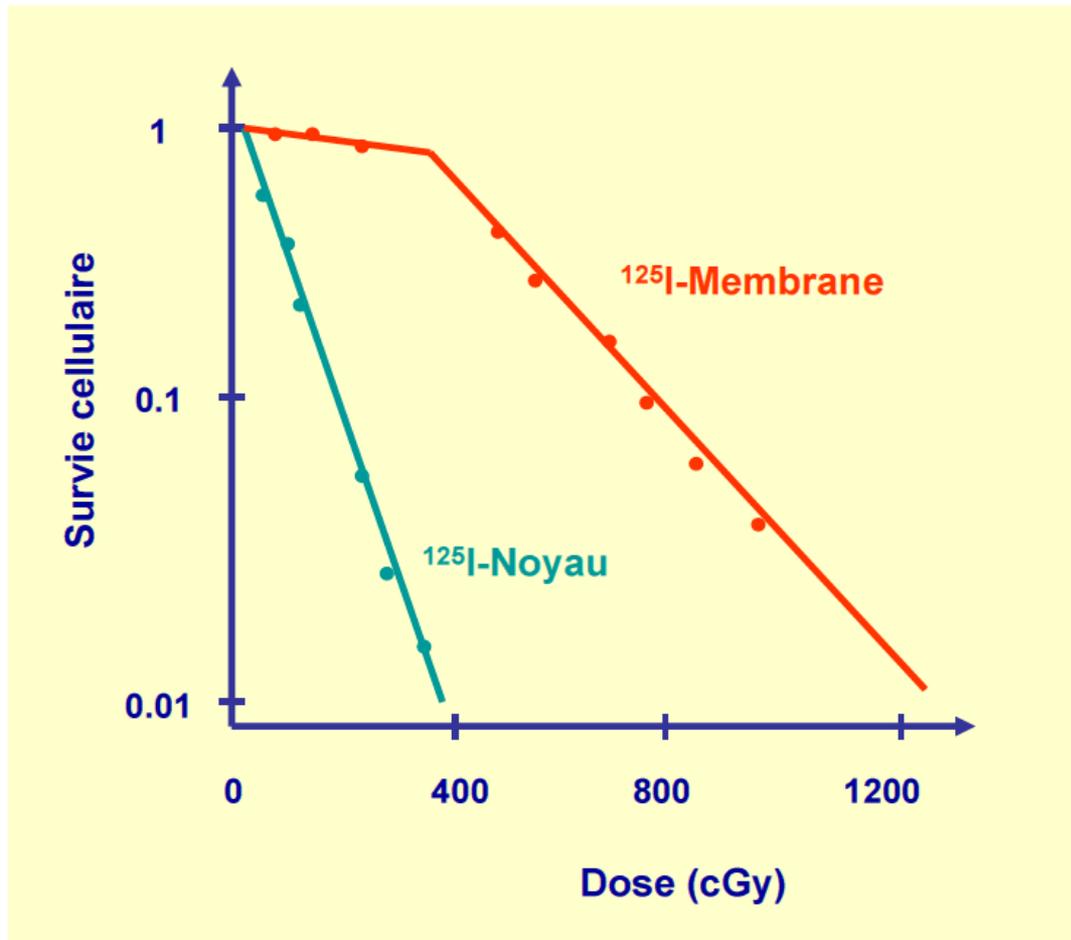




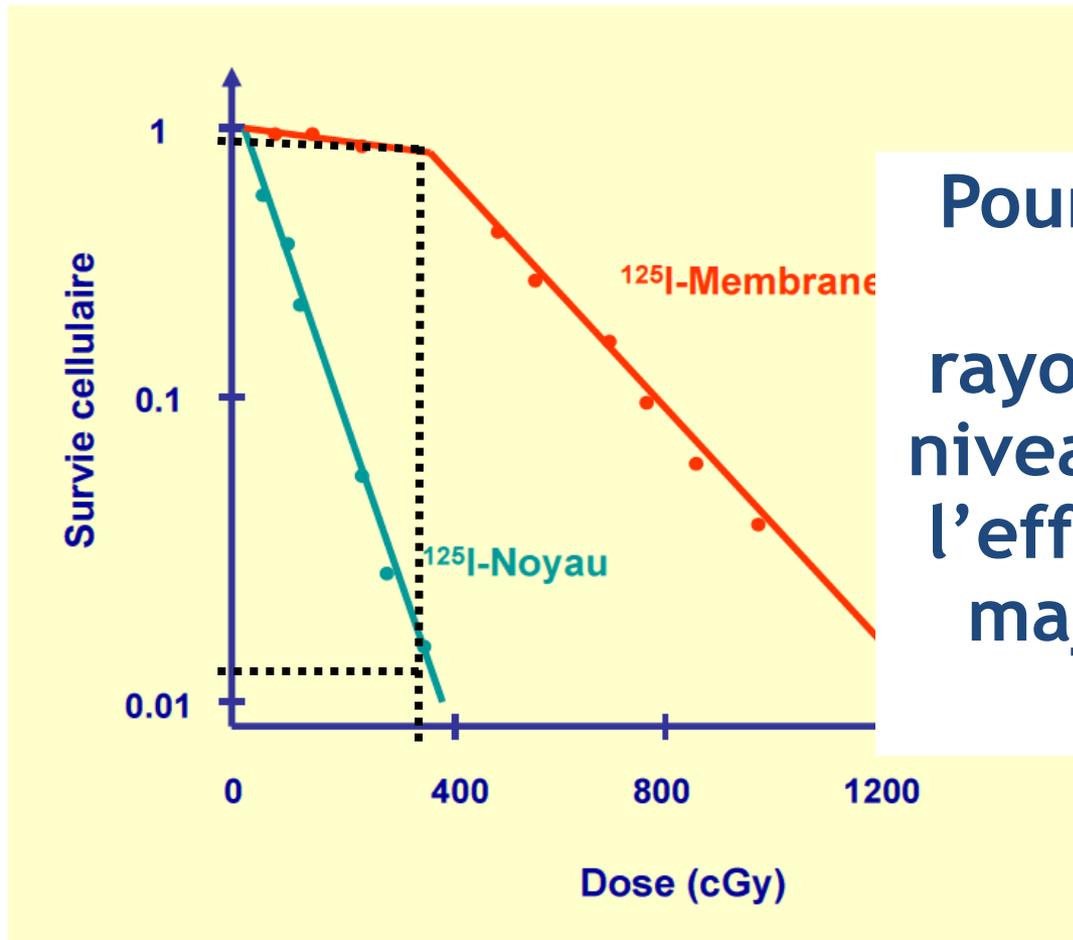




Survie de cellules de hamster chinois en fonction de la localisation de ^{125}I
(redessiné d'après les données de Sastry, 1992)



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

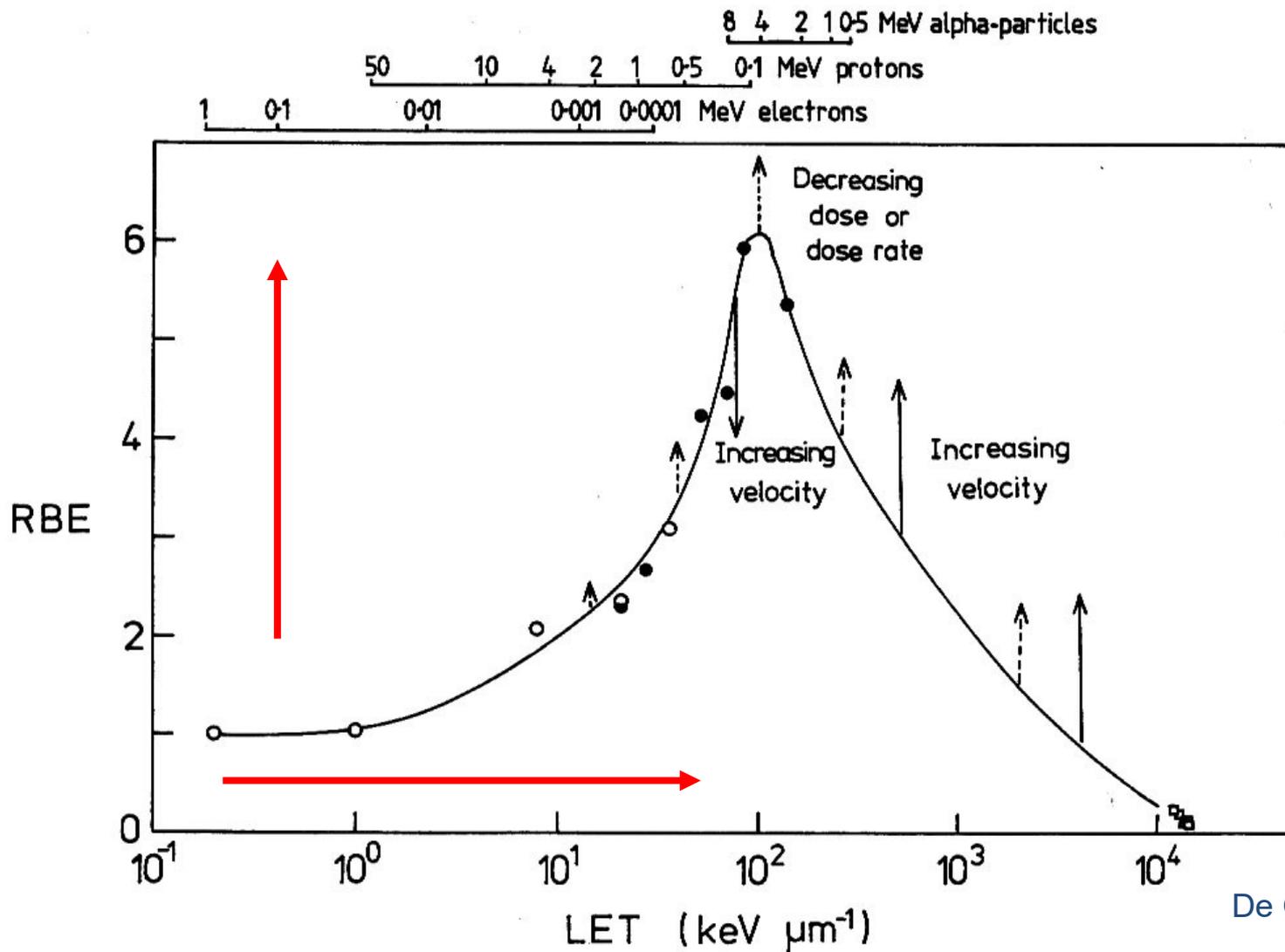
Photons : 1
 Electrons, Muons : 1
 Protons : 2
 Alpha : 20
 Neutrons : Δ

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

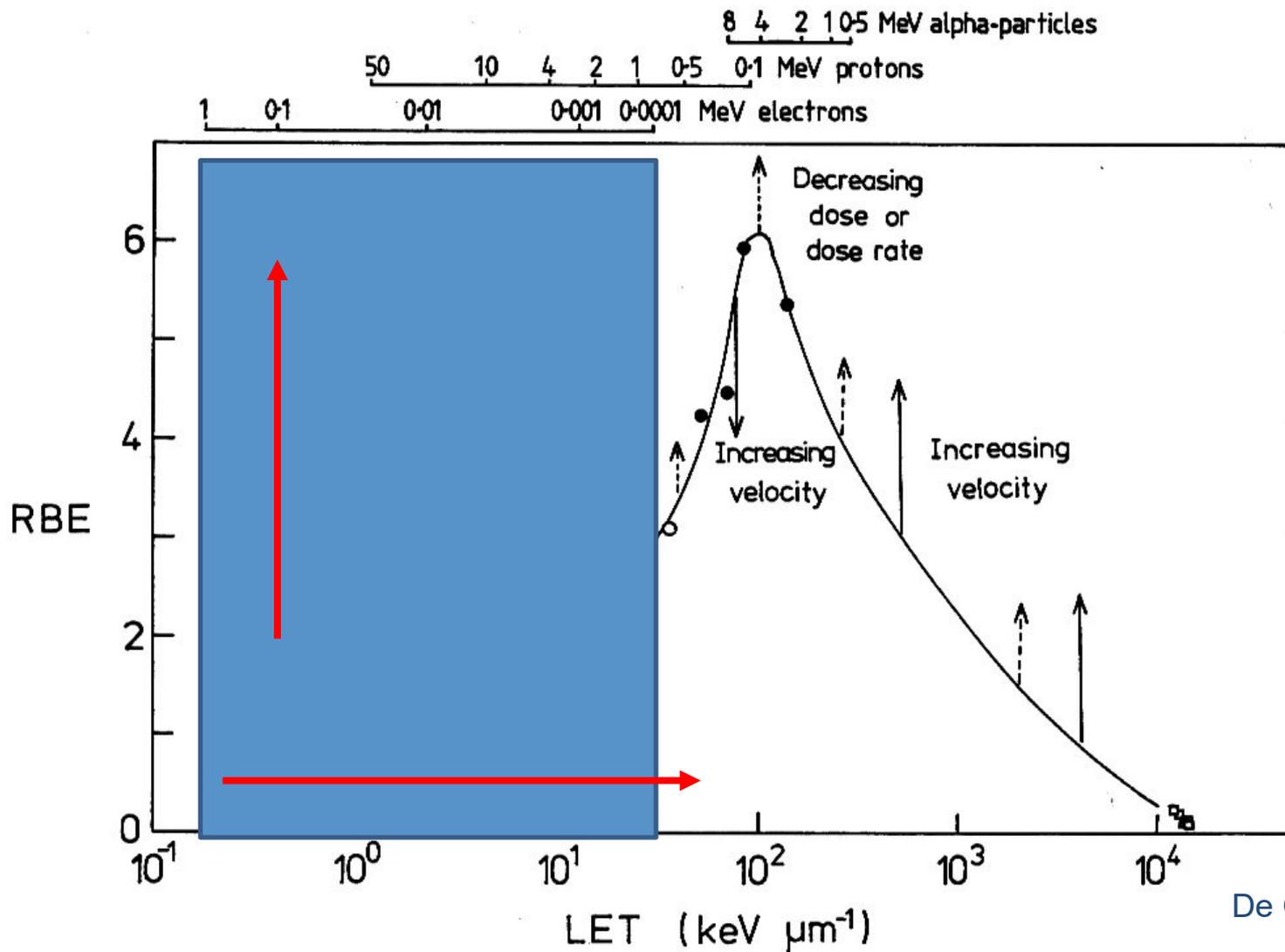
Les EBR dépendent de l'effet recherché, des conditions expérimentales (SPS, dose, débit de dose,..)

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

Elles varient en fonction du TEL des rayonnements

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

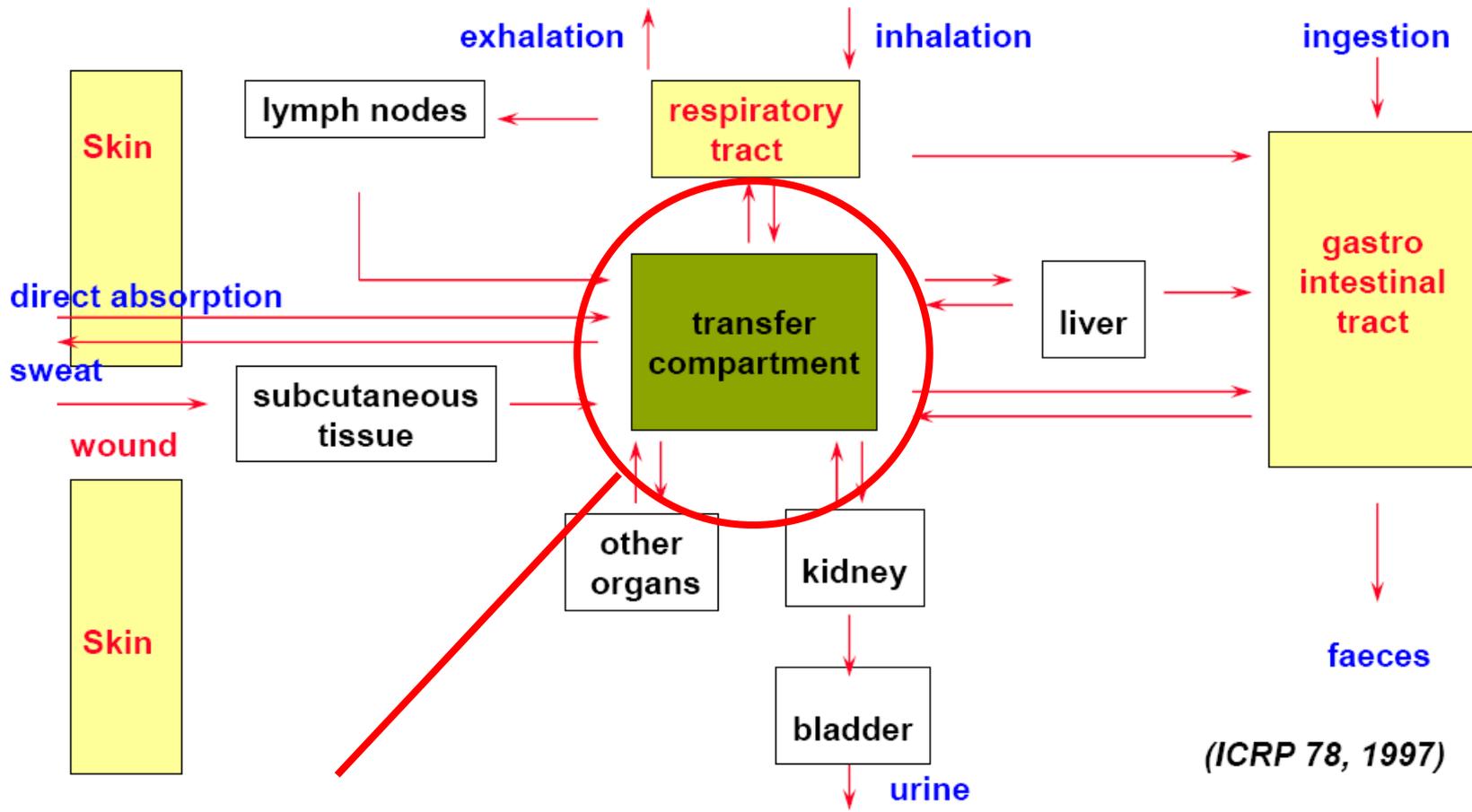


***Représentent des valeurs de gestion
et non des valeurs scientifiques***

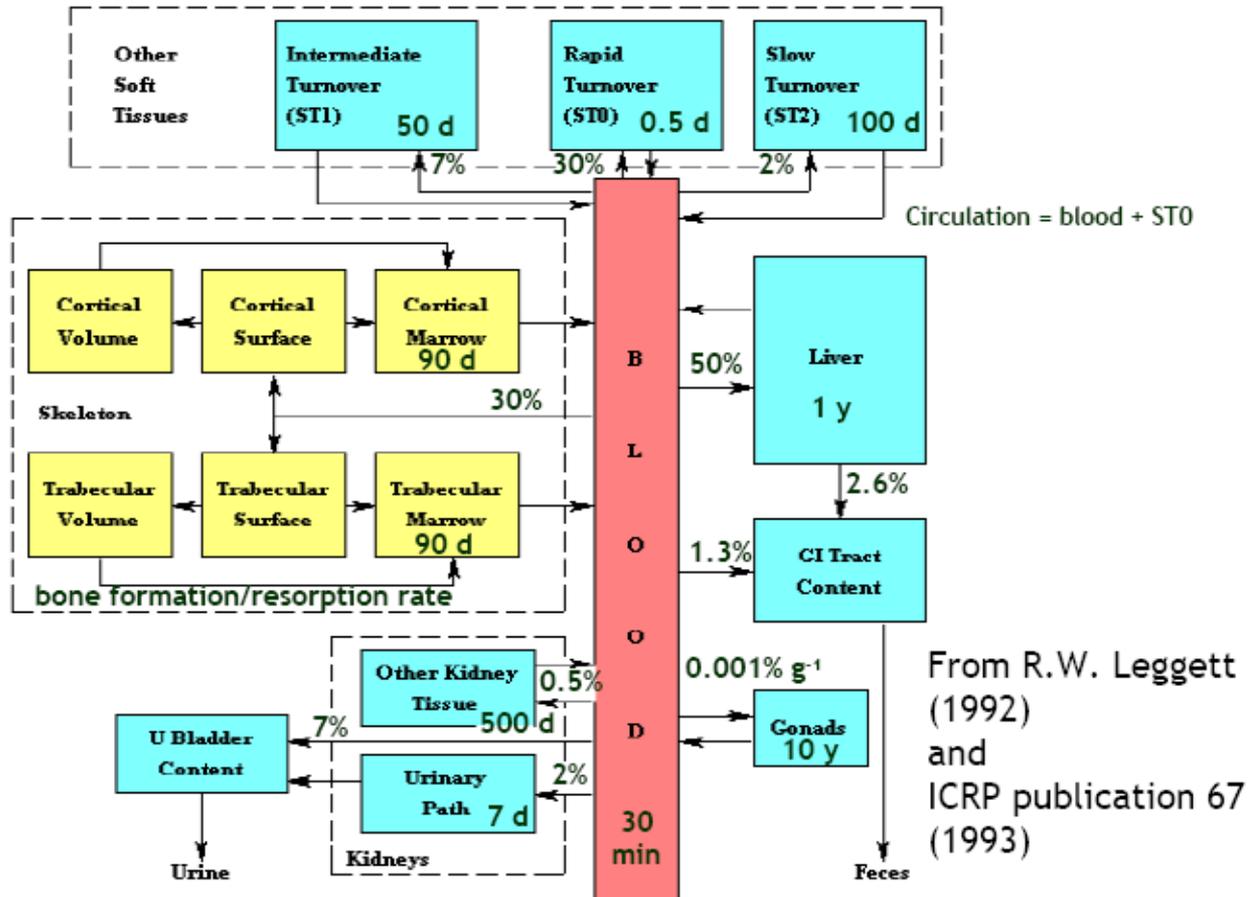
3.3. Les simplifications

- 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

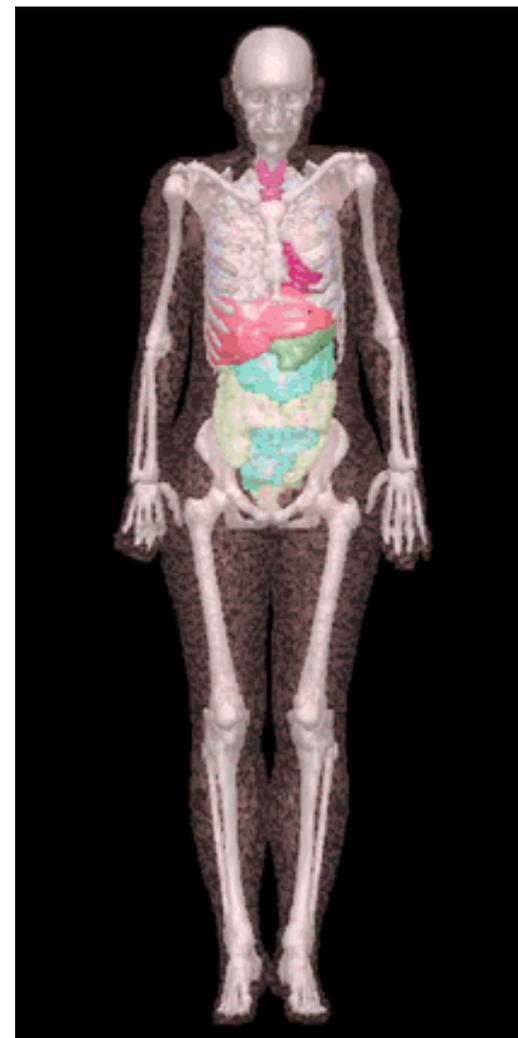
voxel size: 36.5 mm³

Slice thickness: 8 mm

In-plane resolution:

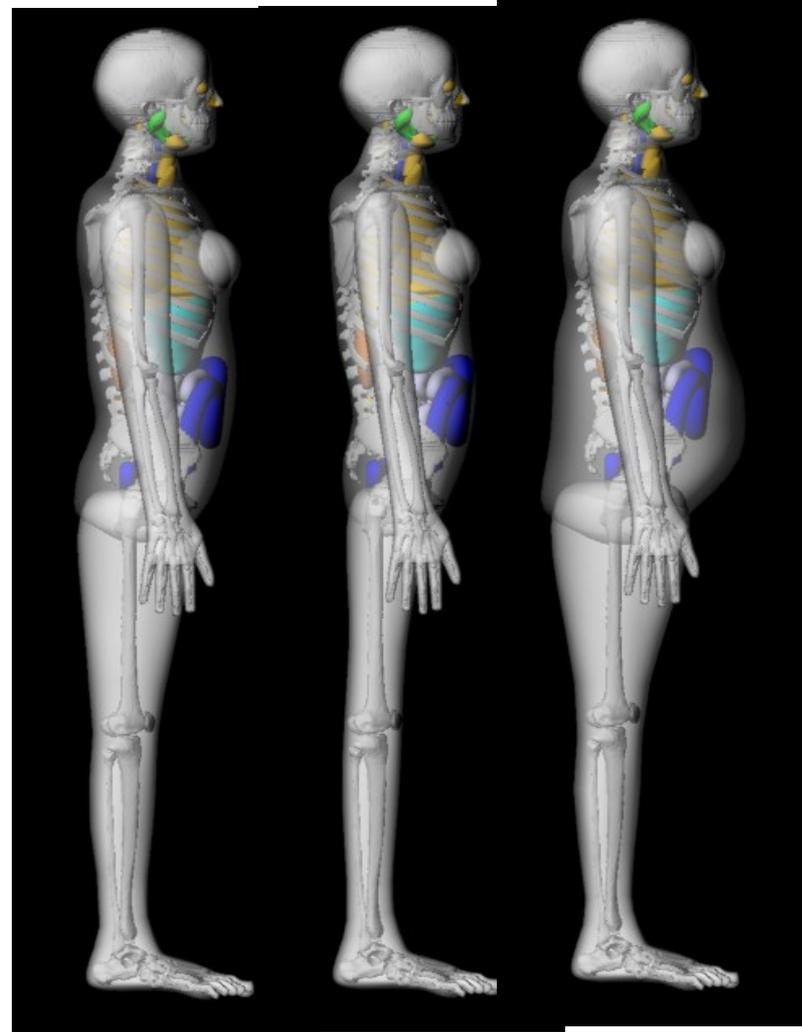
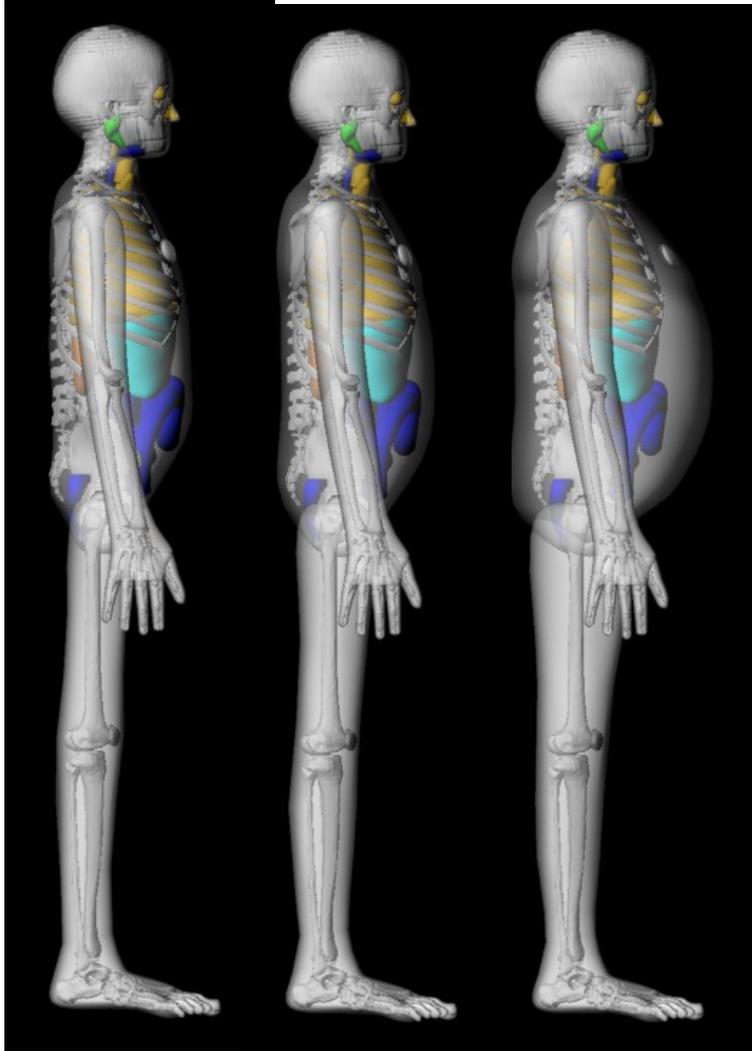
2.137 mm

D'après M. Zankl



2000s

Les fantômes numériques



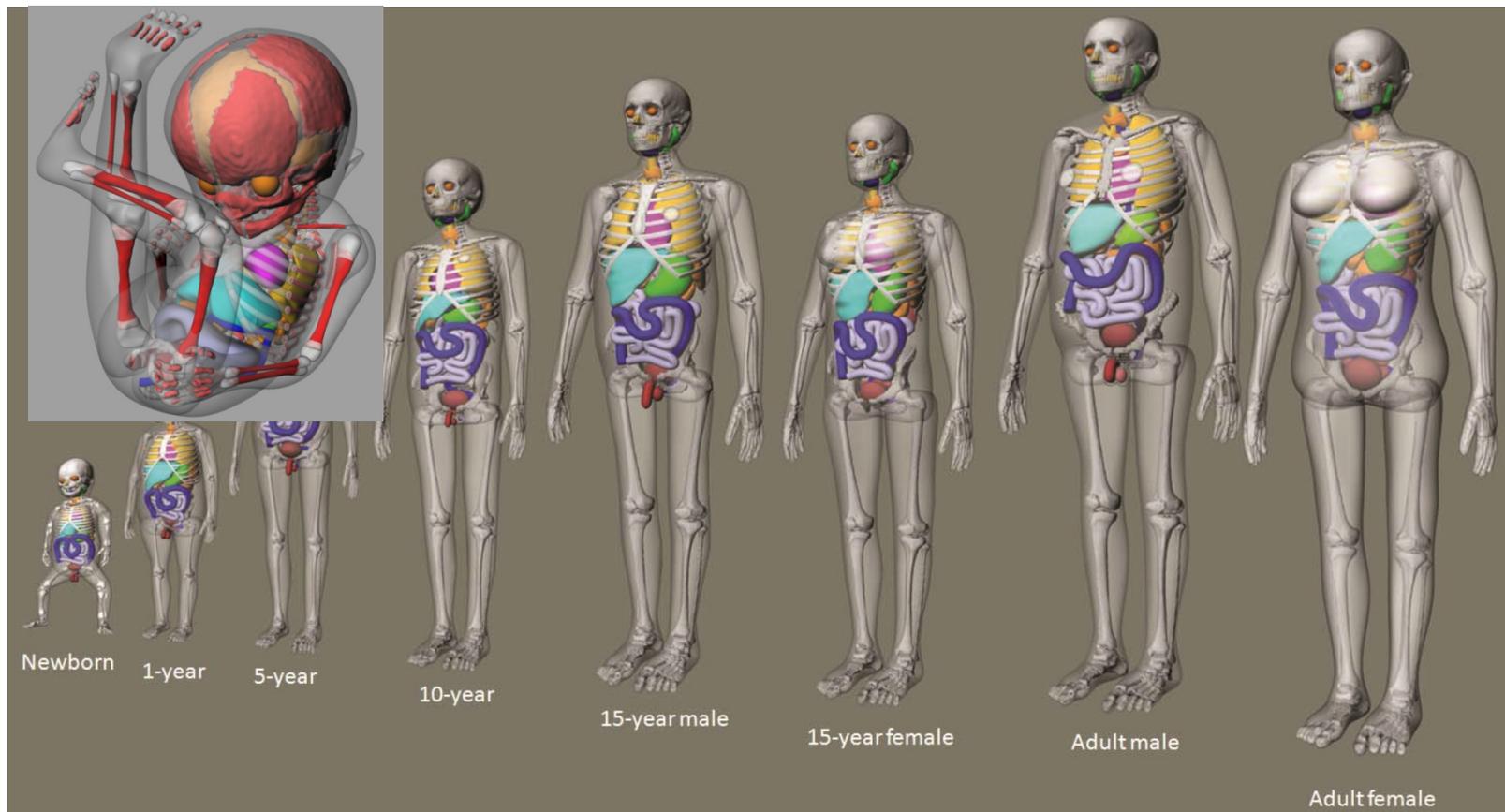
D'après Bolch

2000s Les fantômes numériques



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

2000s Les fantômes numériques

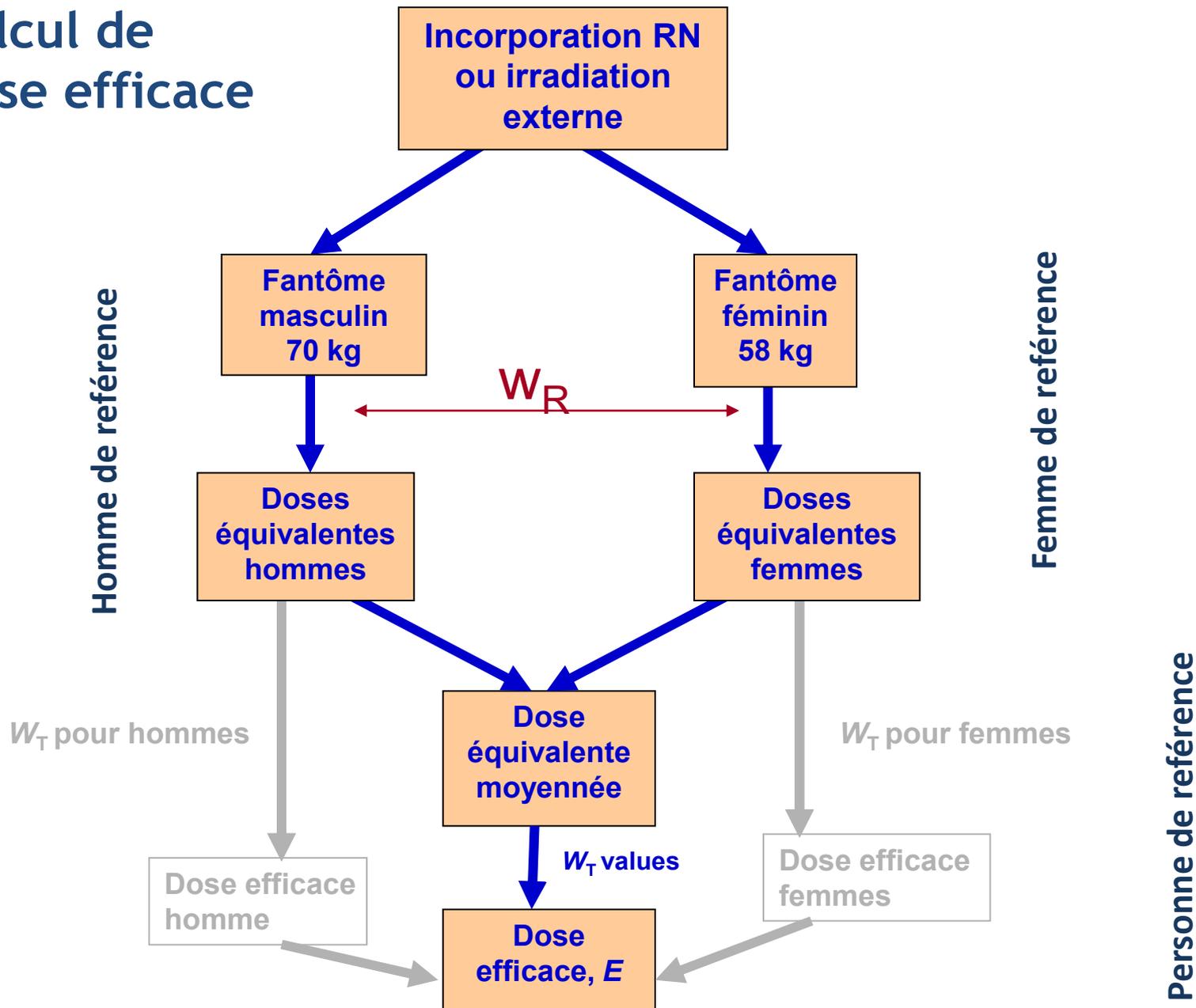


male

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



4. Les fondements et limites de la dose efficace - Bilan-

La dose efficace permet de combiner toutes les expositions et de les exprimer en une seule valeur, comparée à une seule limite

Son utilisation est prévue pour des actions d'optimisation et de limitation

4. Les fondements et limites de la dose efficace

- Bilan-

Cependant

- 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 dans le domaine des faibles doses
- Elle renvoie à une probabilité de détriment (et non d'effet)

4. Les fondements et limites de la dose efficace

- Bilan-

- 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)

Fin

francois.paquet@irsn.fr