

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Le concept de dose efficace

F. Paquet

ICRP C2
IRSN, Direction scientifique

Pourquoi débattre de la dose efficace ?

Grandeur réglementaire

Grandeur pratique et largement utilisée

Grandeur originale issue d'un concept ambitieux

Grandeur très critiquée

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

COMMENTARY

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

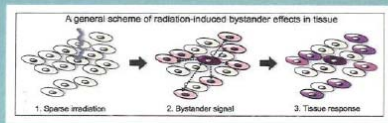
D J BRENNER, PhD, DSc
Center for Radiological Research,
Columbia University Medical Center, New York

Radiological Protection
2007



Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection

Report of the Expert Group on
the Implications of Radiological
Protection Science



NUCLEAR • ENERGY • AGENCY

Pourquoi débattre de la dose efficace ?

Grandeur réglementaire

Grandeur pratique et largement utilisée

Grandeur originale issue d'un concept ambitieux

Grandeur très critiquée

Grandeur (très) souvent utilisée de façon abusive

La dose efficace en quelques clics..

Pour la CIPR,

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

La dose efficace en quelques clics..

Pour les mathématiciens,

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

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

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

La dose efficace en quelques clics..

Pour tous les autres,

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

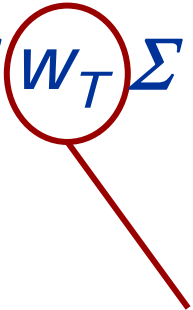
En joule par Kg, Sievert (Sv)



Energie physique déposée dans les tissus

La dose efficace en quelques clics..

Pour tous les autres,

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R} \quad \text{En joule par Kg, Sievert (Sv)}$$


Tient compte de la sensibilité relative
des différents tissus

La dose efficace en quelques clics..

Pour tous les autres,

$$E : \sum W_T \sum W_R D_{T,R} \quad \text{En joule par Kg, Sievert (Sv)}$$

Tient compte de la toxicité relative des différents rayonnements

W_R

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

La dose efficace en quelques clics..

En résumé,

Grandeur complexe, multidimensionnelle, intégrant

- l'énergie moyenne déposée,
- l'EBR des rayonnements
- la contribution de chaque tissu au détriment total

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

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

Concept d'organe critique

Concept de dose admissible

*Limites rapportées à des durées courtes d'exposition
en raison de la faculté des tissus à réparer les lésions*

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

<i>ICRP, 1928</i>	Durées limites d'exposition aux rayons X
<i>ICRP, 1934</i>	0.2 Röntgen /jour pour exposition externe
<i>ICRP, 1937</i>	1 Röntgen/semaine pour exposition externe

ICRP, 1950

- Limites de dose externe 0.3 Röntgen/semaine
- Röntgen pas adapté à l'ensemble des radiations ionisantes
- Notion d'énergie absorbée équivalente, couplée avec EBR
- Effets plus importants sur les organes hématopoiétiques
- Rien en contamination interne

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

ICRP, 1955

Introduction de deux concepts de dose absorbée

- 1. Energie absorbée par masse de matière en Rads (ICRU, 1953)*
- 2. Dose absorbée qui provoquerait dommages similaires à ceux produits par 1 Rad de rayons X de 200 kv (en Rems)*

$$\text{Dose (Rem)} = \text{Dose (Rad)} \times \text{EBR}$$

Calculée pour un homme de référence

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

ICRP, 1955 (suite)

Limites de doses

Externes

- Abandon du Röntgen pour le Rem
- Dose vie pour corps entier 750 rems/ 50 ans : 0,3 rem/semaine
- Organes hématopoiétiques, gonades, cristallin : 0,3 rem/semaine
- Peau : 0,6 rem / semaine

Internes

- Concentrations limites corporelles de RN (basées sur 0,3 rem/semaine)
- Concentrations limites dans eau et air (basées sur 0,3 rem/semaine)

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

ICRP 2, 1959

Questionnement opportunité dose vie

Trois groupes d'organes et tissus

Organes hématopoiétiques, gonades, cristallin

$D < 3 \text{ rems} / 13 \text{ sem}$ et $D = 5(\text{Age}-18)$

Thyroïde et peau

$D < 8 \text{ rems} / 13 \text{ sem}$

Autres organes

$D < 4 \text{ rems} / 13 \text{ sem}$

Grands débats sur sensibilité de chacun des tissus et sur irradiation hétérogène

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

ICRP 6, 1962

- Adoption, par précaution d'une relation linéaire sans seuil entre dose et leucémie ou cancer osseux



« Dose permises » devront donc limiter (et non plus prévenir) les effets

- Adoption dose annuelle et dose court terme (13 semaines)
- Doses public différentes de doses travailleurs

1. Les origines de la dose efficace

Les débuts de la radioprotection

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

- Relation linéaire entre dose et certains cancers
- Effets différentiels selon type de rayonnements
- Sensibilité 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

Les débuts de la radioprotection

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

Limitation des effets critiques par limitation des doses

- Dose absorbée en Rads
- Dose absorbée en Rems

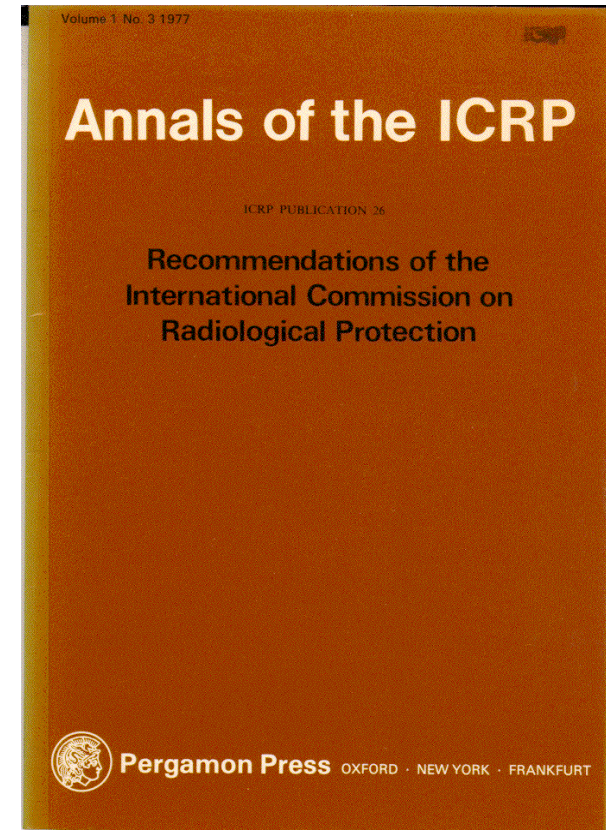
Souhait de disposer d'une grandeur unique, intégrant l'ensemble des détriments

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

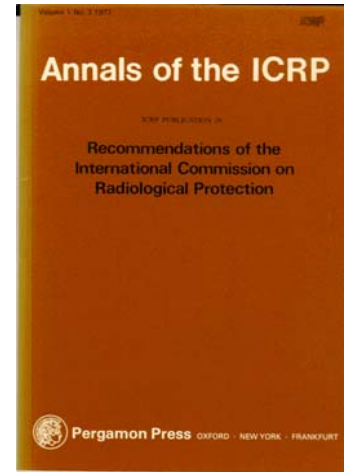
Renforcement des notions de réduction et limitation des doses

1. Aucune pratique ne doit être adoptée à moins qu'elle ne produise un bénéfice net
2. ALARA « As Low as Reasonably Achievable »
3. Doses aux individus doivent rester en dessous de limites



1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)



La dose absorbée : un concept réaffirmé (et modifié)

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

*dE est l'énergie moyenne transmise par le rayonnement
dm est la masse de matière dans cet élément de volume*

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

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

La dose absorbée

- Sert à mesurer la « quantité » de rayonnement ionisant
- Grandeur « macroscopique »
- Insuffisante pour prédire la sévérité ou la probabilité d'effets délétères

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

La dose équivalente (une nouvelle grandeur)

$$H = DQN \quad \text{en Joules/kg soit en Sv (100 rems)}$$

D est la dose absorbée

Q facteur de qualité. Prend en compte la distribution microscopique de l'énergie. Valeurs discrètes entre 1 et 20 en fonction du pouvoir d'arrêt des collisions dans l'eau (keV/μm)

N Produit de tous les facteurs modifiants (débit de dose, fractionnement)

N=1 dans ICRP 26

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

Grandeurs dérivées

- *Dose équivalente collective*
- *Dose équivalente engagée (50 ans)*

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

Limites de doses

1. Basées sur la prévention des effets déterministes

300 mSv pour le cristallin

500 mSv pour tous les autres tissus

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

Limites de doses

2. Basées sur la réduction des effets stochastiques (LNT)

Abandon de la notion d'organe critique car souhait d'exprimer une dose limite basée sur le risque total de tous les tissus irradiés

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

Limites de doses

2. Basées sur la réduction des effets stochastiques (LNT)

Introduction d'une nouvelle grandeur telle que

$$\sum_T w_T H_T \leq H_{wb,L}$$

w_T : facteur de pondération tissulaire

H_T : dose équivalente annuelle dans tissus

$H_{wb,L}$: dose équivalente annuelle limite du corps entier irradié de façon uniforme

1. Les origines de la dose efficace

ICRP 26 (1977)

Limites de doses

2. Basées sur la réduction des effets stochastiques (LNT)

Cette nouvelle grandeur sera appelée **dose équivalente efficace** (H_E) dans la CIPR 28 (1978)

Avec limite de $H_E = 50$ mSv par an.

2. La dose efficace aujourd'hui

ICRP 60 (1991)

CIPR remplace dose équivalente efficace H_E par dose efficace E

- Pas de changement conceptuel
- Facteurs de qualité remplacés par facteur de pondération des rayts
- Nombre de tissus pris en compte augmente. Certains facteurs w_T changés

2. La dose efficace aujourd'hui

ICRP 103 (2007)

Pas de modification majeure

- Changement de certaines valeurs des facteurs de pondération w_R et w_T
- Adoption des fantômes de référence
- Réaffirmation de la nécessité de donner une E moyennée selon les sexes
- Clarifications sur l'utilisation de la dose efficace

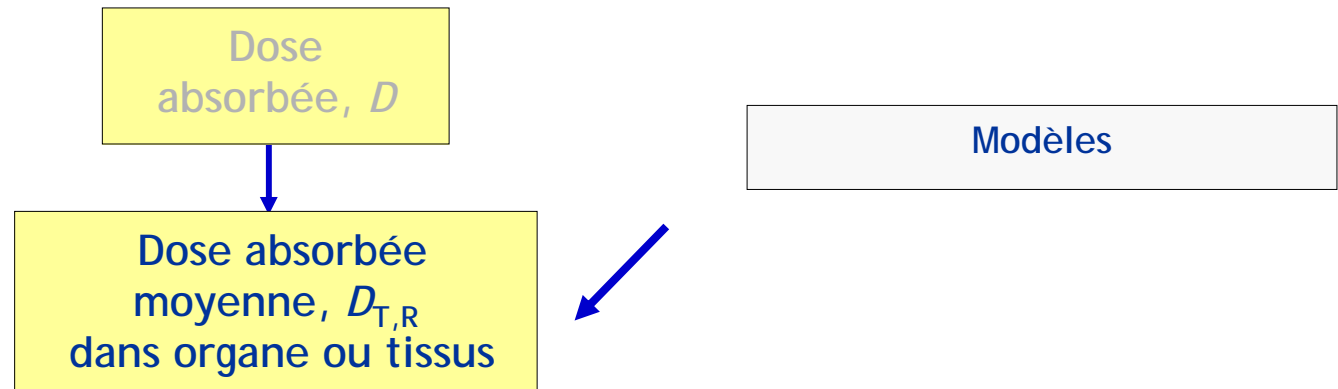
3. La détermination de la dose efficace

Dose
absorbée, D

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

- Energie communiquée en un point par unité de masse du milieu
- Est mesurée (calorimètre, dosimètre chimique, chambre d'ionisation,..) ou calculée

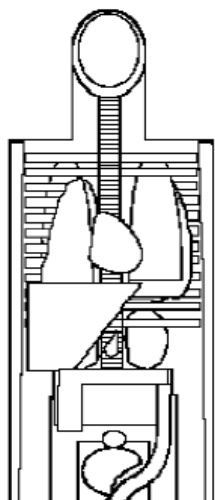
3. La détermination de la dose efficace



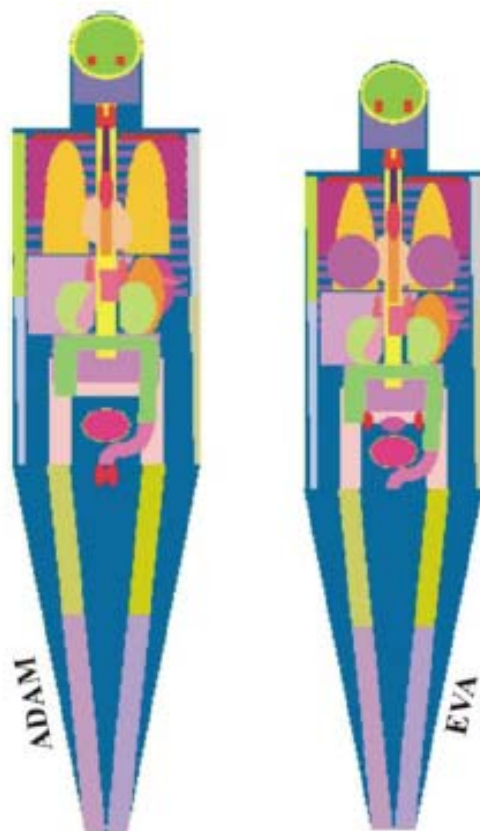
- Energie totale transmise à un tissu ou organe par masse de ce tissu ou organe
- N'a de sens que pour les effets stochastiques
- Nécessite l'utilisation de fantômes pour le calcul des énergies
 - déposées dans les cibles (irradiation externe + contamination interne)
 - émises par les sources (contamination interne)

3. La détermination de la dose efficace

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

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

and the volume is 1,470 cm³ (Fig. 4).

Fantomes MIRD5 ou ADAM et EVA

3. La détermination de la dose efficace

1970 s Les fantômes mathématiques

Problèmes de représentativité, qui génère des erreurs dans calcul dose

Dosimétrie externe

- Profondeur des organes par rapport à la surface corporelle
- Forme et diamètre du tronc

Dosimétrie interne

- Position respective des sources et cibles (S et T)
- Masse des organes

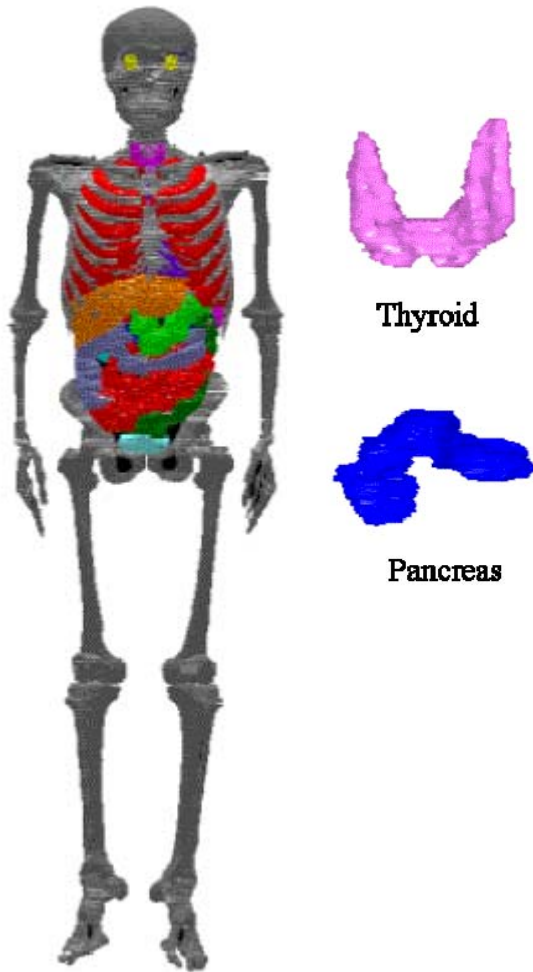
3. La détermination de la dose efficace

1988 Les fantômes voxélisés

Basés sur images IRM de personnes réelles



3. La détermination de la dose efficace



Thyroid

Pancreas

Ex. du fantôme GOLEM

Processus de segmentation resulte en un modèle voxélisé avec environ 122 organes.

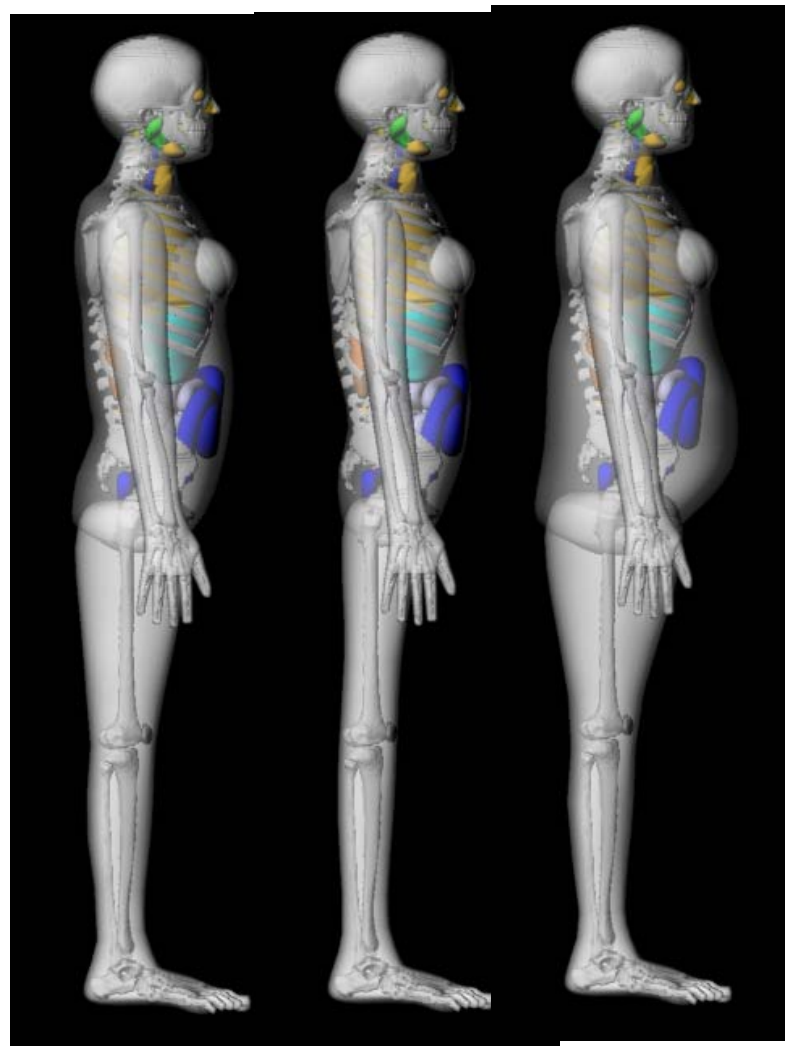
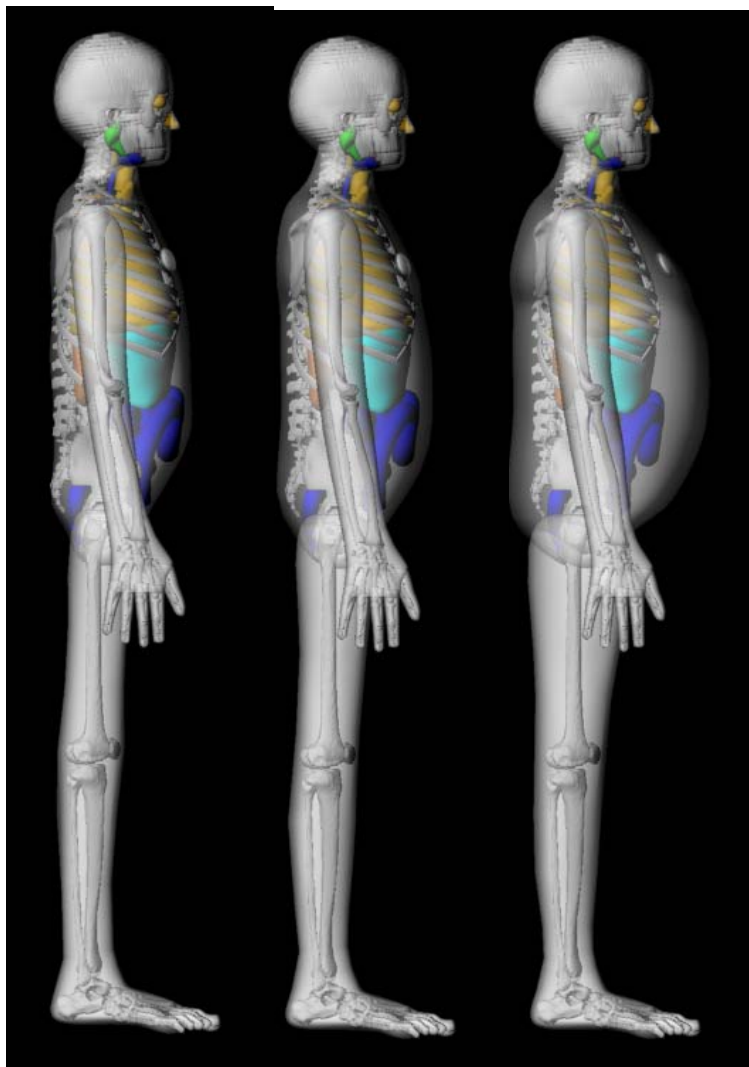
2 millions de voxels de dimension $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$

Le dépôt d'énergie de chaque faisceau est calculé pour chaque voxel

La dose à l'organe est la somme de l'énergie déposée dans chaque voxel

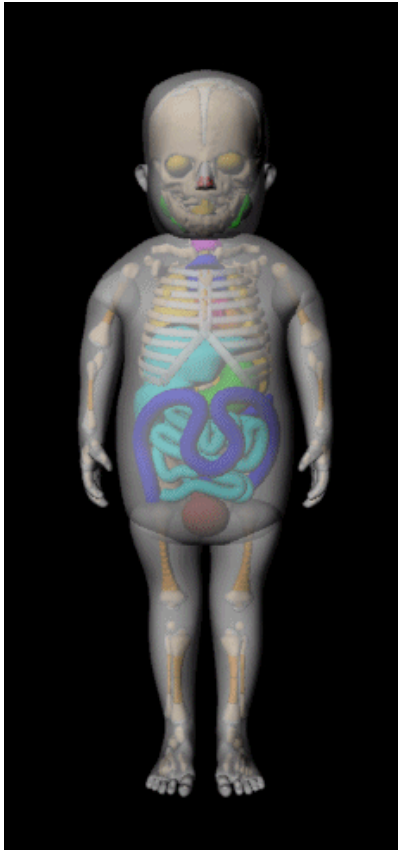
Vue antérieure
de certains organes
d'un fantôme voxélisé

3. La détermination de la dose efficace



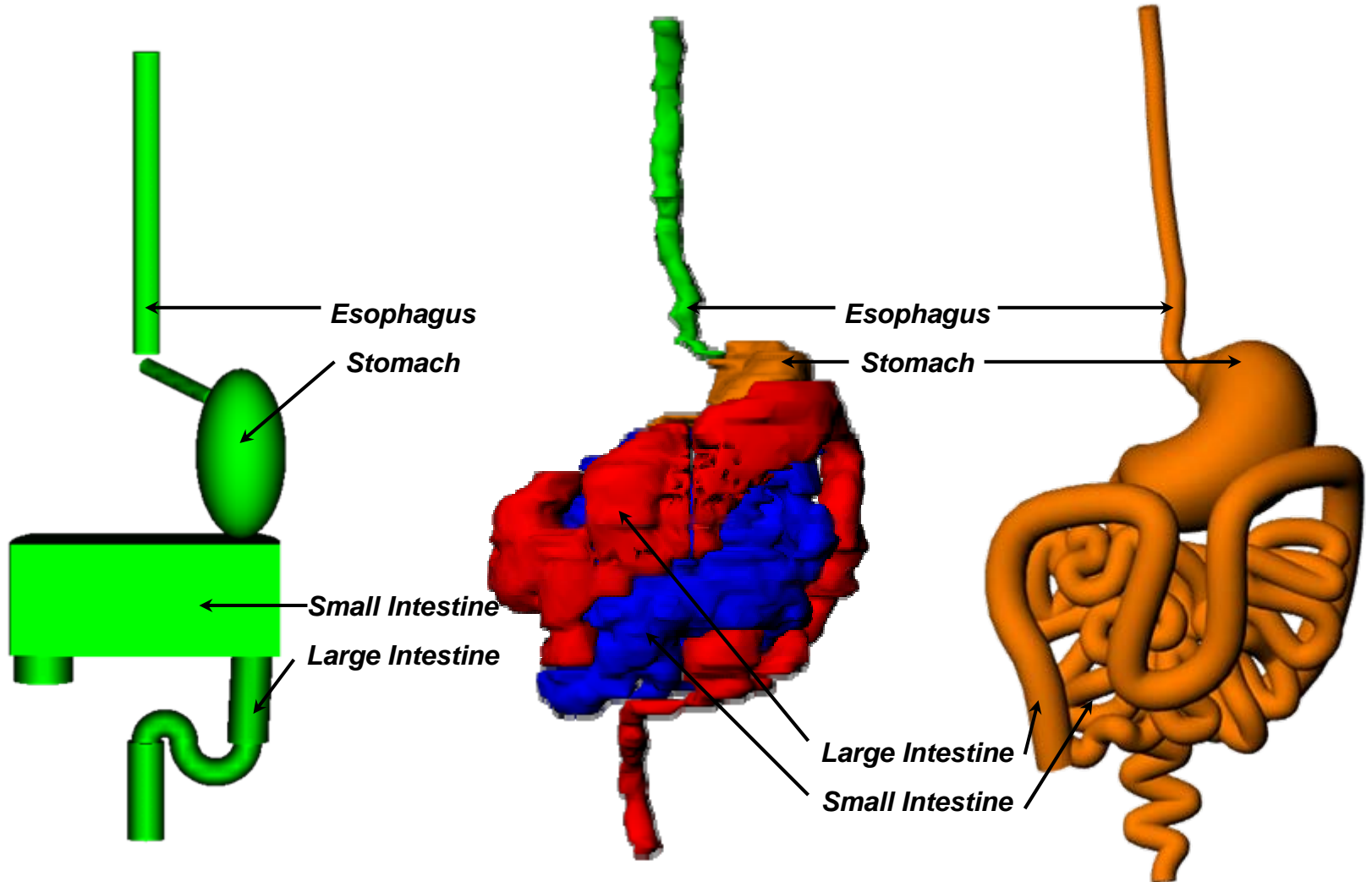
D'après Bolch

3. La détermination de la dose efficace



D'après Bolch

3. La détermination de la dose efficace



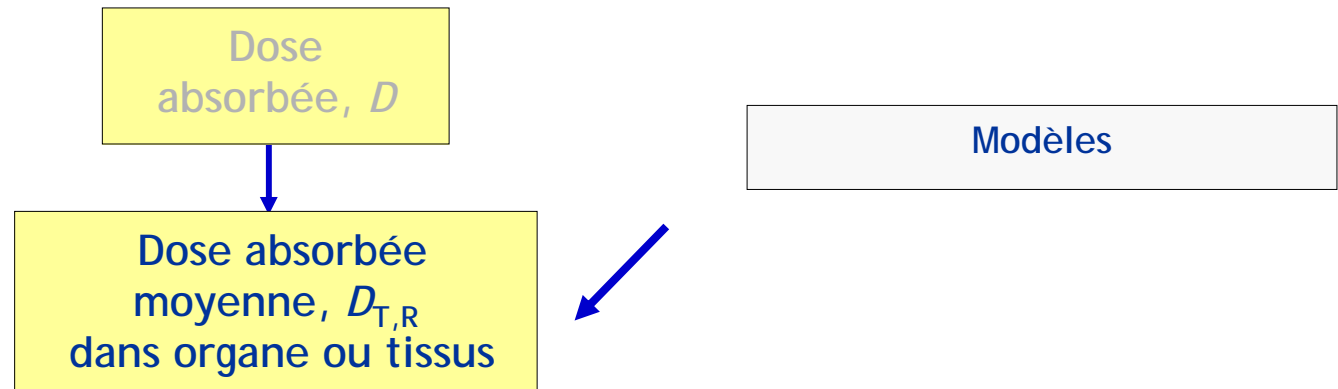
Stylized Phantom

Voxel Phantom

Hybrid phantom

D'après Bolch

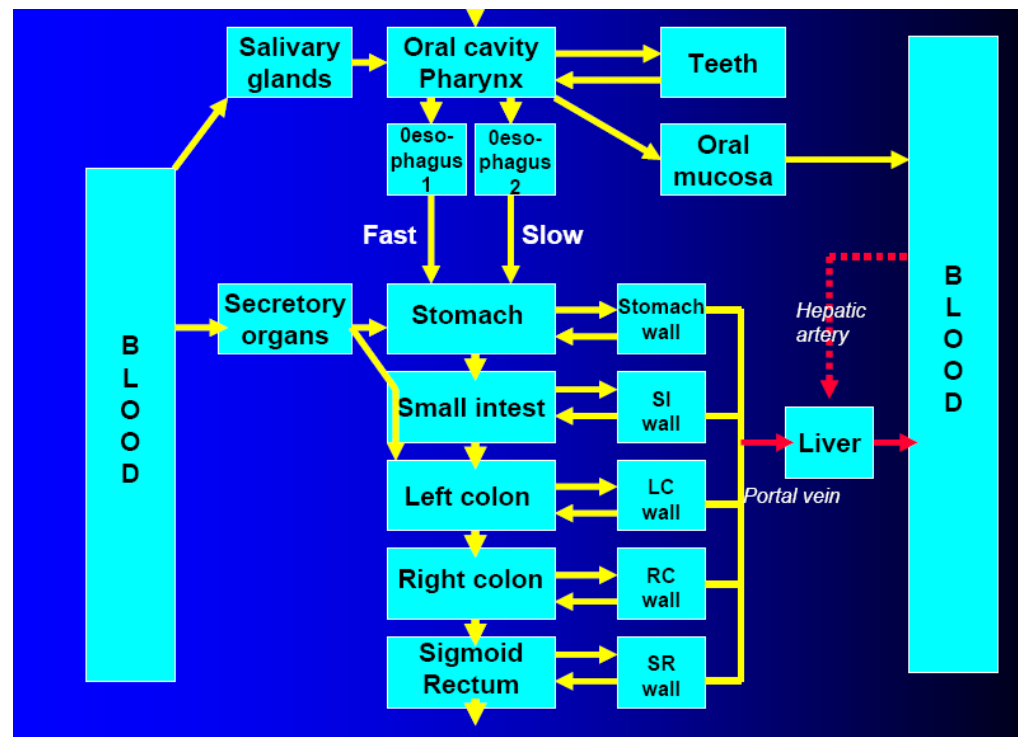
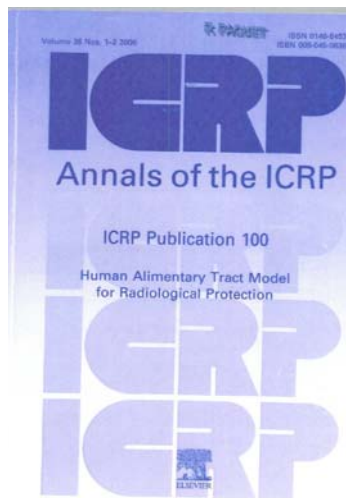
3. La détermination de la dose efficace



- Energie totale transmise à un tissu ou organe par masse de ce t/o
- N'a de sens que pour les effets stochastiques
- Nécessite l'utilisation de fantômes pour le calcul des énergies déposées dans les cibles (irrad. externe + conta interne) émises par les sources (conta. interne)
- Nécessite l'utilisation de modèles biocinétiques (modélisation des transferts) et dosimétriques (calcul des énergies) pour les contaminations internes

3. La détermination de la dose efficace

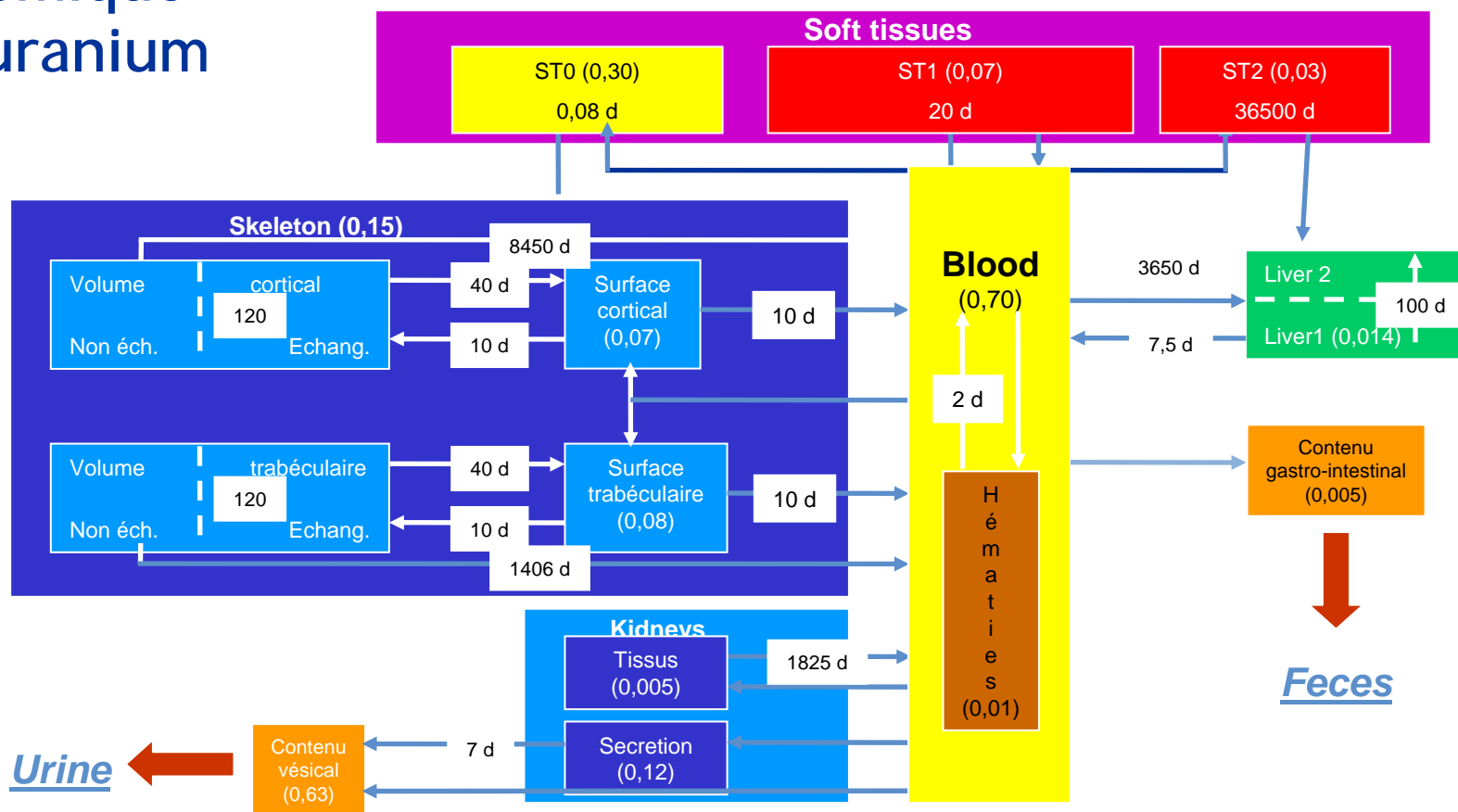
Modèle Alimentaire Humain



D'après ICRP 100, 2006

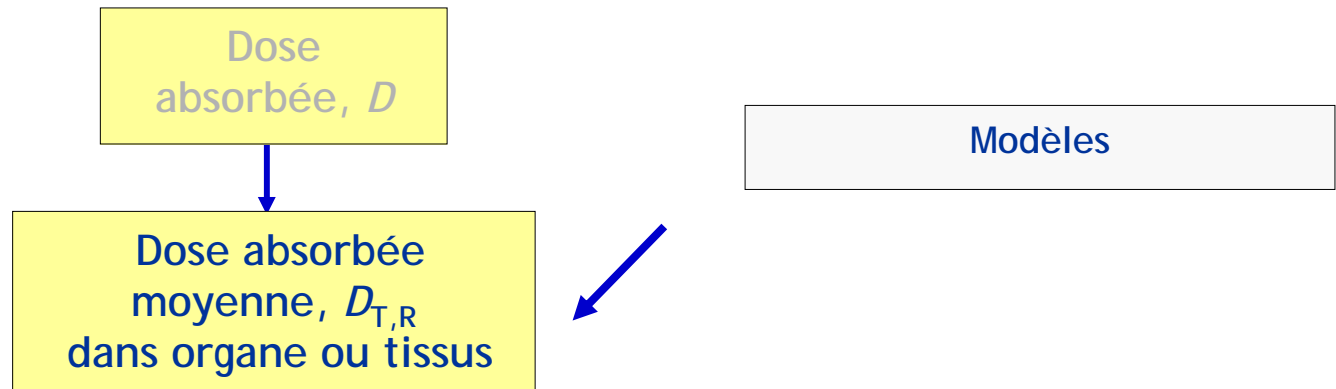
3. La détermination de la dose efficace

Modèle systémique de l'uranium



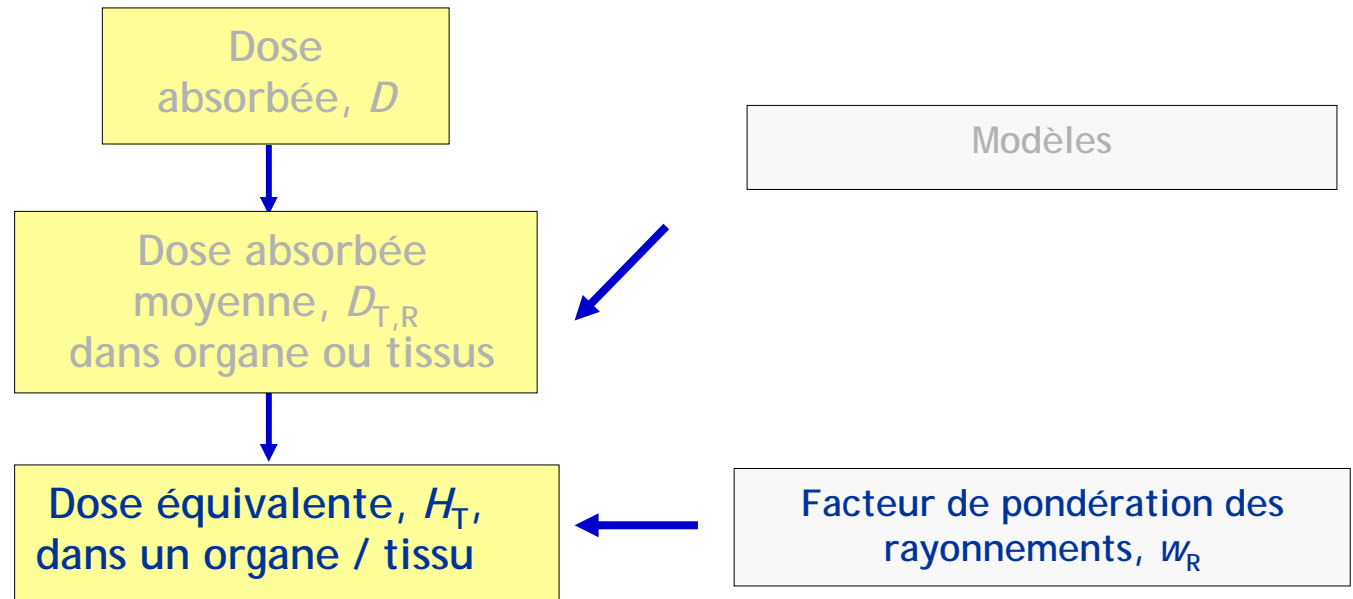
SANG + STO = 1 avec une période sanguine de 28 minutes
 Organe (0.xx) = fraction transférée du sang à l'organe

3. La détermination de la dose efficace



Les valeurs calculées à l'aide des fantômes et des modèles correspondent à la dose absorbée moyenne reçue par un individu de référence

3. La détermination de la dose efficace

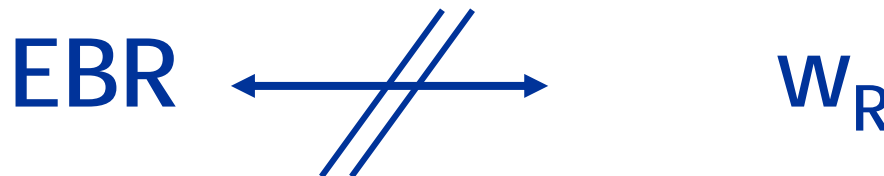


Intègre la notion d'efficacité relative des différents rayonnements

3. La détermination de la dose efficace

Les EBR sont des grandeurs scientifiques, de valeur très variables

Les w_R sont des grandeurs de gestion, fixes



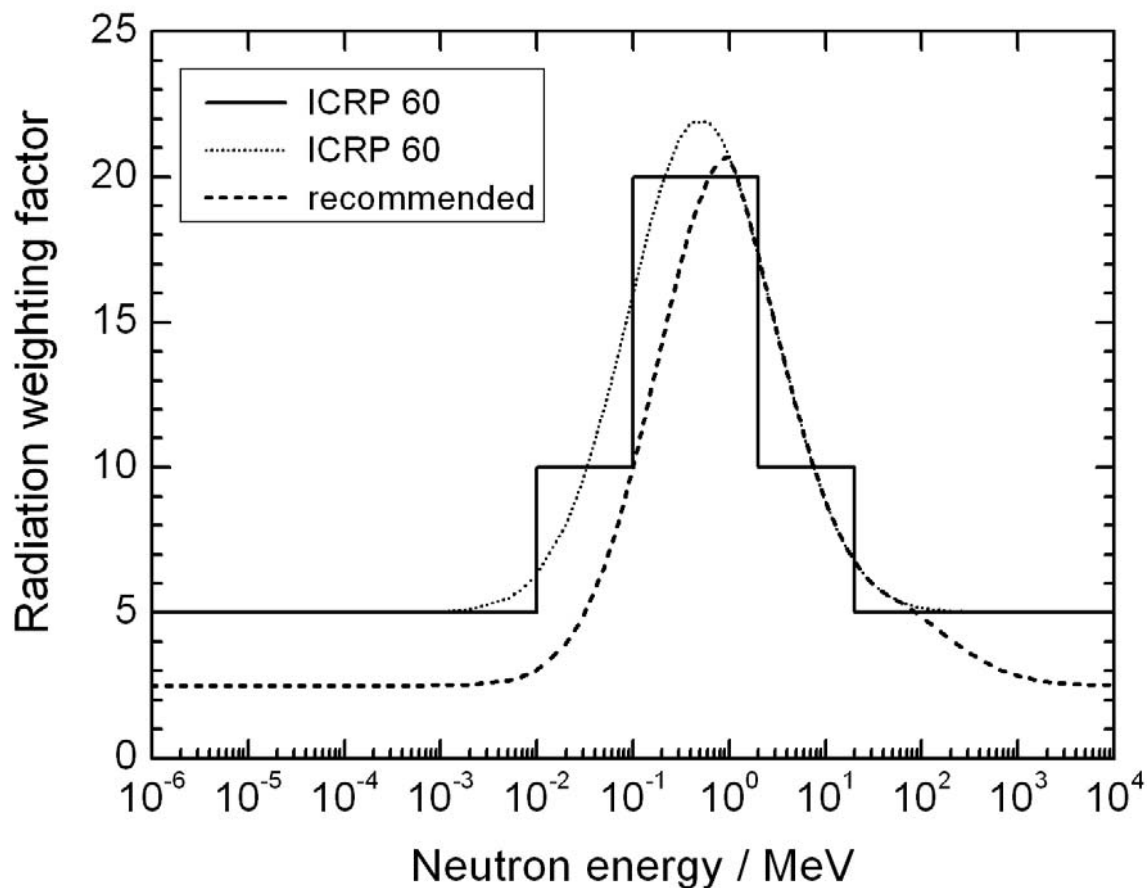
Facteurs de pondération des rayonnements

ICRP 103

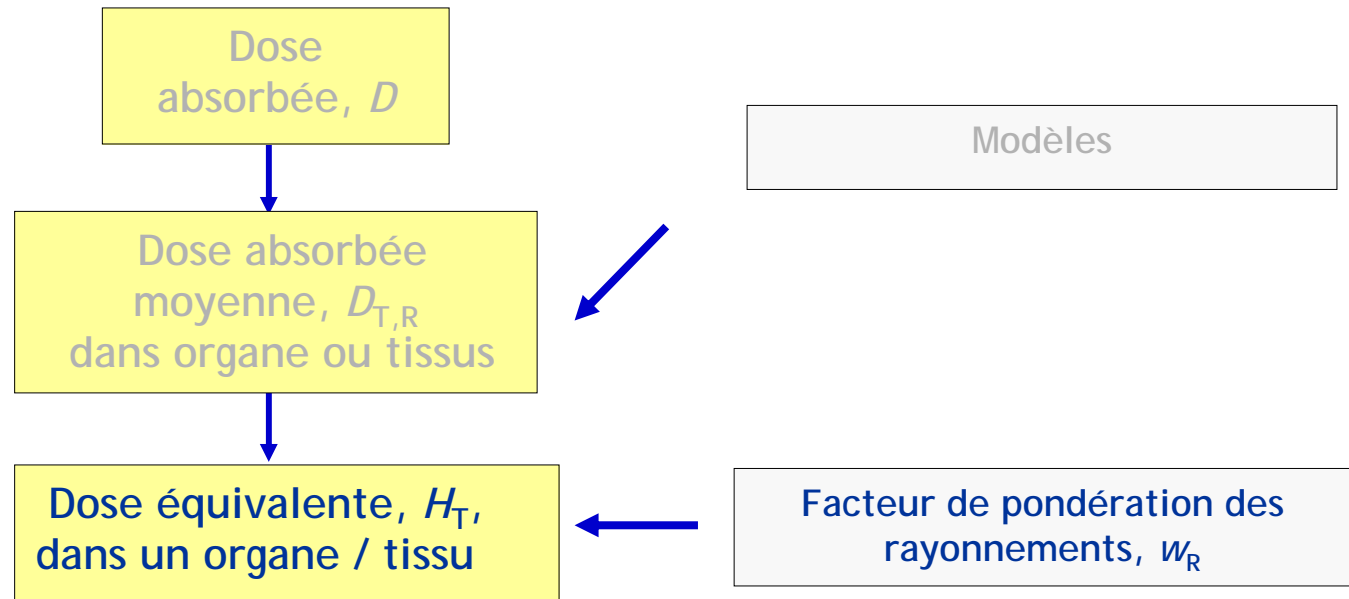
Rayonnement	W_R
Photons, electrons et muons de toutes énergies	1
Protons > 2 MeV (sauf protons de recul)	2
Particules alpha et ions lourds	20

Facteurs de pondération des neutrons

ICRP 103



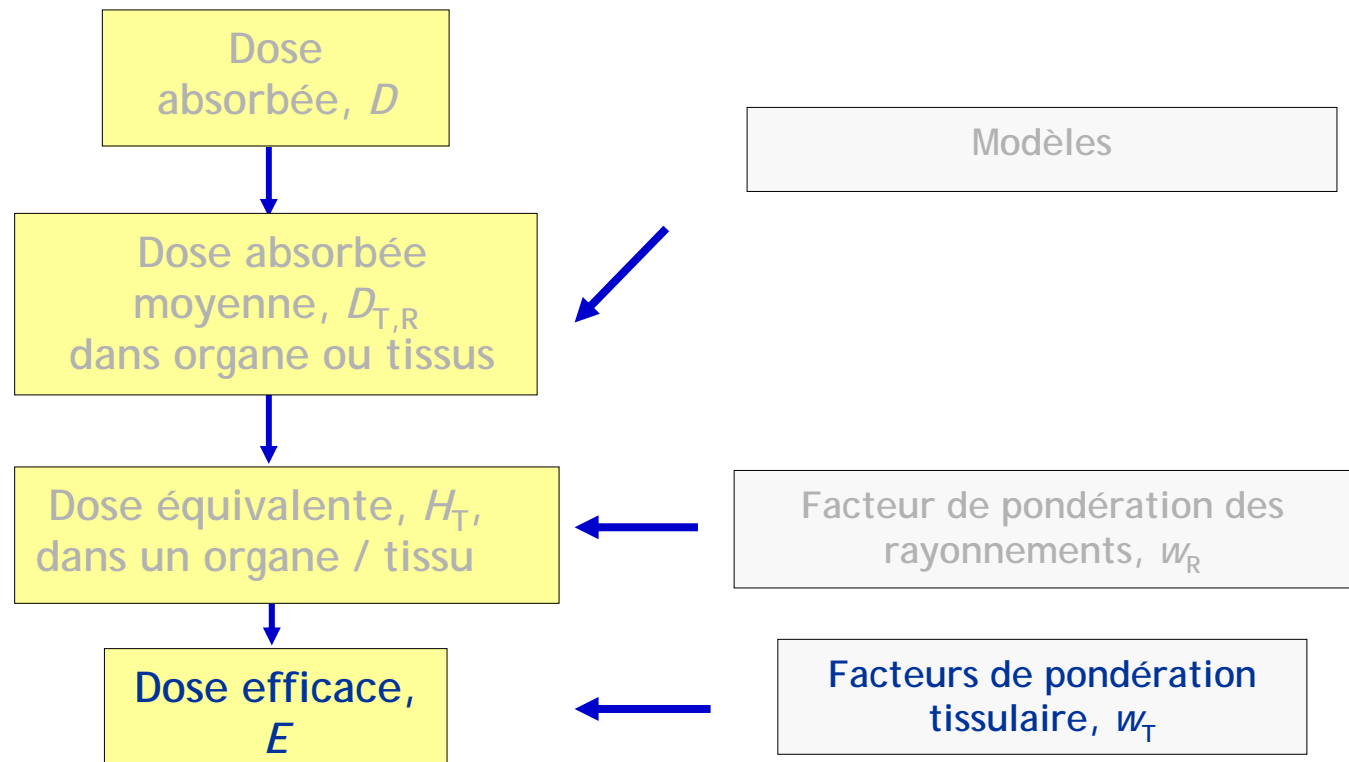
3. La détermination de la dose efficace



Valable pour les effets stochastiques seulement

Pour les effets déterministes : Dose absorbée x EBR

3. La détermination de la dose efficace



Intègre la notion de sensibilité différentielle des différents tissus pour l'apparition de détriment

3. La détermination de la dose efficace

Notion de détriment

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

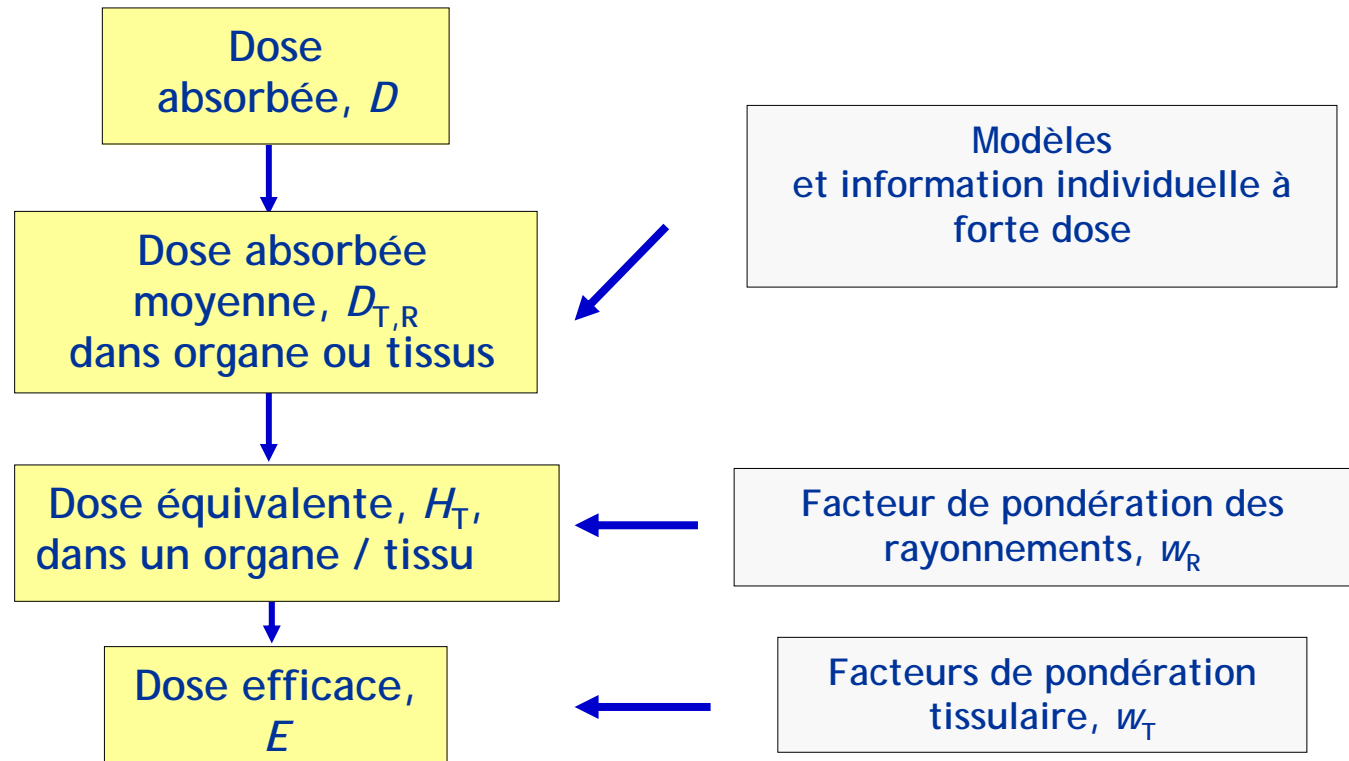
$$D_T = (R_{F,T} + q_T R_{NF,T}) I_T$$

R_F risque nominal de maladie mortelle (R_{NF} , non mortelle)

q pondération pour pathologie non mortelle, liée à qualité de vie

I durée moyenne de vie perdue

3. La détermination de la dose efficace



Intègre la notion de sensibilité différentielle des différents tissus pour l'apparition de détriment

Valable pour effets stochastiques seulement

Facteurs de pondération tissulaire w_T

Tissus ou organes	CIPR 26	CIPR 60	CIPR 103
Gonades	0,25	0,20	0.08
Foie	-	0,05	0.04
Seins	0,15	0,05	0.12
Oesophage	-	0,05	0.04
Moëlle osseuse rouge	0,12	0,12	0.12
Colon	-	0,12	0.12
Thyroïde	0,03	0,05	0.04
Peau	-	0,01	0.01
Poumon	0,12	0,12	0.12
Estomac	-	0,12	0.12
Surfaces osseuses	0,03	0,01	0.01
Vessie	-	0,05	0.04
Gl. salivaires	-	-	0.01
Cerveau	-	-	0.01
Reste de l'organisme	0,30	0,05	0.12

Facteurs de pondération tissulaire w_T

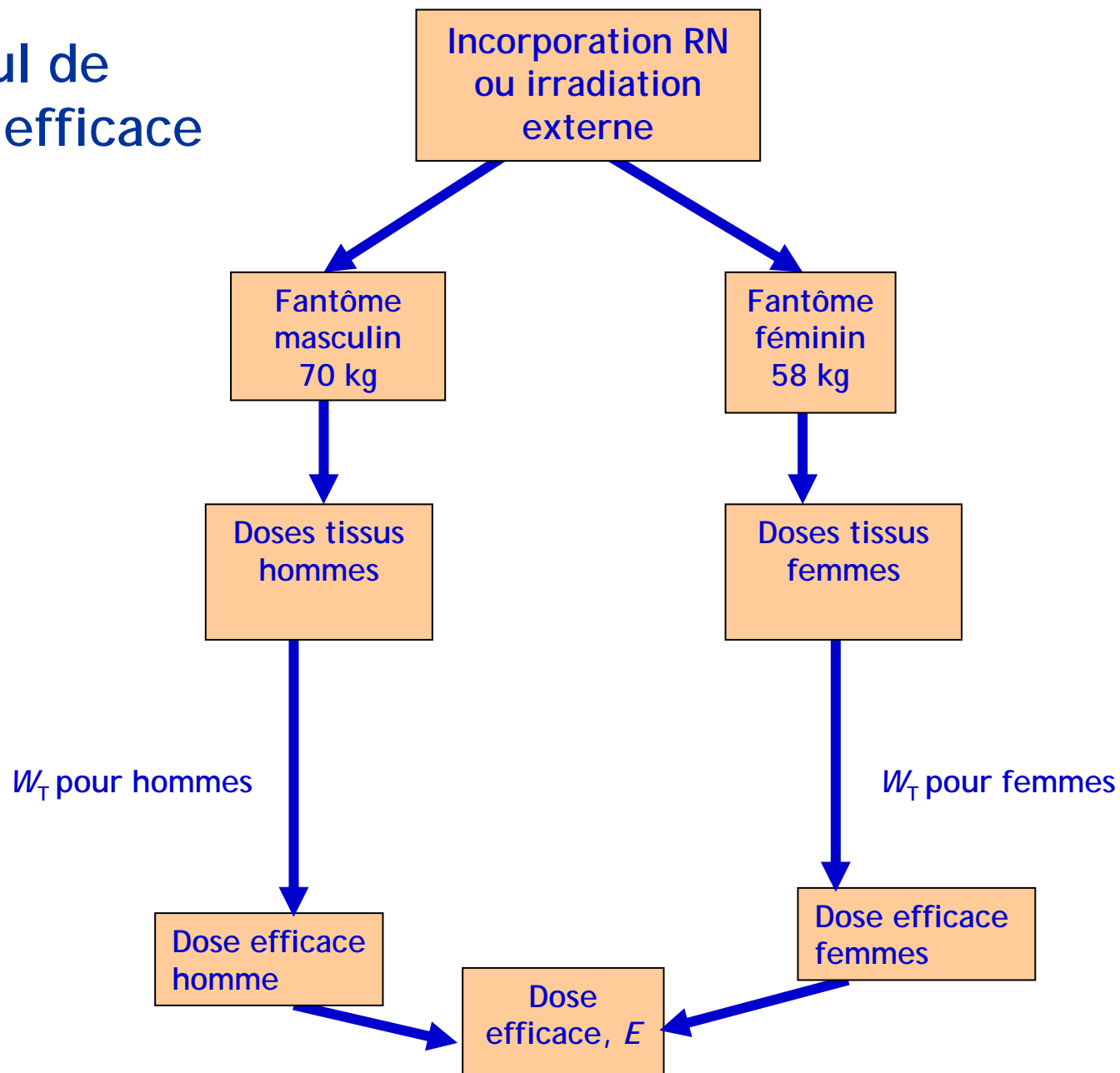
Regroupés en quatre groupes

<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

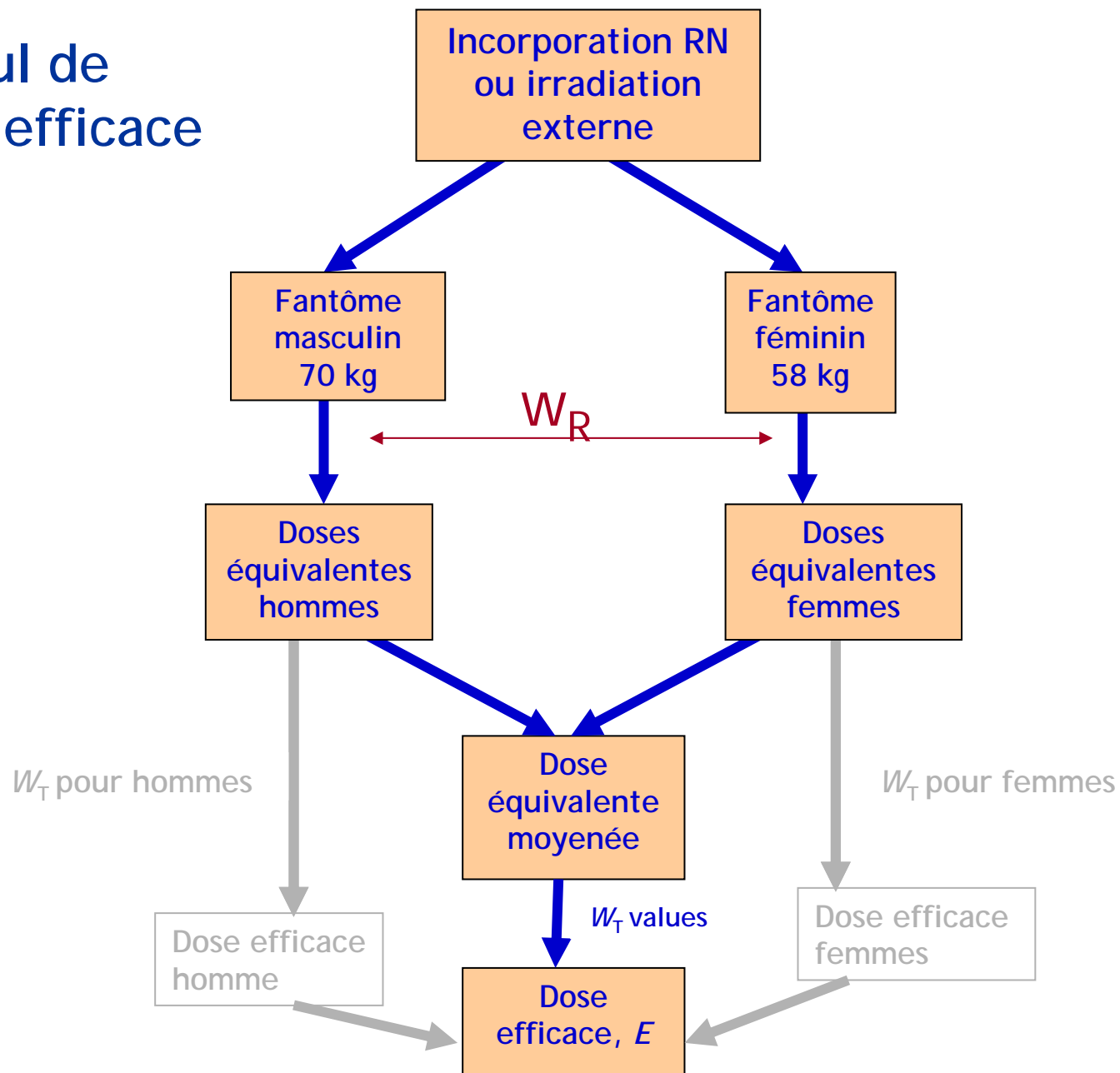


*Ne représentent pas un risque
mais des valeurs de gestion*

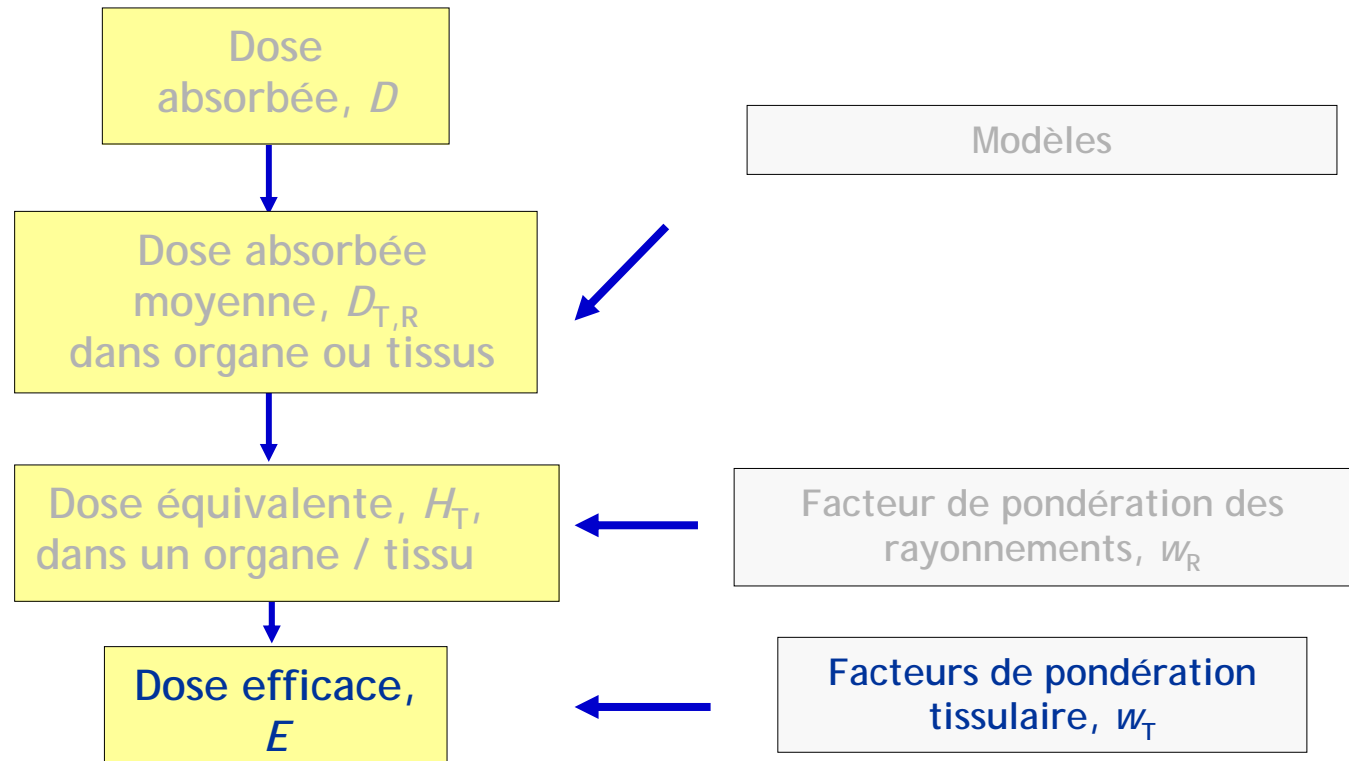
La calcul de la dose efficace



La calcul de la dose efficace



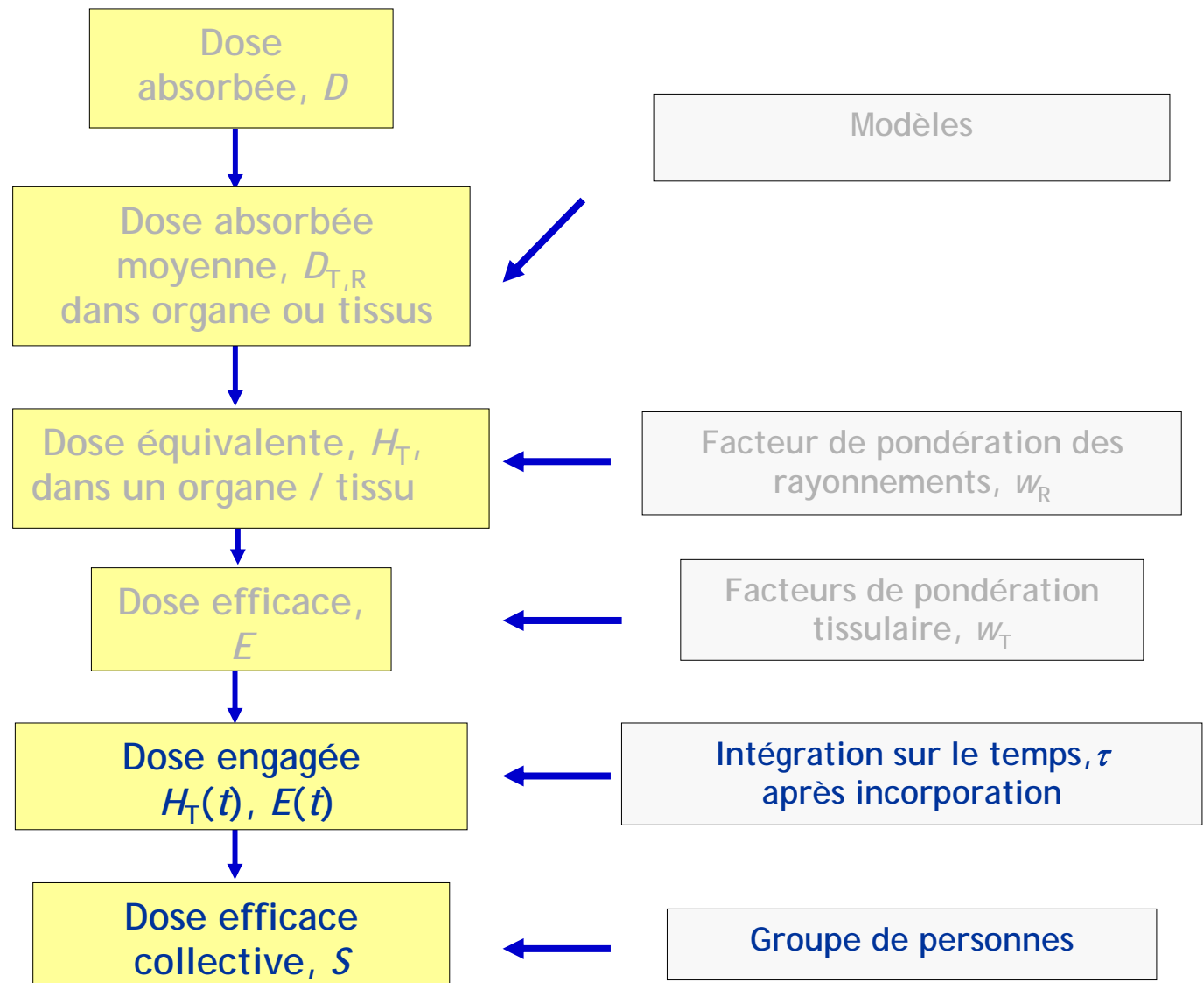
3. La détermination de la dose efficace



Les valeurs discrètes des w_T
La moyenne homme/femme

Impliquent que la dose efficace est une valeur de gestion

3. La détermination de la dose efficace



4. L'utilisation de la dose efficace

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

Hypothèses

- A faibles doses, la dose équivalente à un organe est corrélée de façon linéaire avec le détriment
- A faibles doses, le détriment total d'une personne exposée est donné par la somme des détriments des organes isolés
- Les doses internes et externes sont additives

4. L'utilisation de la dose efficace

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

Approximations

- Sensibilité différentielles des tissus pour effets stochastiques est résumée par 4 groupes de valeurs, moyennées selon les sexes, les ages et généralisées sur toutes les populations
- Les effets différentiels des différents types de rayonnements (hors neutrons) sont exprimés par seulement 3 valeurs

4. L'utilisation de la dose efficace

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

Simplifications

- 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 expositions externes et contamination interne sont calculés pour des conditions standard

4. L'utilisation de la dose efficace

Avantages

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

4. L'utilisation de la dose efficace

Limites

- Elle ne concerne que les effets stochastiques
- La dose efficace n'est pas calculée à partir de données individuelles.
- Elle ne correspond donc pas à une dose individuelle mais à la dose d'une personne de référence, exposée dans des conditions identiques à celle de l'individu en question.

4. L'utilisation de la dose efficace

En conséquence

- La dose efficace ne peut être utilisée pour l'estimation d'un risque individuel
- Ne doit pas être utilisée en cas d'accident (utiliser valeurs individuelles: sexe, masse, physiologie, sensibilité, antécédents)
- Ne doit pas être utilisée lorsque les doses reçues risquent de provoquer des réactions tissulaires
- Ne doit pas être utilisée pour l'évaluation des doses en épidémiologie

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

4. L'utilisation de la dose efficace

Ces limitations de l'usage de la dose efficace sont déjà anciennes

ICRP 26 (1977)

paragraphe 21

« It is important that dose equivalent should not be used to assess the likely early consequences of severe accidental exposures in man »

4. L'utilisation de la dose efficace

La dose efficace doit être utilisée pour

- La gestion prospective et optimisation des expositions externes et internes
- La démonstration rétrospective de conformité lorsque les doses sont largement en dessous des limites réglementaires

4. L'utilisation de la dose efficace

La dose efficace peut être utilisée pour

- Comparer des techniques médicales de traitement pour des groupes de même âge et même sexe
- Estimer rapidement, avant calcul plus complexe, les doses reçues en cas d'incident
- Estimer les doses d'un groupe de personnes (dose collective, utilisable seulement de façon prospective et pour des personnes exposées dans des conditions similaires)
- Estimer la dose engagée, reçue par une personne contaminée



Actions de management

5. Les développements

Nécessité d'estimer le détriment dans certains cas

- Expositions individuelles médicales ou industrielles
- Etudes épidémiologiques
- Comparaison des sources d'exposition

5. Les développements

Pour l'estimation d'un risque individuel, la CIPR recommande toujours de raisonner à partir des données réelles (anatomie, physiologie, antécédents,..) des individus et de travailler avec la dose absorbée

5. Les développements

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

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

6. Conclusions

- La dose efficace est une grandeur de gestion des expositions
- Elle n'est pas un indicateur de risque individuel

- Il y a un réel besoin d'une grandeur alternative pour l'estimation des risques
- Un gros travail reste à faire sur ce sujet..