



IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Les travaux de la CIPR dans le domaine de la dosimétrie interne

F. Paquet

ICRP C2
IRSN, Direction scientifique

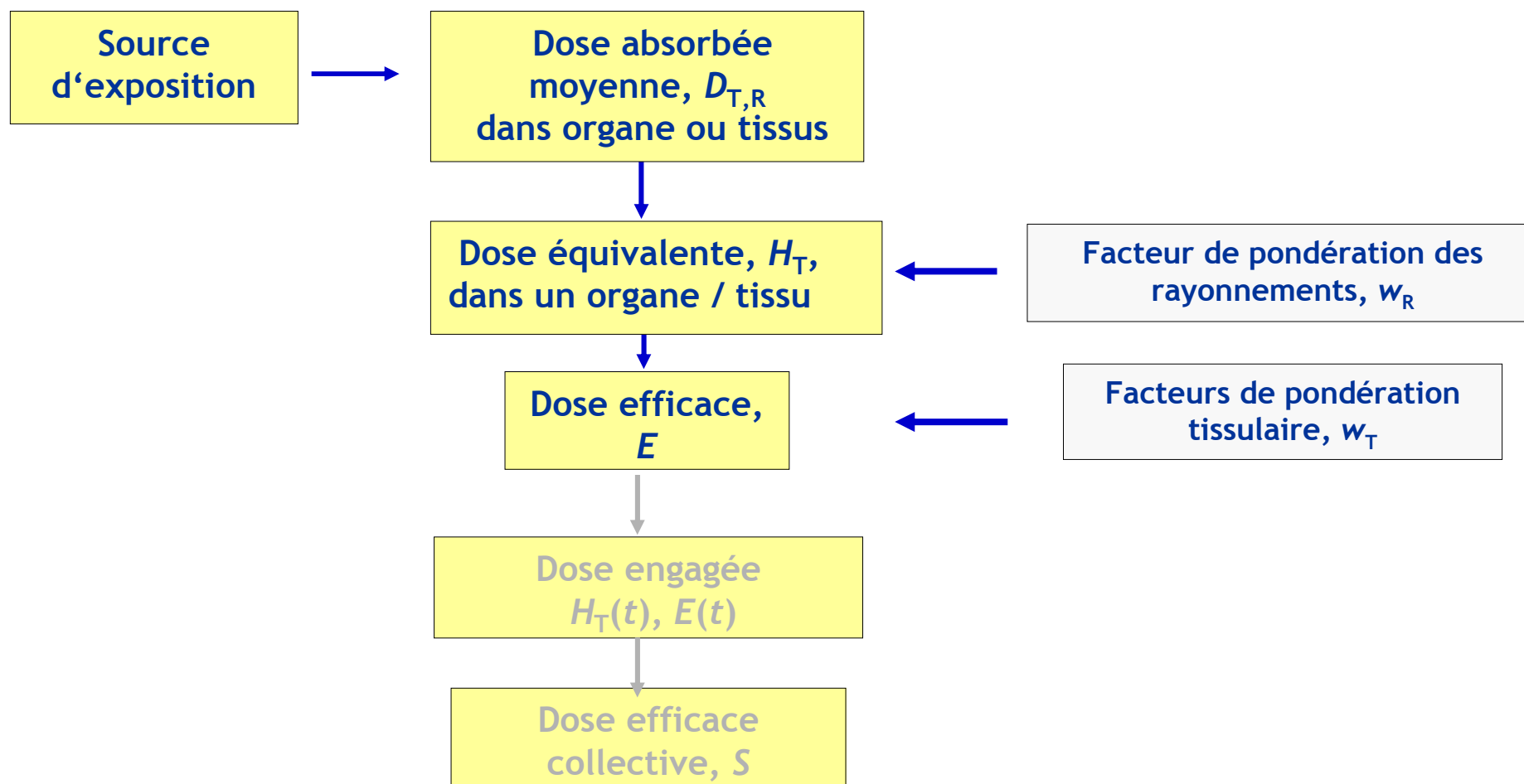
Préambule

Dosimétrie interne :

Abus de langage qui signifie

« *Dosimétrie des rayonnements reçus
lors d'une contamination interne* »

Le principe général



Le principe général

Grandeurs originelles

Activité (Bq)

Kerma, K

Fluence F

Dose absorbée, D

Mesurables



Grandeurs de Protection

Dose absorbée à l'organe, D

Dose équivalente, H

Dose efficace, E

Non mesurables

Le principe général

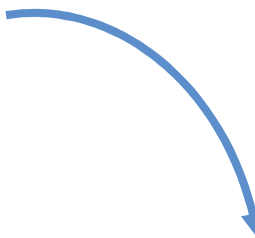
La dosimétrie « externe¹ » est relativement simple à réaliser

¹. Dosimétrie des rayonnements reçus lors d'irradiations externes

Le principe général

Grandeurs dosimétriques

Activité (Bq)
Kerma, K
Fluence F
Dose absorbée, D



Grandeurs opérationnelles

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

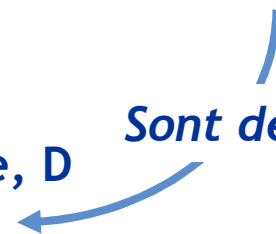


Grandeurs de Protection

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

Sont des estimateurs de

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



Le principe général

Les quantités opérationnelles H^* , H' et H_p peuvent être déterminées par utilisation de dosimètres d'ambiance ou individuels



Saphymo 6150 AD5

Mesure $H^*(10)$



Dosicard

Mesure $H_p(10)$ et $H_p(0,07)$



DMC 2000S



DMC 2000XB

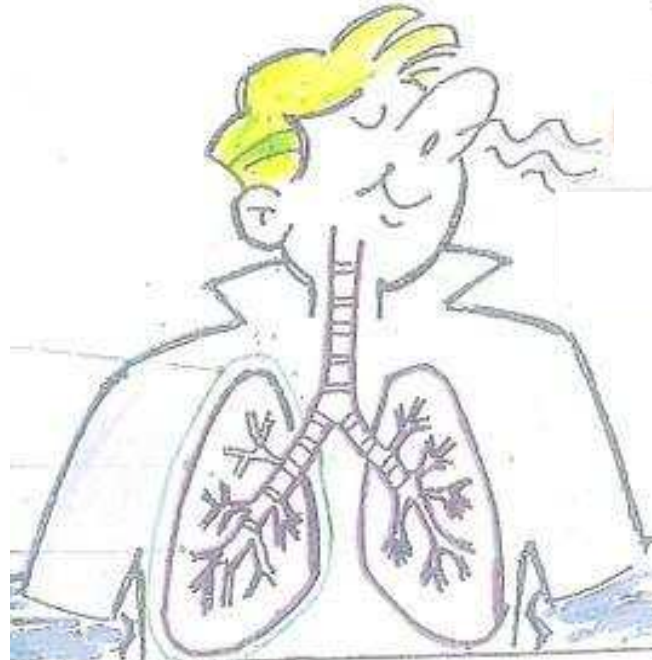
Le principe général

La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

La nature du problème

La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

- Pas de dosimètre disponible



La nature du problème

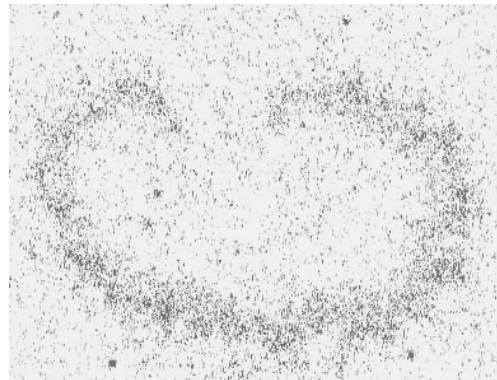
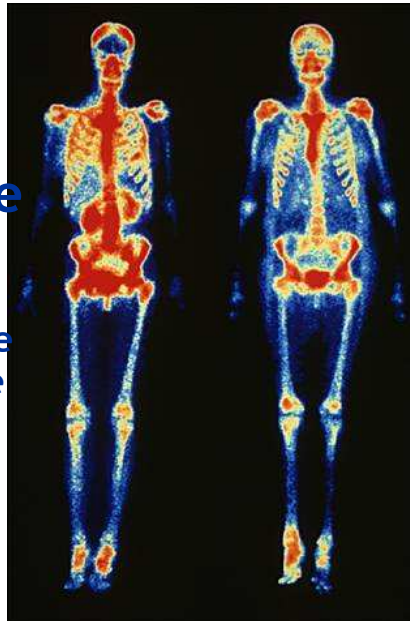
La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

- Pas de dosimètre disponible
- Dépôts d'énergie peuvent être hétérogènes

Au niveau
de l'organisme

--

^{99m}Tc chez l'homme
après scintigraphie



Au niveau tissulaire

--

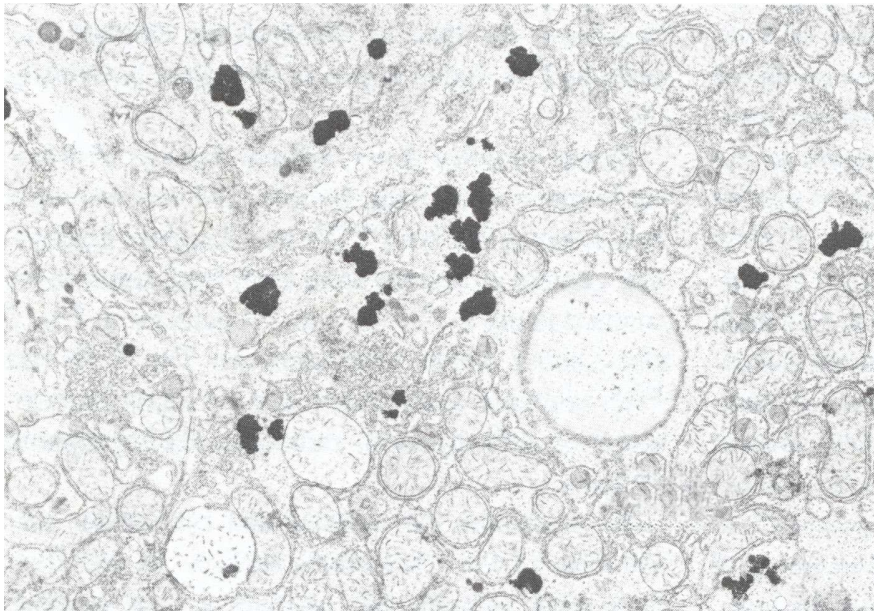
Uranium
dans le rein de rat après injection

Au niveau cellulaire

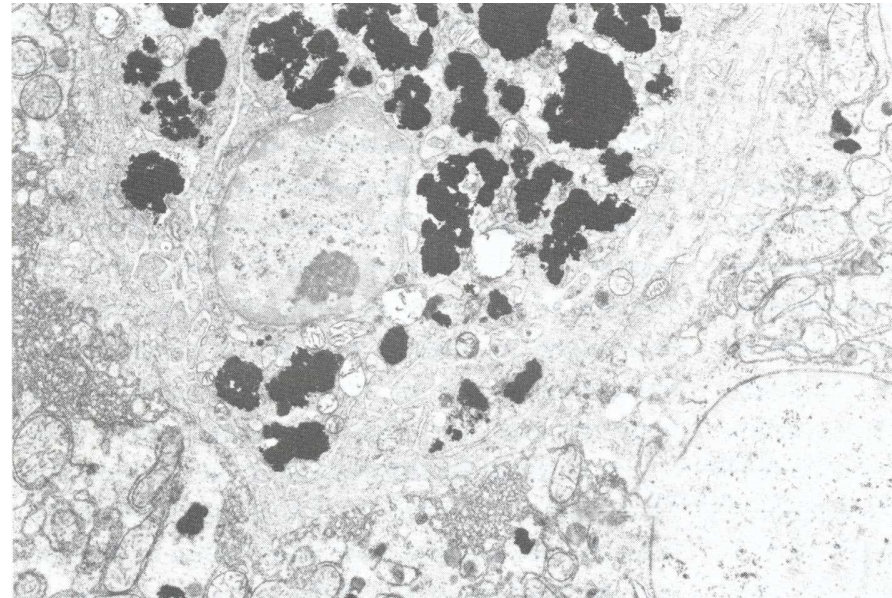
Uranium
dans les macrophages alvéolaires



Thorotrast dans des cellules de hamster



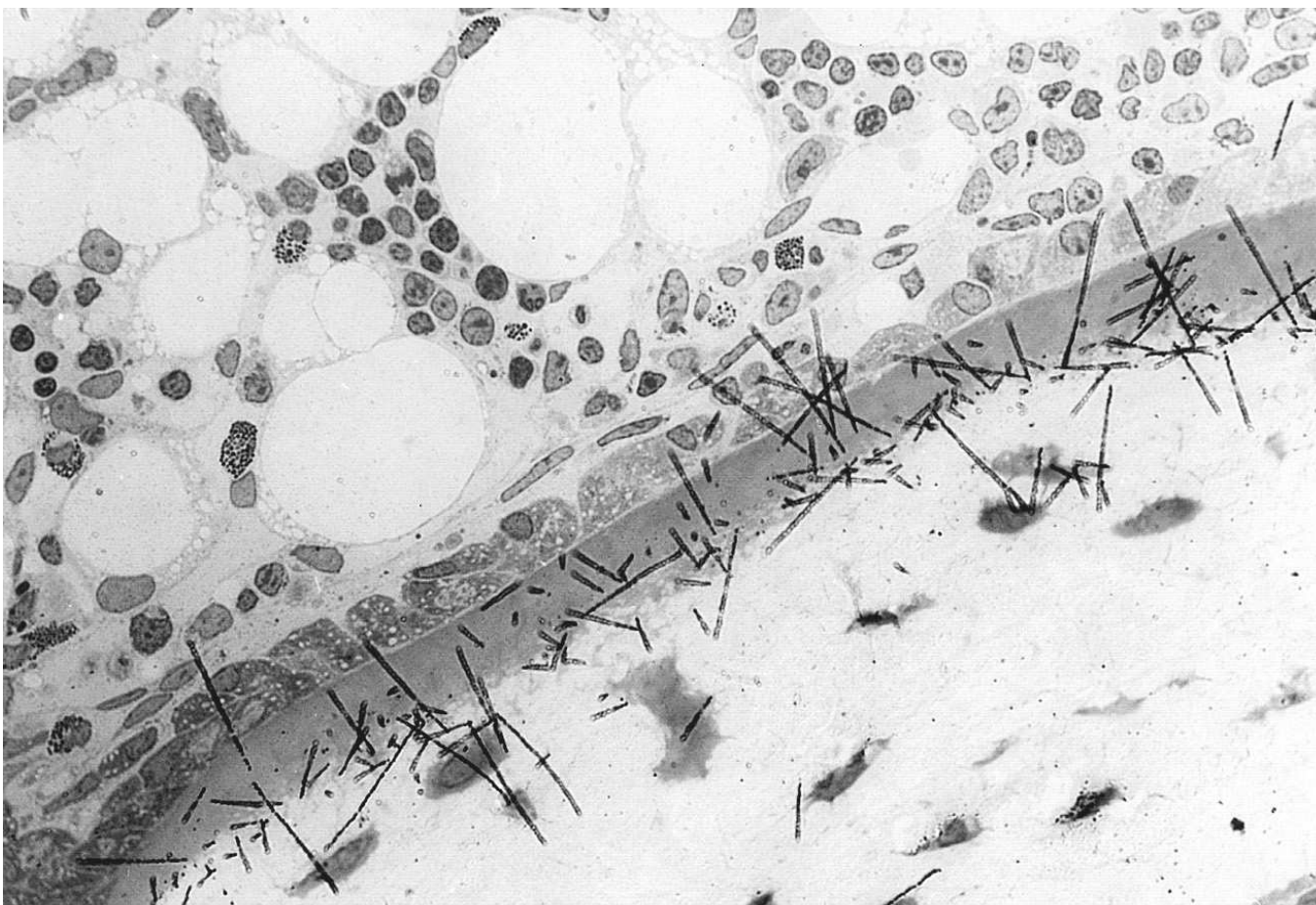
Hepatocyte



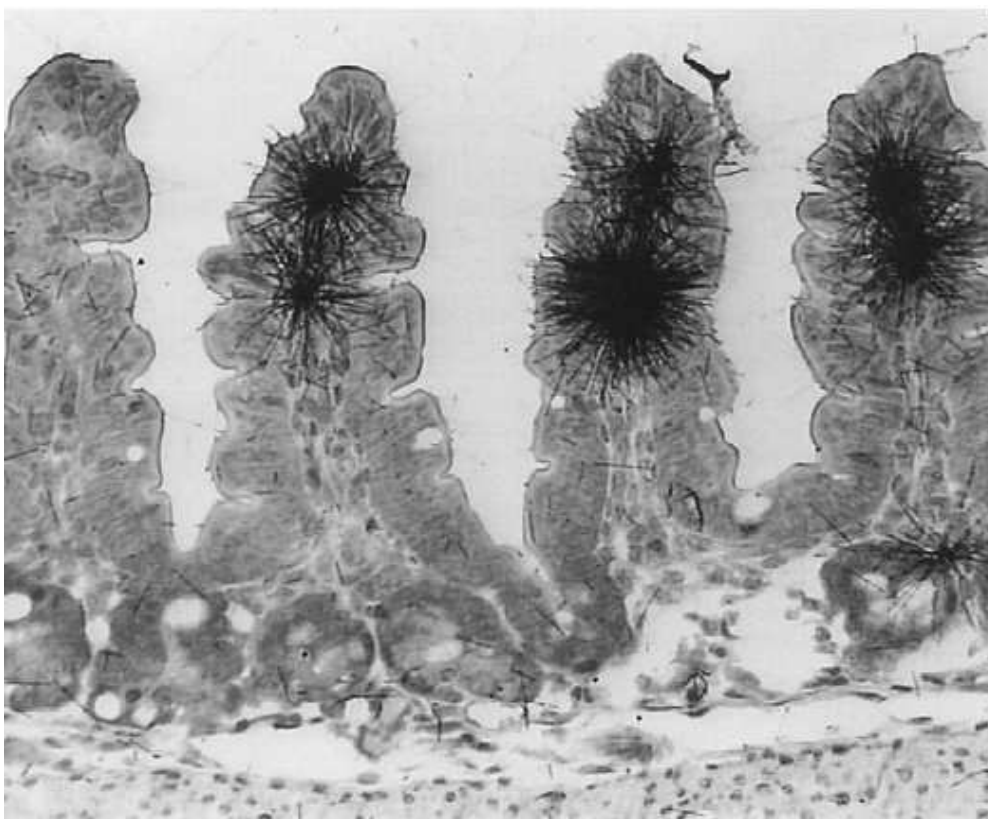
Kupffer cell

Brooks et al., 1986

Dépôt d'émetteurs alpha sur surfaces osseuses



Plutonium dans intestin grêle de cochon d'Inde

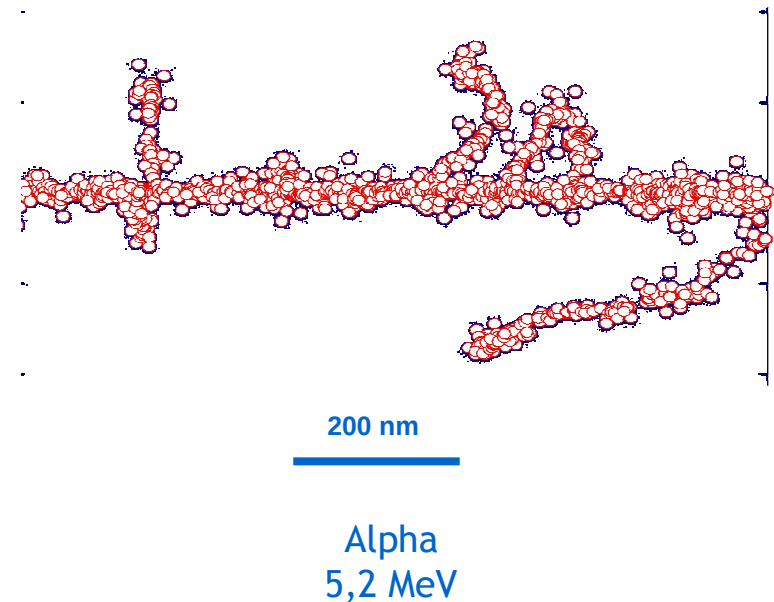
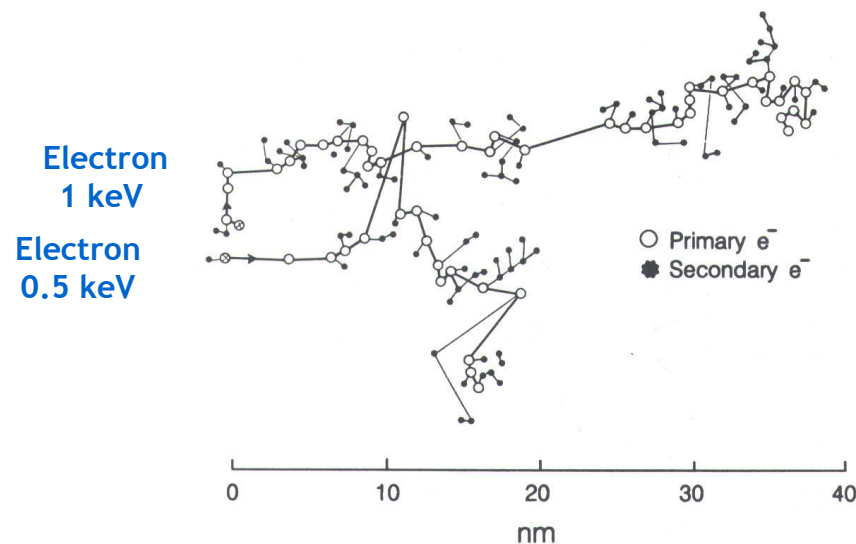


Harrison and Stather 1996

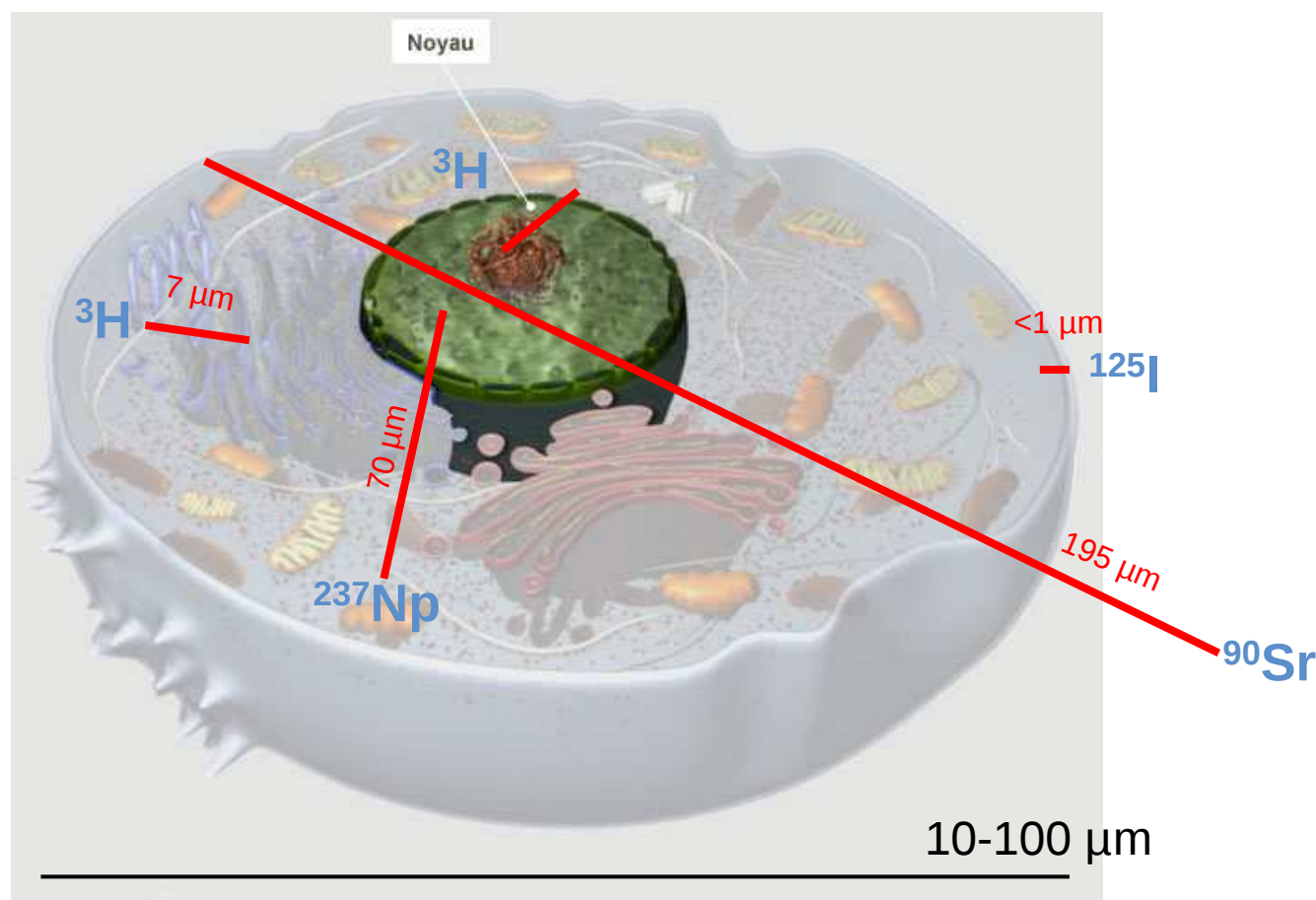
La nature du problème

La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

- Pas de dosimètre disponible
- Dépôts d'énergie peuvent être hétérogènes
- **Faible parcours des particules alpha et des électrons**



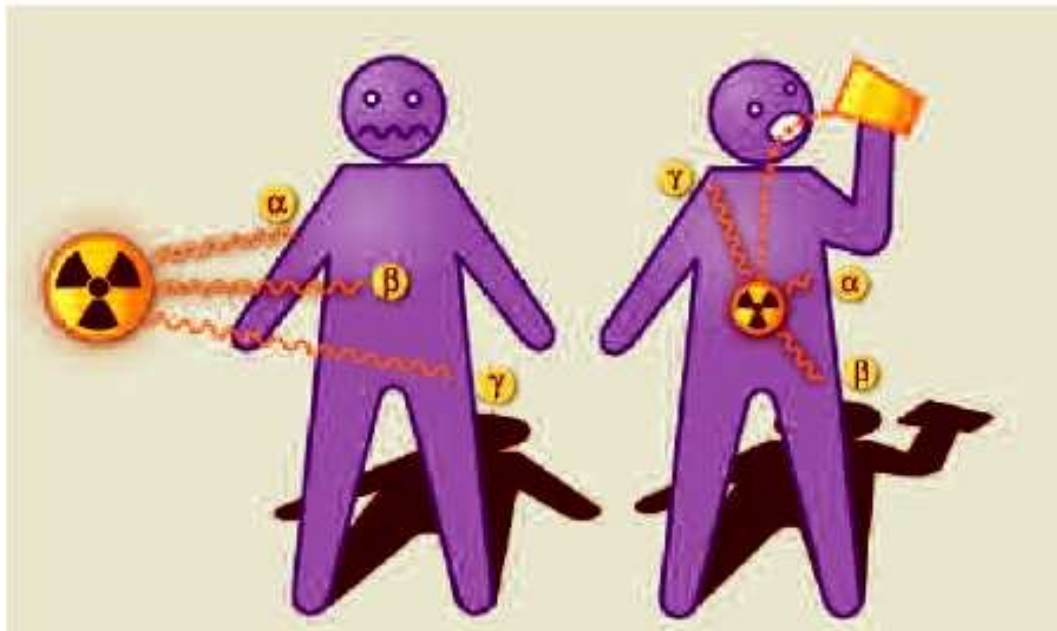
Nécessite de connaître à la fois les cibles cellulaires et moléculaires des radionucléides ainsi que leur position dans les cellules



La nature du problème

La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

- Pas de dosimètre disponible
- Dépôts d'énergie peuvent être hétérogènes
- Faible parcours des particules alpha et des électrons
- **Chronicité des expositions après contamination**





**Une exposition externe de quelques
microsecondes entraine une irradiation de la
même durée**

Après une contamination, la durée de l'irradiation va dépendre de la période effective du radionucléide

$$1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$$

Les iode, césium, strontium ont une période inférieure à l'année

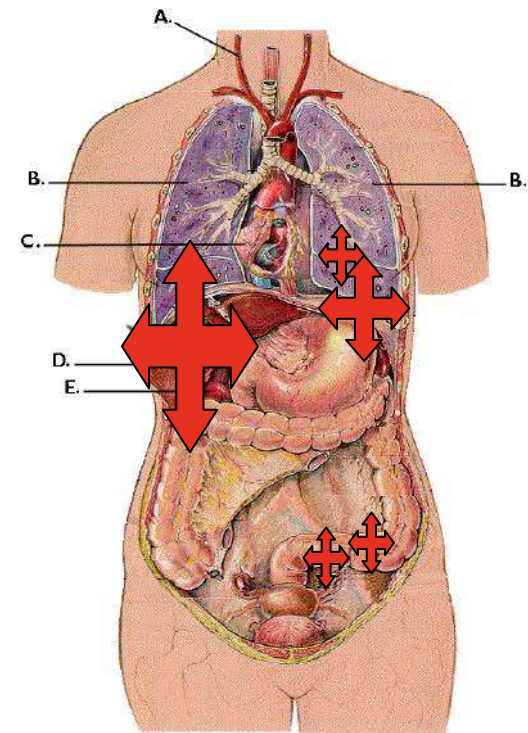
Les actinides ont des périodes de plusieurs décennies

La nature du problème

La dosimétrie des contaminations internes est plus complexe

- Pas de dosimètre disponible
- Dépôts d'énergie peuvent être hétérogènes
- Faible parcours des particules alpha et des électrons
- Chronicité des expositions après contamination
- **Irradiation croisée des différents tissus**

Chaque organe/tissu peut être à la fois cible et source de rayonnements



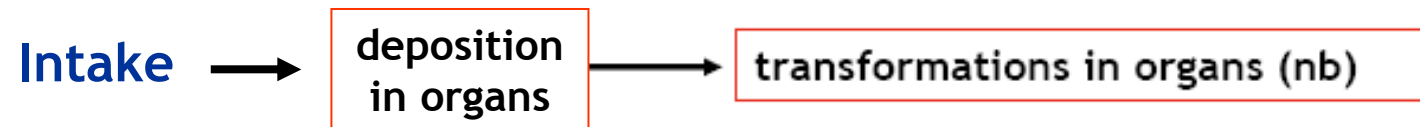
La méthode pour le calcul des doses après contamination

Intake

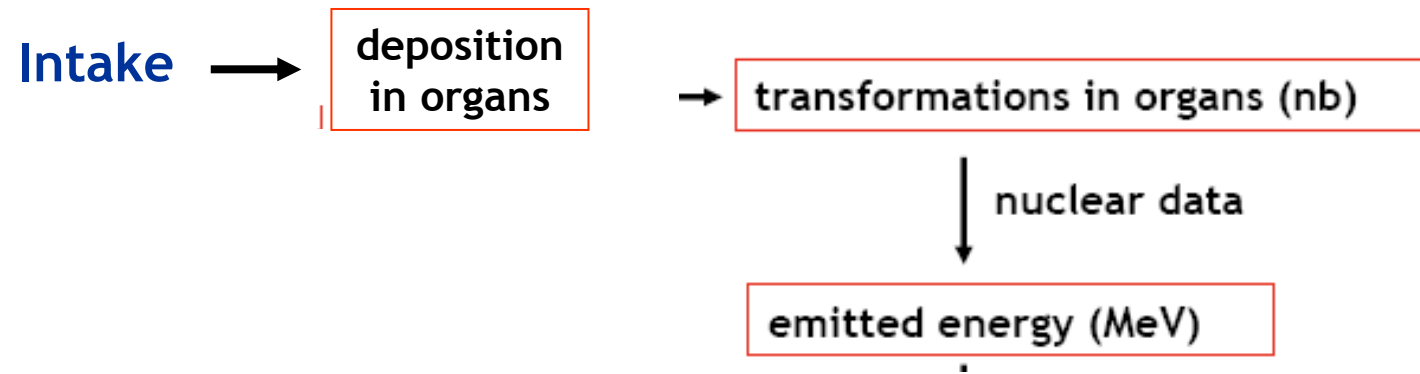
La méthode pour le calcul des doses après contamination



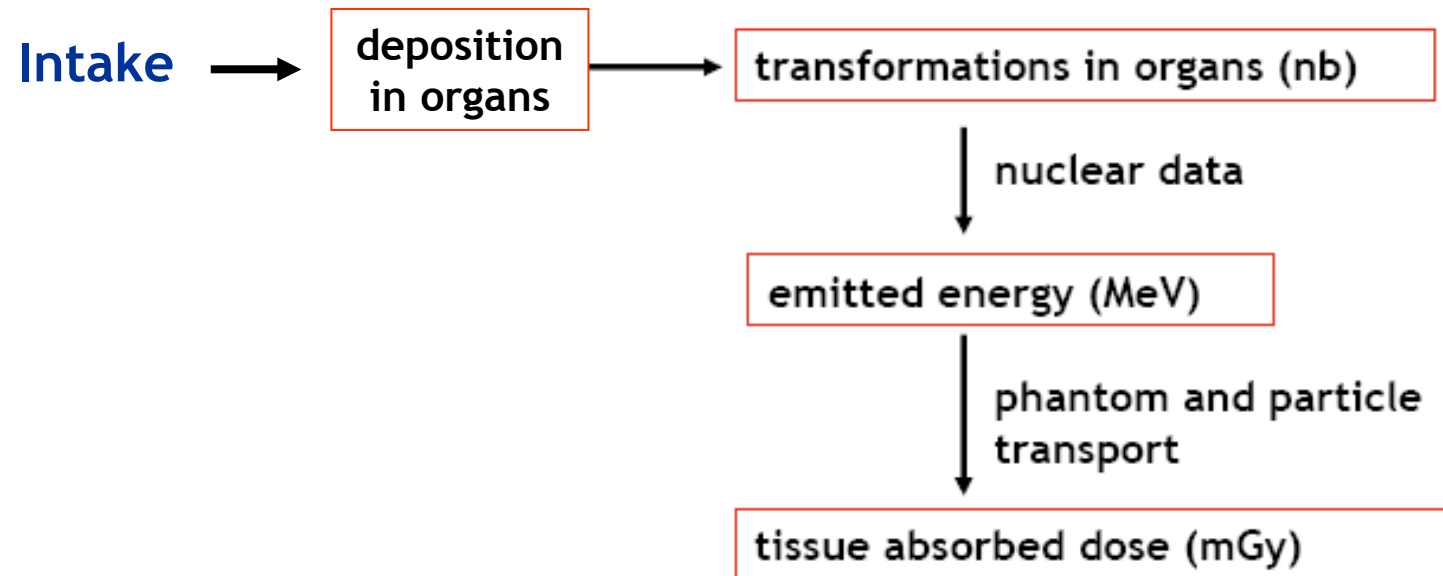
La méthode pour le calcul des doses après contamination



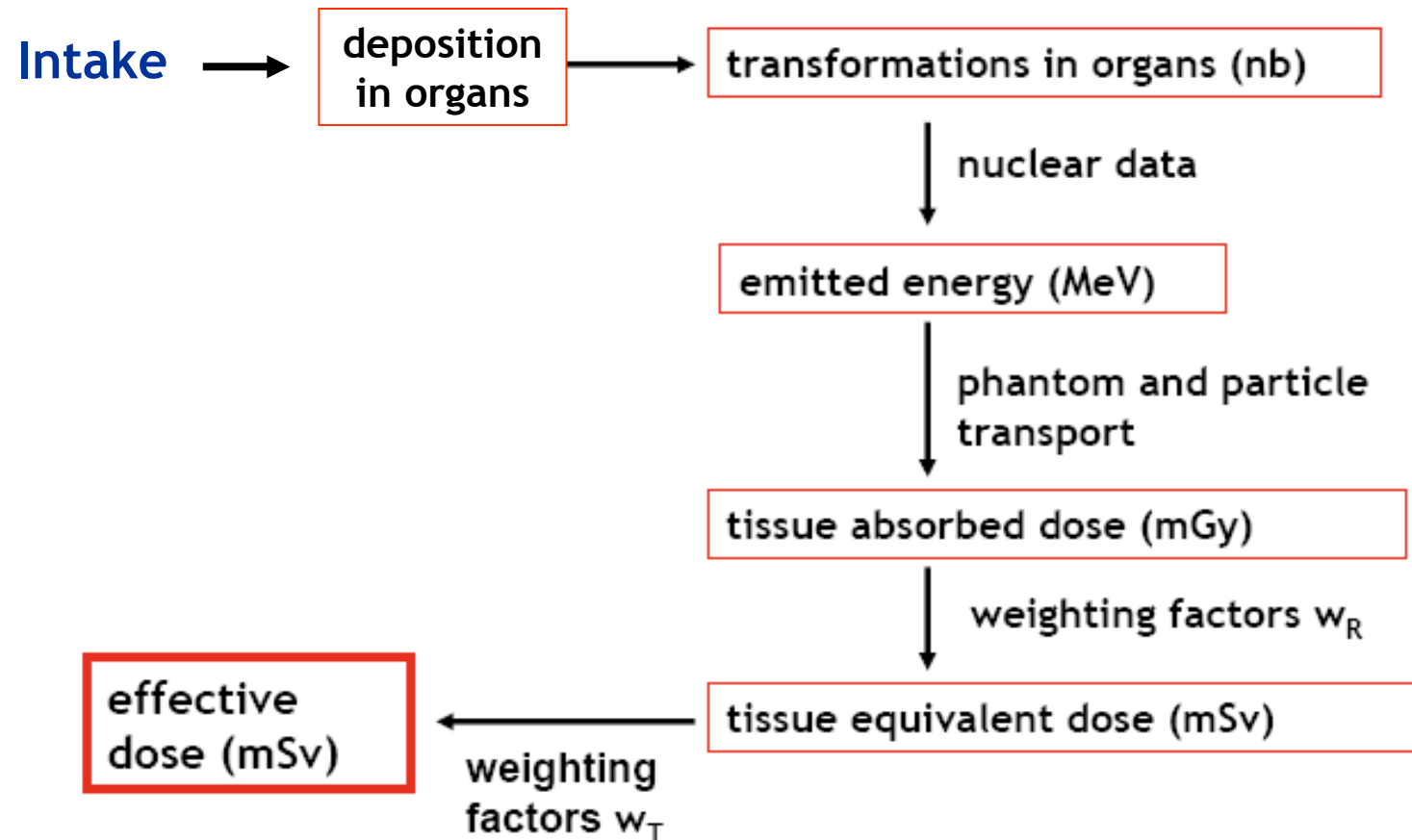
La méthode pour le calcul des doses après contamination

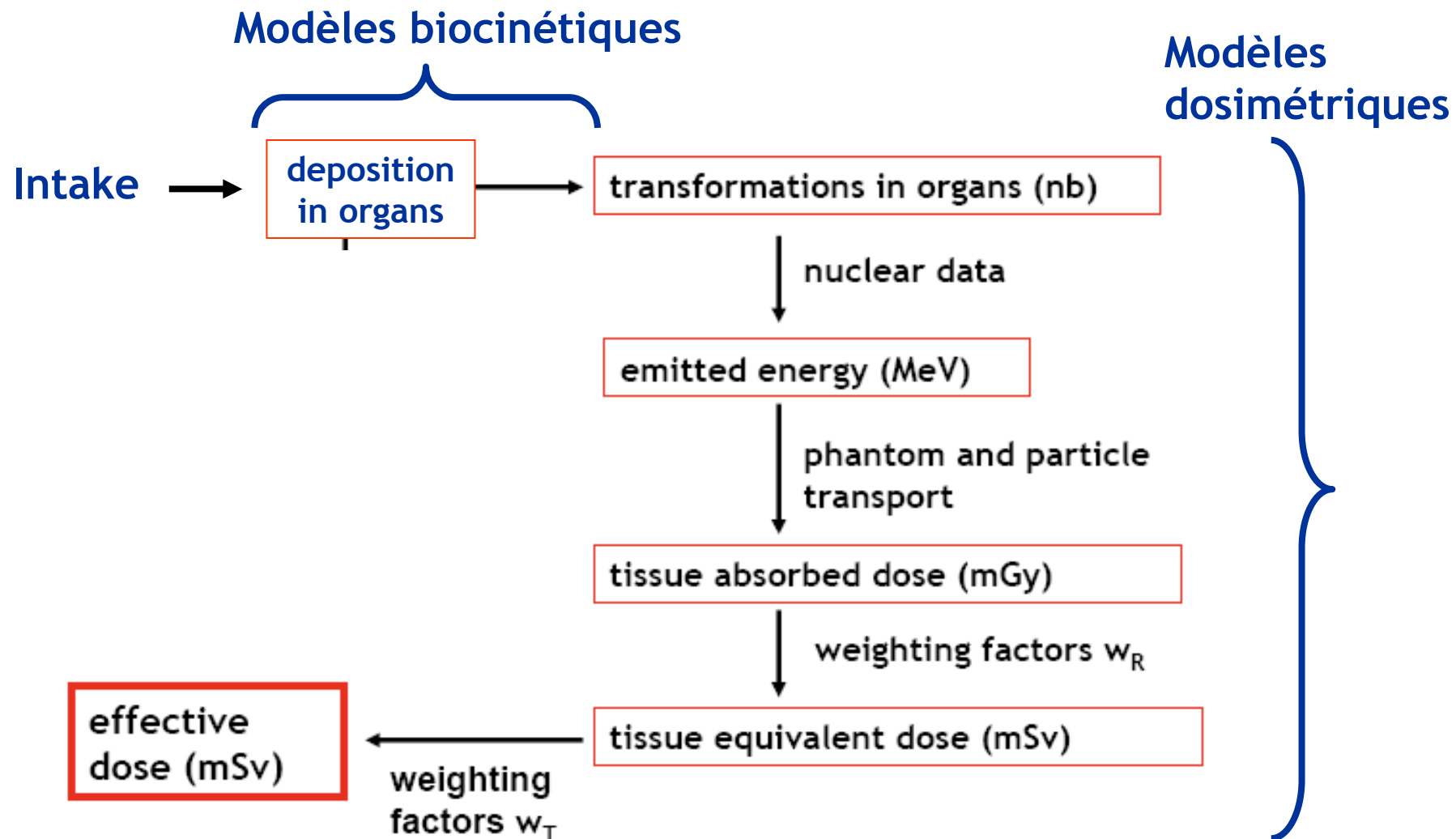


La méthode pour le calcul des doses après contamination

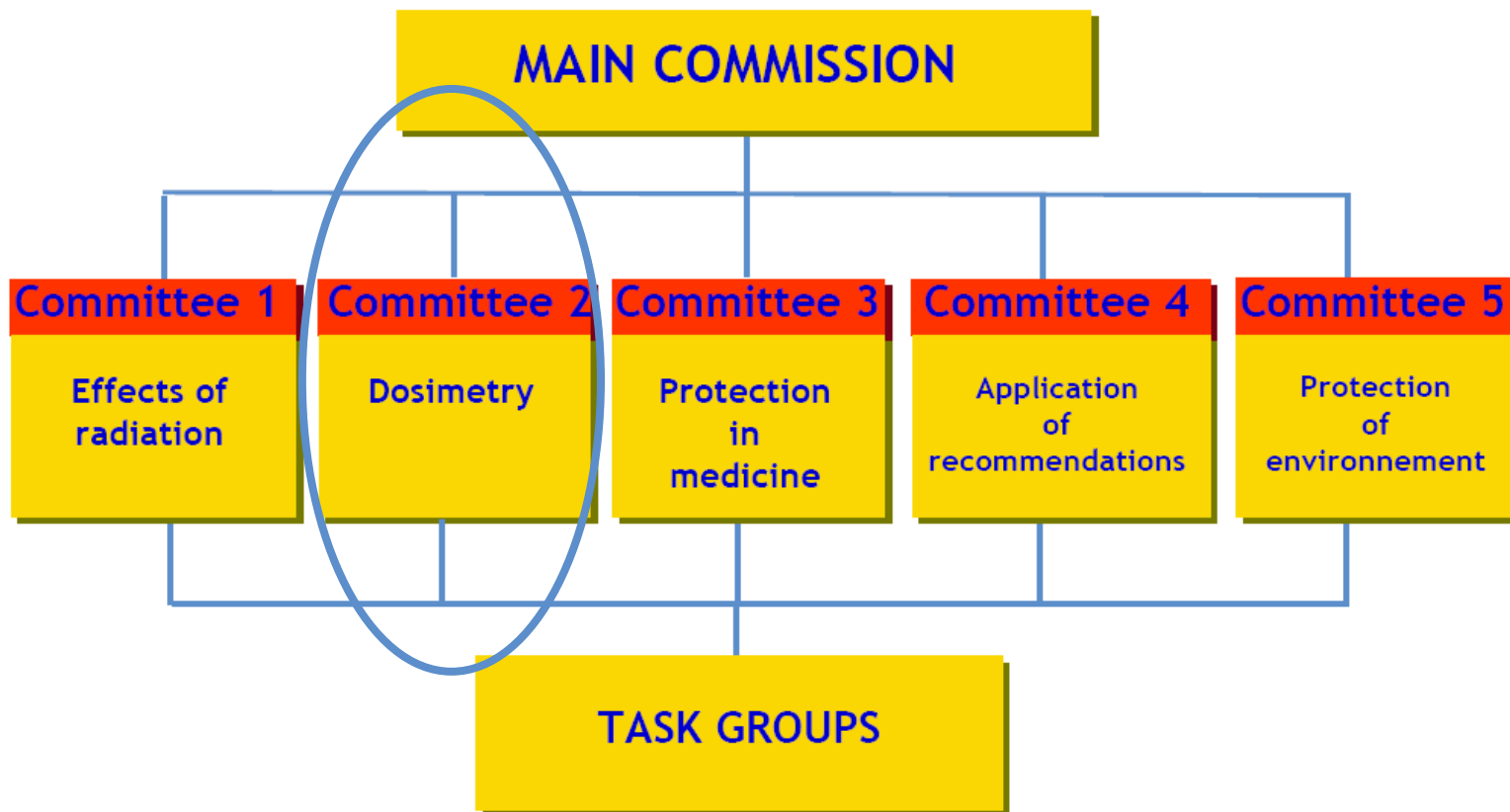


La méthode pour le calcul des doses après contamination

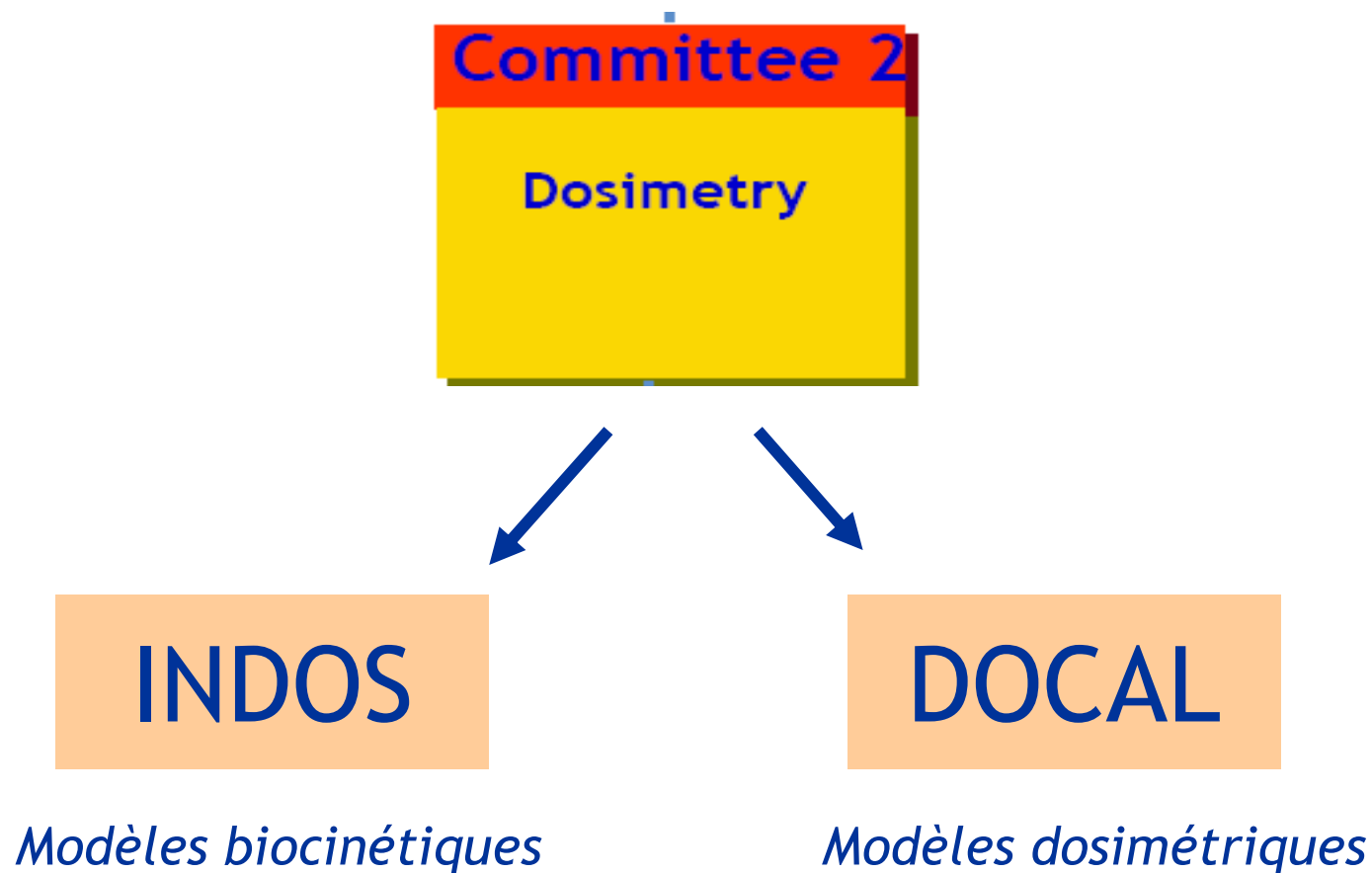




Les modèles biocinétiques et dosimétriques sont développés par la CIPR



Les modèles biocinétiques et dosimétriques sont développés par la CIPR



Les modèles biocinétiques

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



Indiquent quels organes sont irradiés

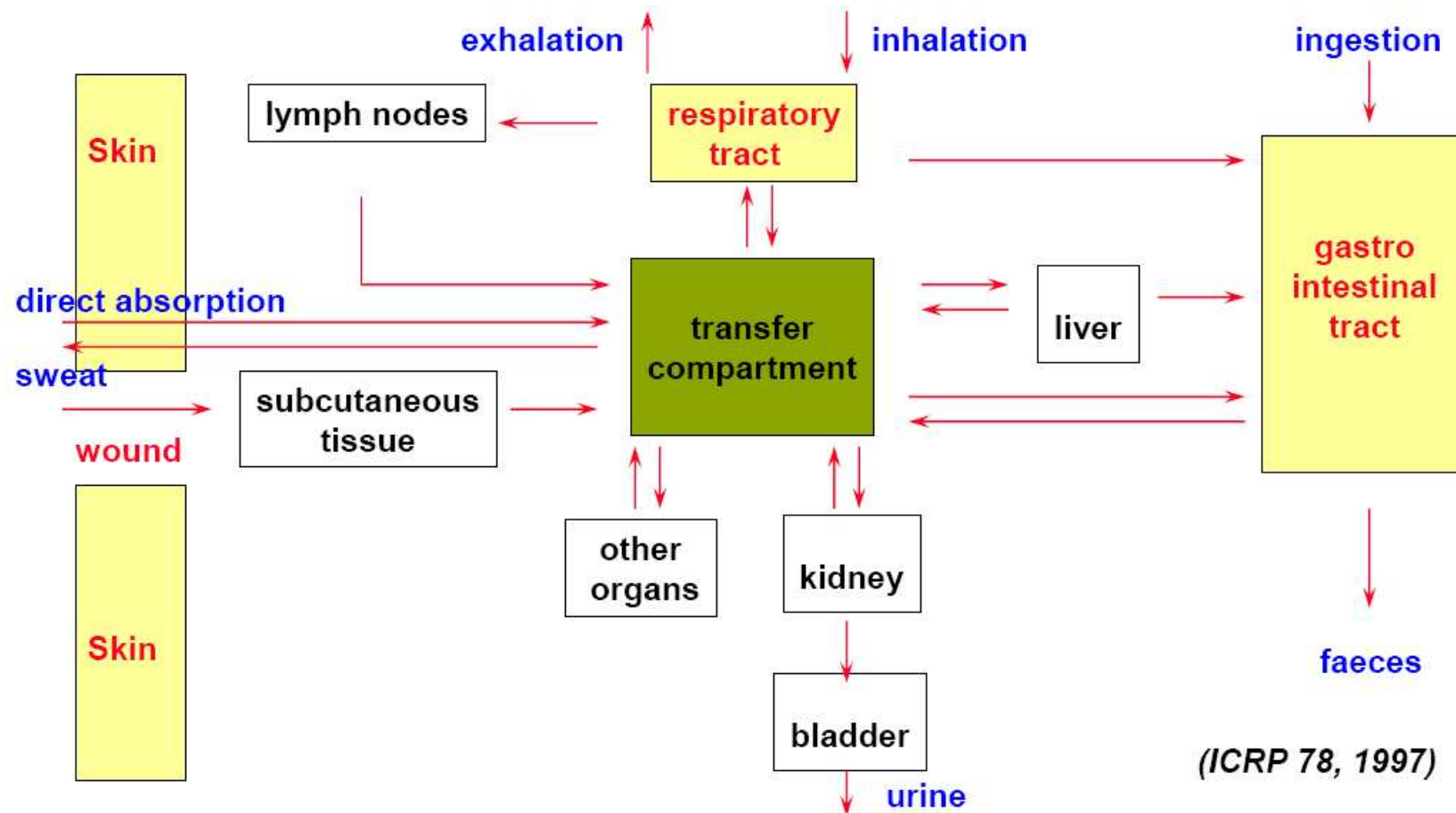


Indiquent combien de temps ils sont irradiés

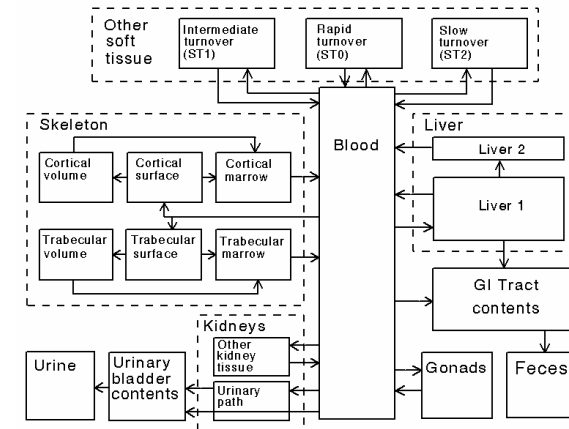


^{99m}Tc in human after scintigraphy

Modèle biocinétique générique



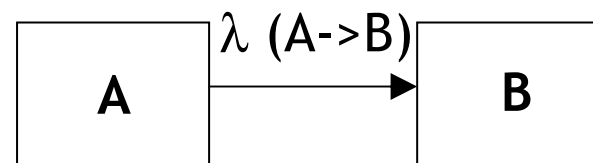
Modèle biocinétique générique



Un compartiment par tissu ou état métabolique

Transferts entre compartiments modélisés selon cinétiques du premier ordre

Système d'équations différentielles résolu avec un code de calcul



$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= -\lambda A \\ \frac{dB}{dt} &= +\lambda A \end{aligned}$$

Les modèles biocinétiques

Les modèles biocinétiques sont présentés pour différentes voies d'incorporation

- *Chaine alimentaire* *Human Alimentary Tract Model (HATM)*
- *Inhalation* *Human Respiratory Tract Model (HRTM)*
- *Blessure* *Wound model*

et pour la

- *distribution et excrétion après translocation*
 Systemic models

Le modèle alimentaire humain

L'ancien modèle

Local irradiation

$$\text{Dose} = \frac{0.5 v}{M} \quad \begin{array}{l} M: \text{masse of region content} \\ v = 1 \text{ for electrons} / 0.01 \text{ for alpha particles} \end{array}$$

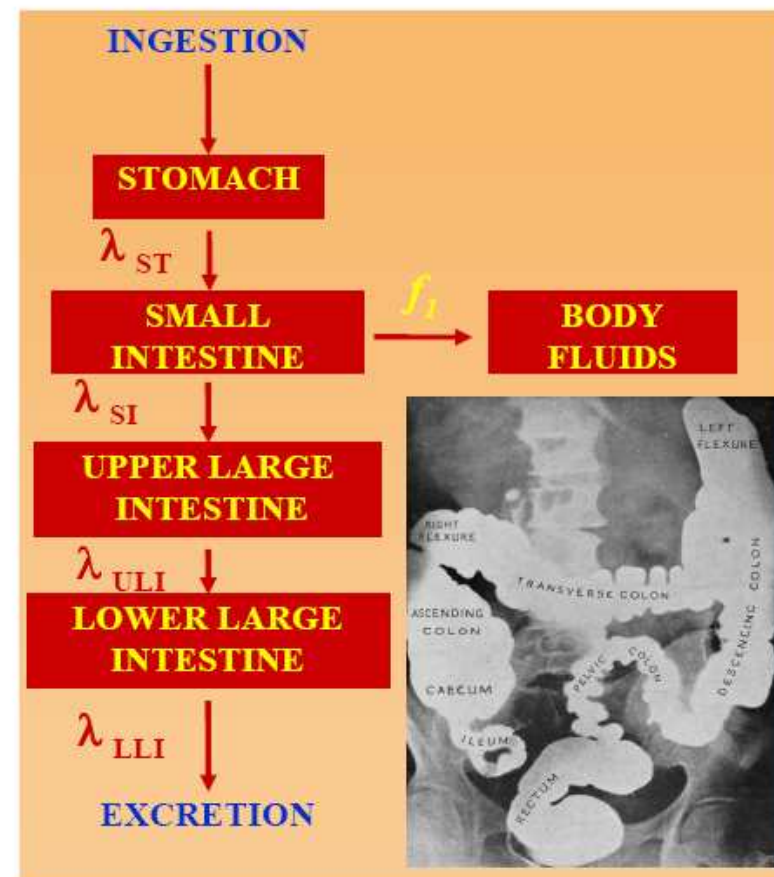
Limits to this model

Some compartments/transfers are missing :

- absorption in mouth, stomach
- retention on teeth, intestinal wall
- secretion from other compartments
- doses to oesophagus and colon (w_T in ICRP 60)

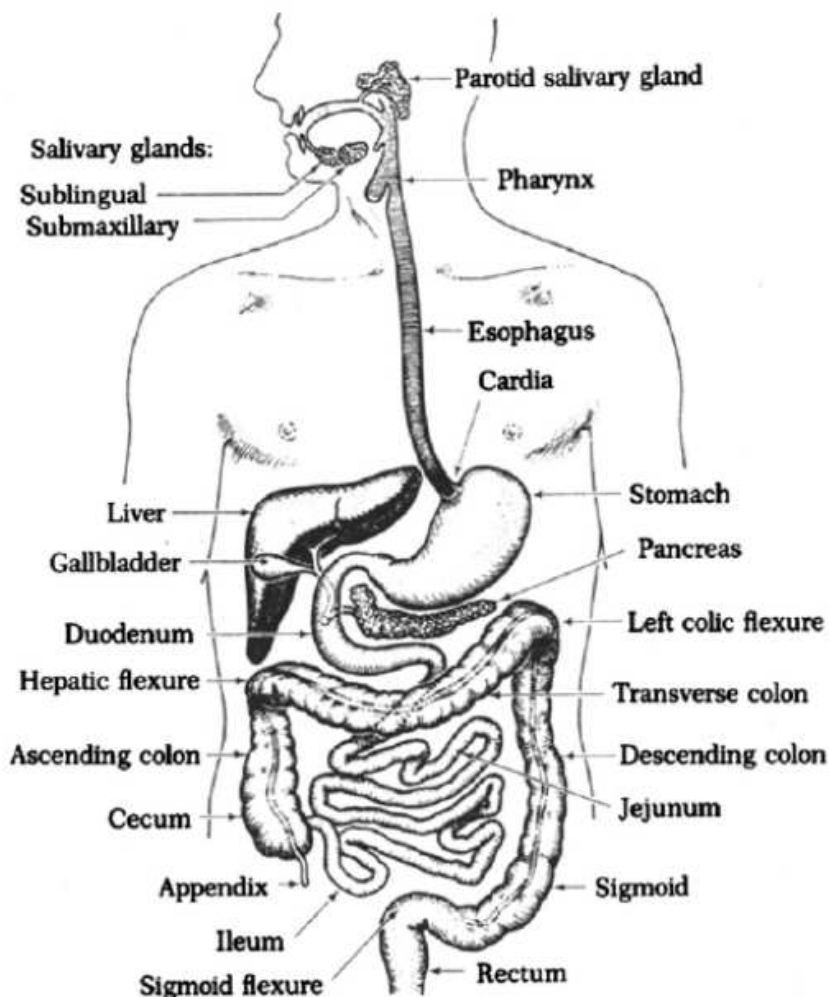
New data

age-dependent transit times
location of sensitive cells



Le modèle alimentaire humain

A new alimentary tract model (2006)



Annals of the ICRP

ICRP PUBLICATION 100

Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection

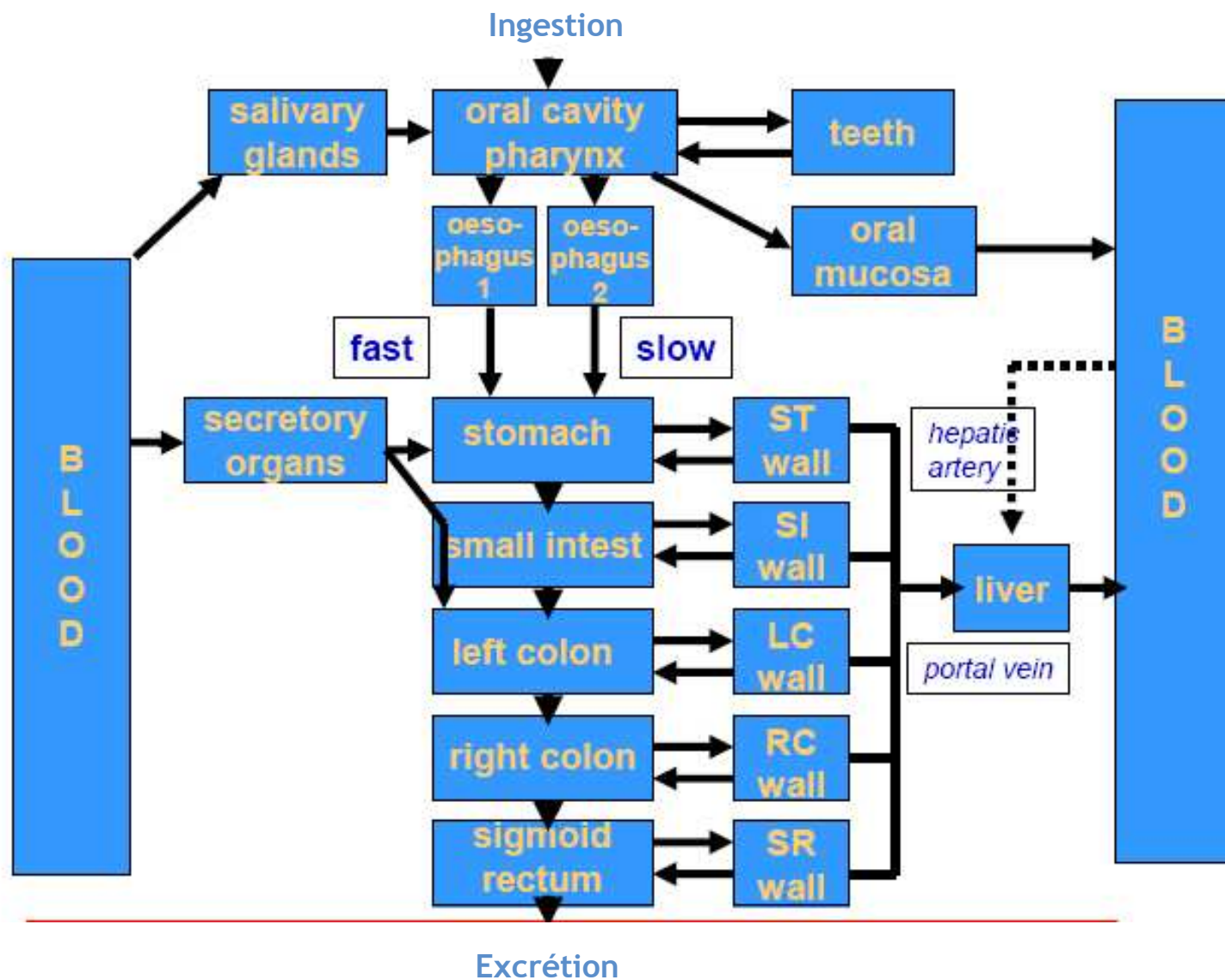
Editor
J. VALENTIN

PUBLISHED FOR
The International Commission on Radiological Protection

by

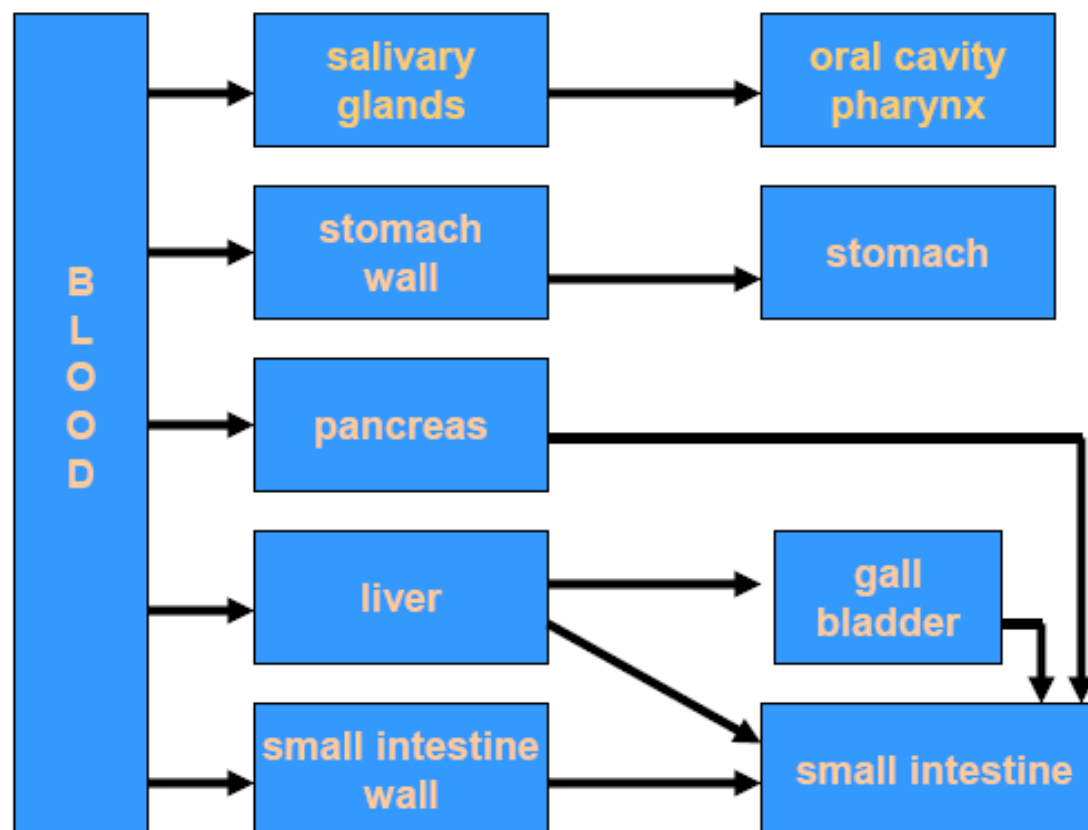


Le modèle alimentaire humain



Le modèle alimentaire humain

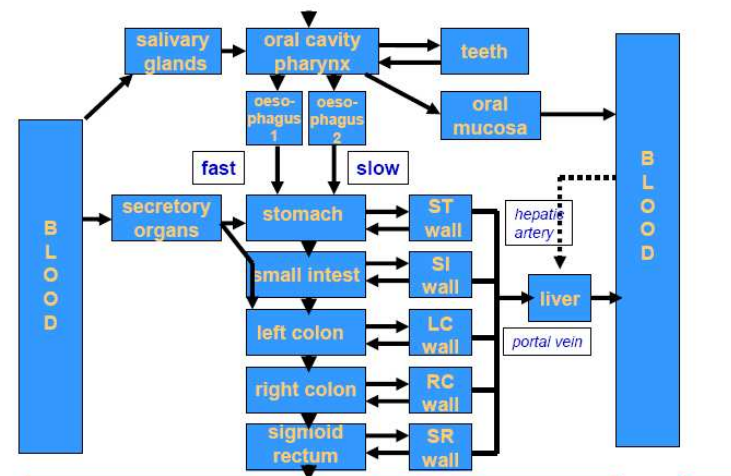
Routes of secretion



Le modèle alimentaire humain

Les principaux facteurs qui influencent la dose délivrée

- l'absorption et la rétention des radionucléides
- les vitesses de transfert dans le TGI
- la position des cellules cibles
- ..



Le modèle alimentaire humain

1. L'absorption

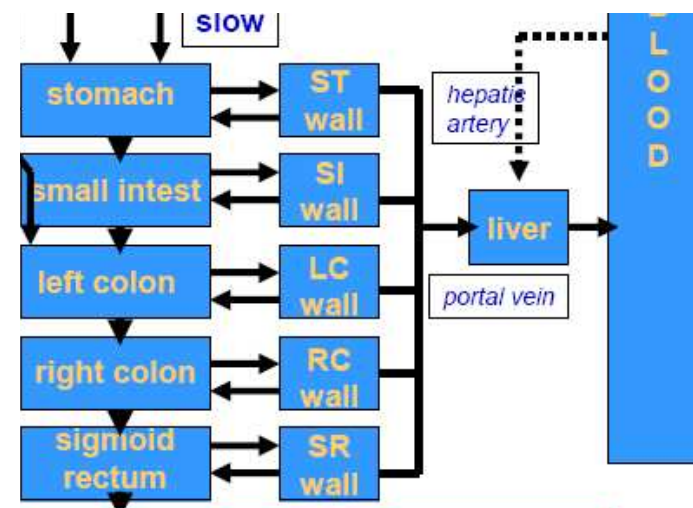
Absorption

f_1 becomes f_A : fraction absorbed into blood of activity entering the alimentary tract = sum of fractions absorbed in different regions

$$f_A = \sum_i f_i$$

local transfer rate coefficients :

$$\lambda_{i,blood} = \frac{f_i \lambda_{i,i+1}}{1 - \sum_k f_k}$$



Le modèle alimentaire humain

1. L'absorption (exemples)

element	f_A	compounds
cobalt	0.1	unspecified compounds
	0.05	oxides, hydroxides, halides and nitrates
iodine	1	all compounds
caesium	1	all compounds
radium	0.2	all compounds
uranium	0.02	most hexavalent compounds, e.g. UF_6 , UO_2F_2 and $UO_2(NO_3)_2$
	0.02	less soluble compounds, e.g. UO_3 , UF_4 , UCl_4
	0.002	insoluble compounds, e.g. UO_2 et U_3O_8
plutonium	$5 \cdot 10^{-4}$	unspecified compounds
	$1 \cdot 10^{-4}$	insoluble oxides
americium	$5 \cdot 10^{-4}$	all compounds

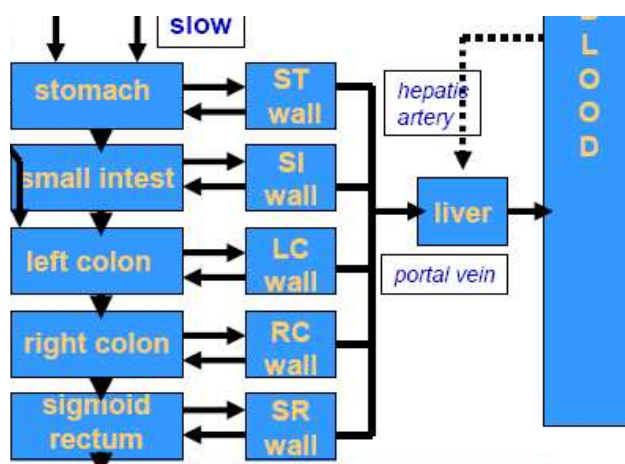
Le modèle alimentaire humain

2. Les vitesses de transit

- age-dependent
- sex-dependent
- solids, liquids and total diet

adult : total diet

mouth	oesophagus			stomach	SI	RC	LC	RS
	fast (90%)	slow (10%)						
12 s	7 s	40 s	male	70 m	4 h	12 h	12 h	12 h
			female	95 m	4 h	16 h	16 h	16 h



Le modèle alimentaire humain

2. Les vitesses de transit

- age-dependent
- sex-dependent
- solids, liquids and total diet

adult : total diet

mouth	oesophagus			stomach	SI	RC	LC	RS
	fast (90%)	slow (10%)						
12 s	7 s	40 s	male	70 m	4 h	12 h	12 h	12 h
			female	95 m	4 h	16 h	16 h	16 h

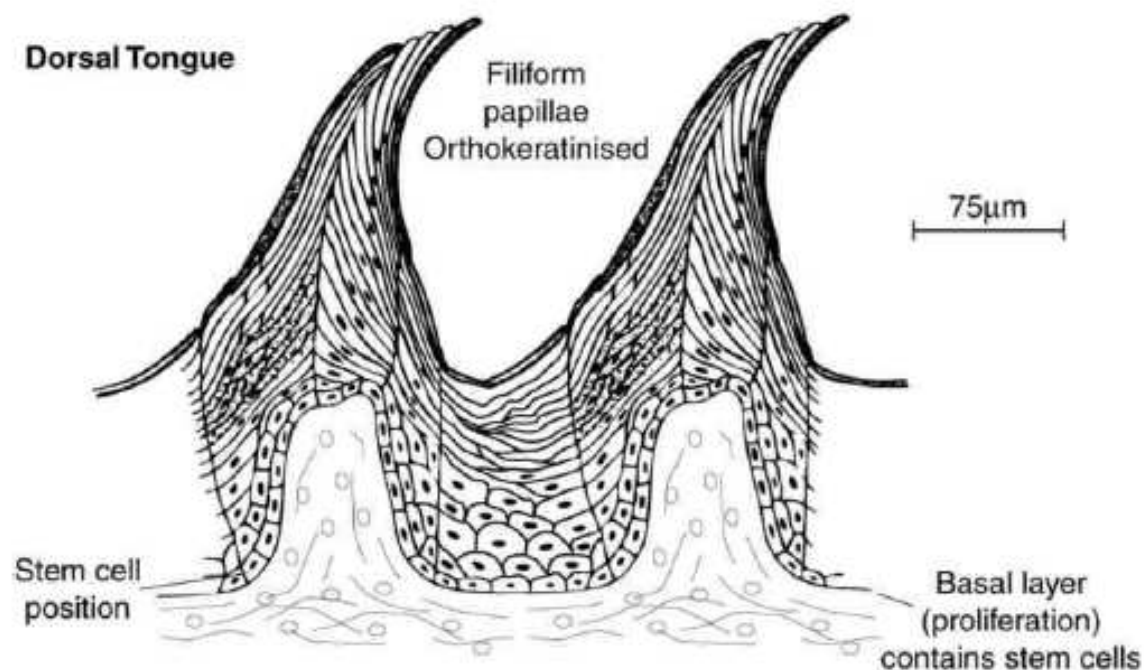
infant : milk

mouth	oesophagus			stomach	SI	RC	LC	RS
	fast (90%)	slow (10%)						
2 s	4 s	30 s	male	75 m	4 h	8 h	8 h	12 h
			female	75 m	4 h	8 h	8 h	12 h

Le modèle alimentaire humain

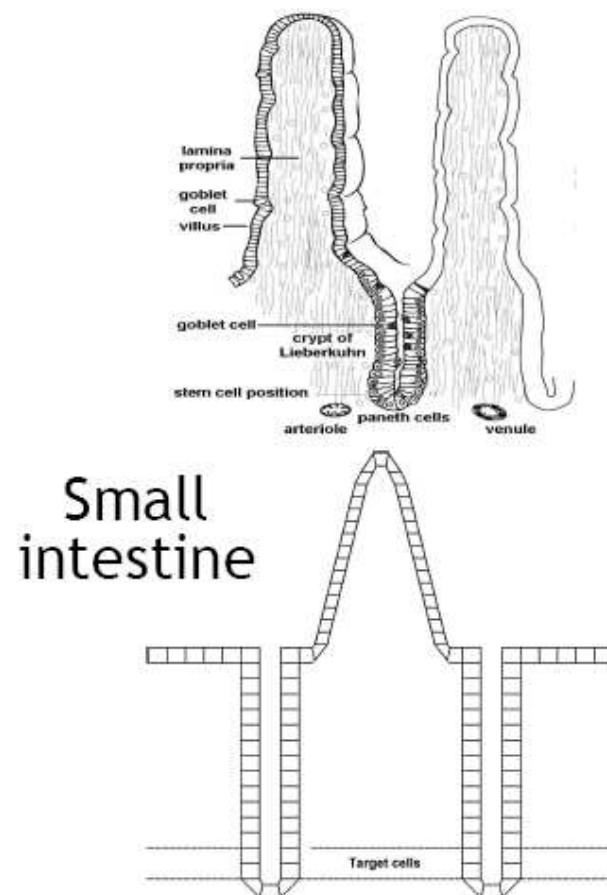
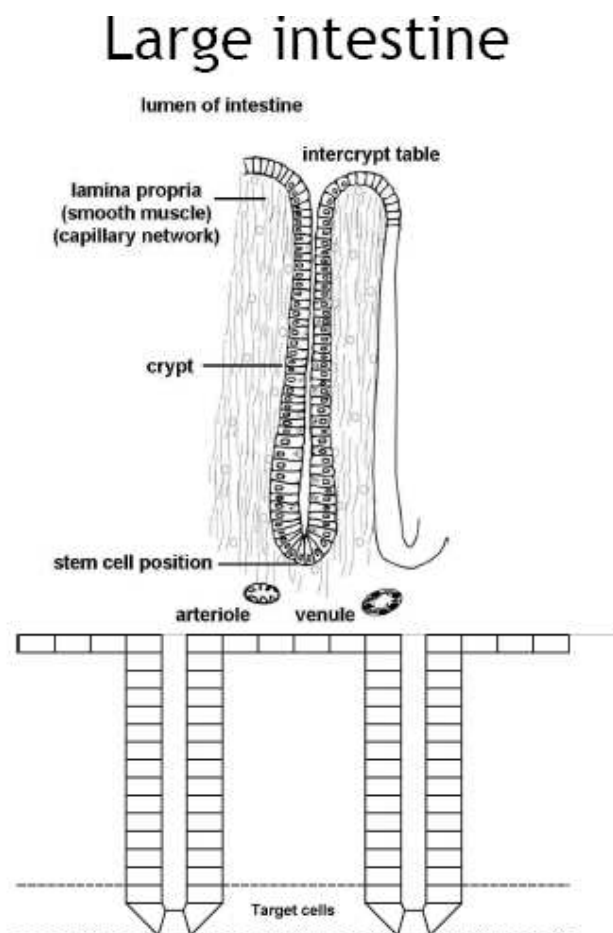
3. La position des cellules cibles

Stratified squamous epithelium - dorsal tongue



Le modèle alimentaire humain

3. La position des cellules cibles



Le modèle alimentaire humain

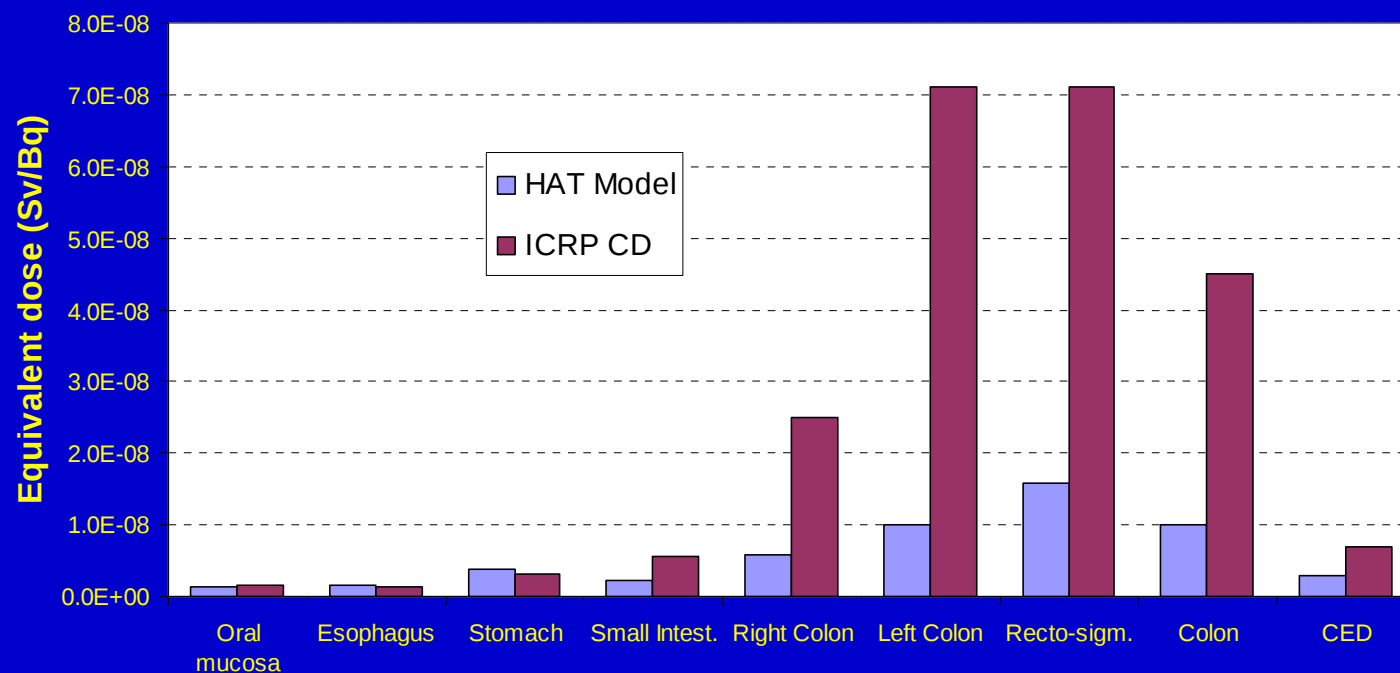
3. La position des cellules cibles

Target cell depths, μm

Mouth	190 - 200
Oesphagus	190 - 200
Stomach	60 - 100
Small intestine	130 - 150
Right Colon	280 - 300
Left Colon	280 - 300
Recto-sigmoid	280 - 300

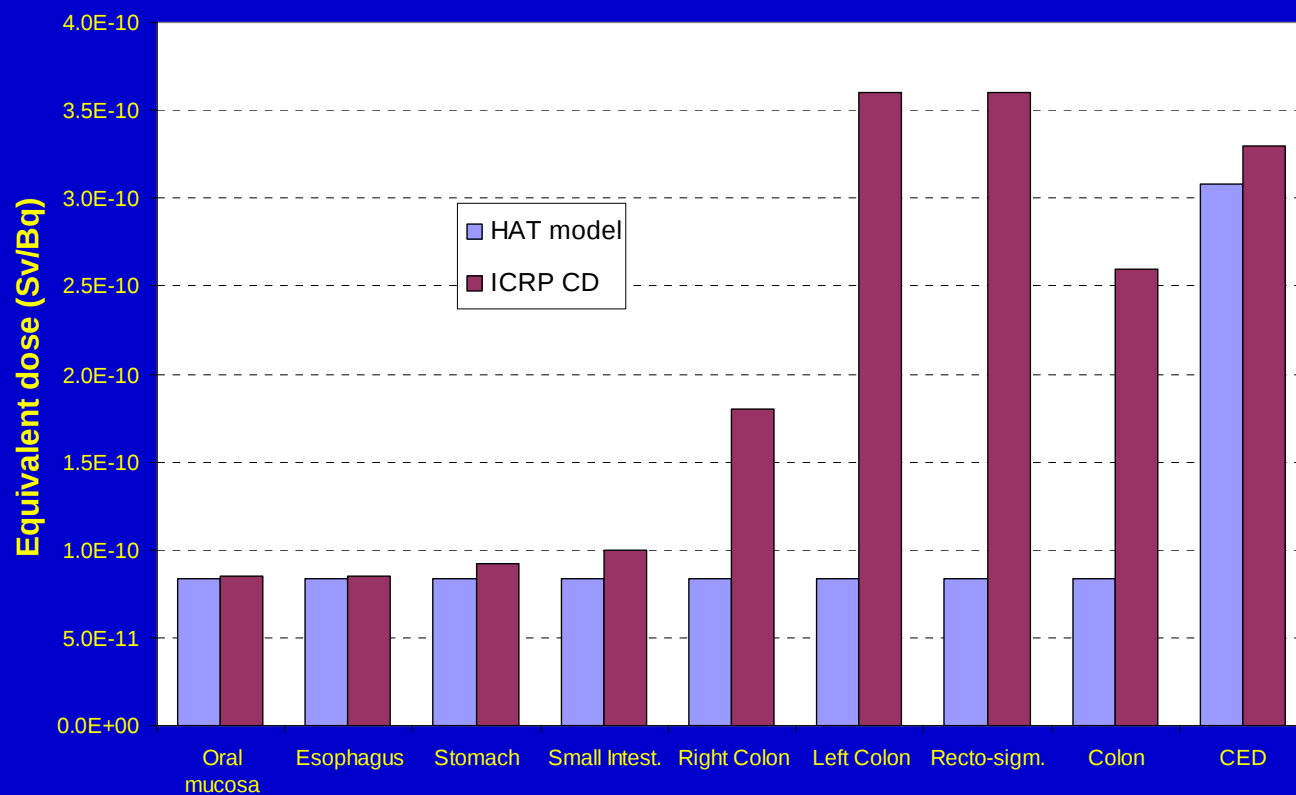
Le modèle alimentaire humain

Comparison of doses calculated using the HAT model and the ICRP 30 model for Ru-106



Le modèle alimentaire humain

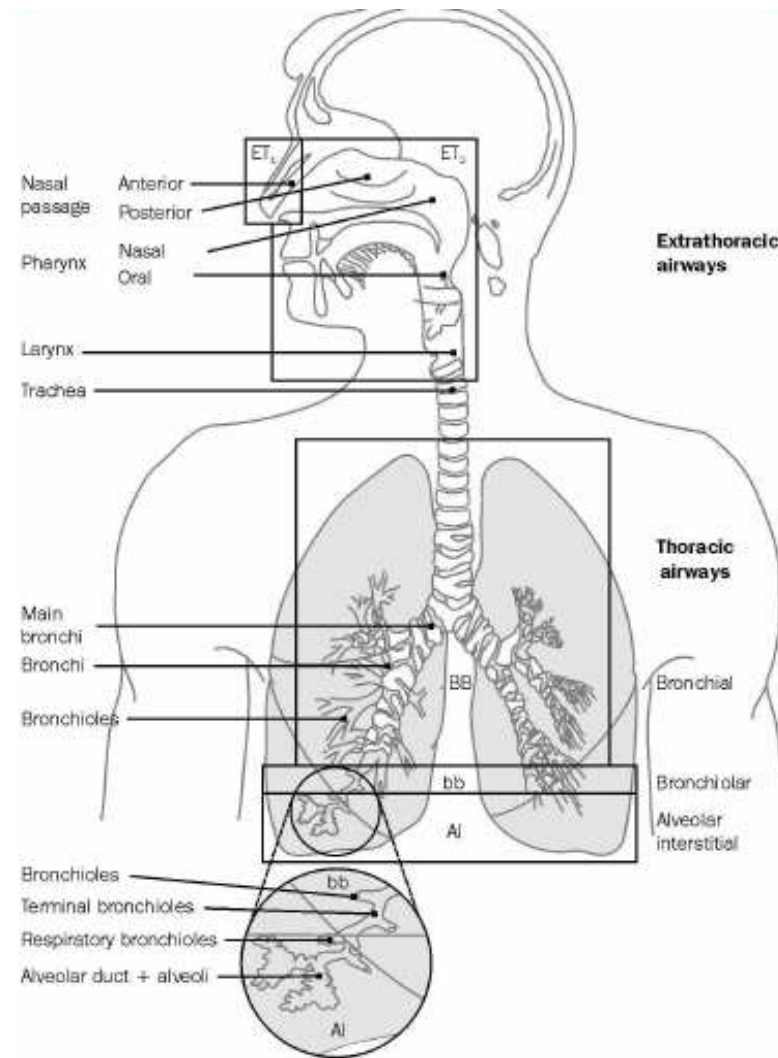
Comparison of doses calculated using the HAT model and the ICRP 30 model for Fe-55



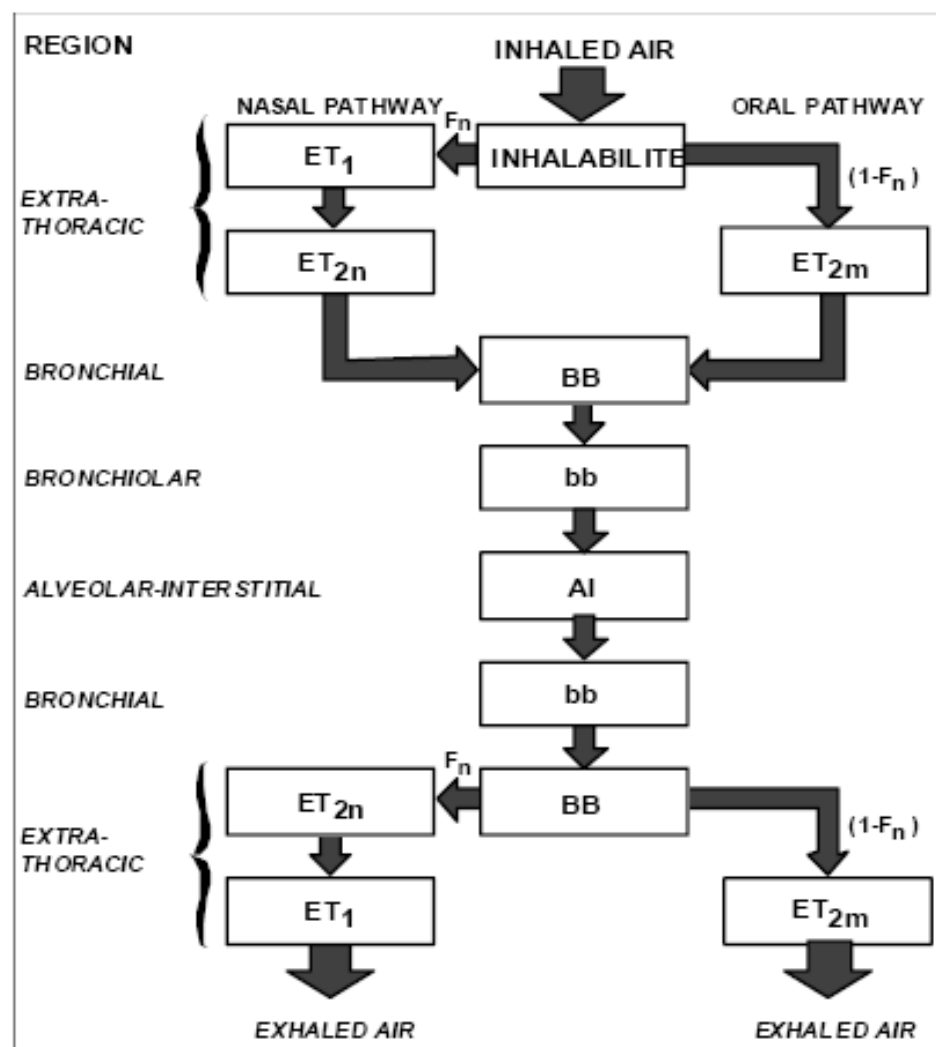
Le modèle respiratoire humain

The human
respiratory tract
model (ICRP
publication 66, 1994)

deposition, transport and
absorption of particles into
blood after inhalation



Le modèle respiratoire humain



Le modèle respiratoire humain

Les principaux facteurs qui influencent la dose délivrée

- le dépôt des radionucléides dans l'arbre respiratoire
- les modes de clairance
- la solubilité des particules
- la position des cellules cibles
- ..

Le modèle respiratoire humain

1. Le dépôt dans l'arbre respiratoire

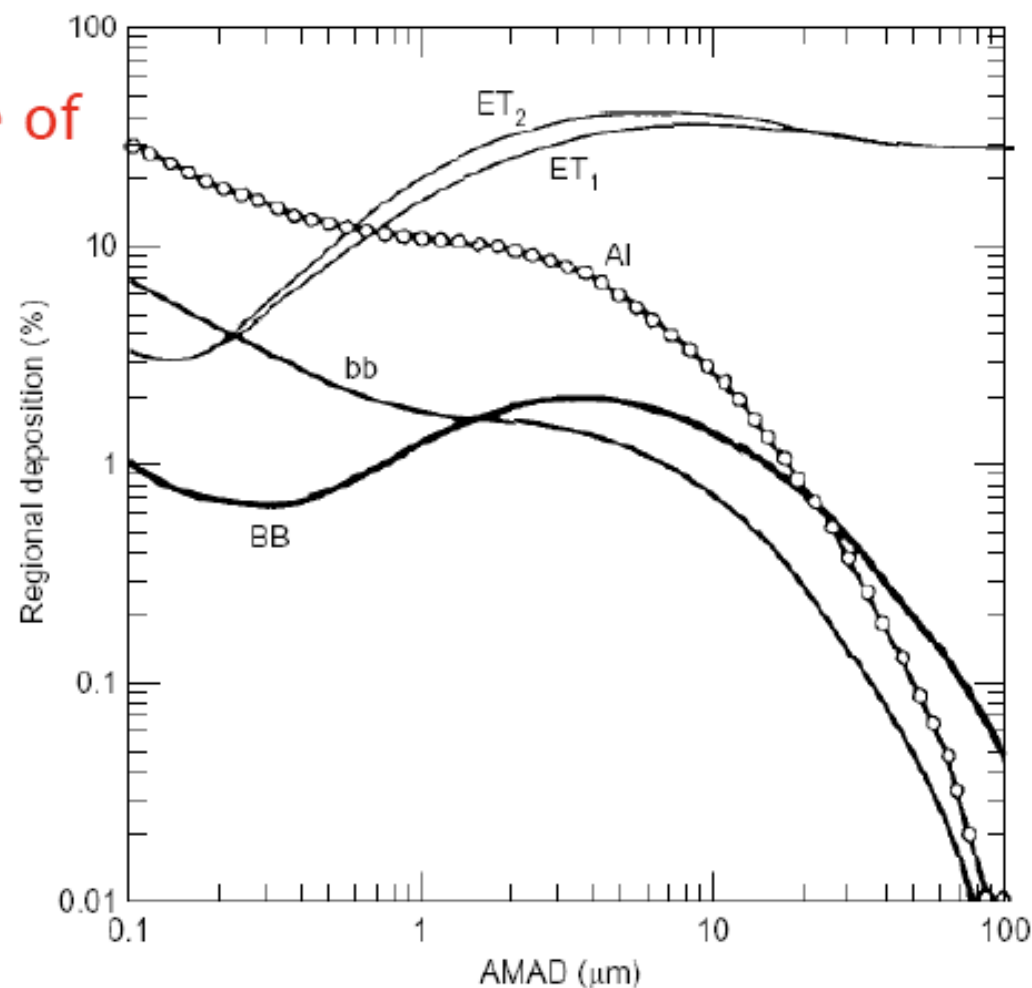
Dépend de

- diamètre (AMAD), densité et forme des particules
- taux de ventilation
- fraction inhalée par le nez
- paramètres physiologiques

Le modèle respiratoire humain

1. Le dépôt dans l'arbre respiratoire

Influence of
AMAD



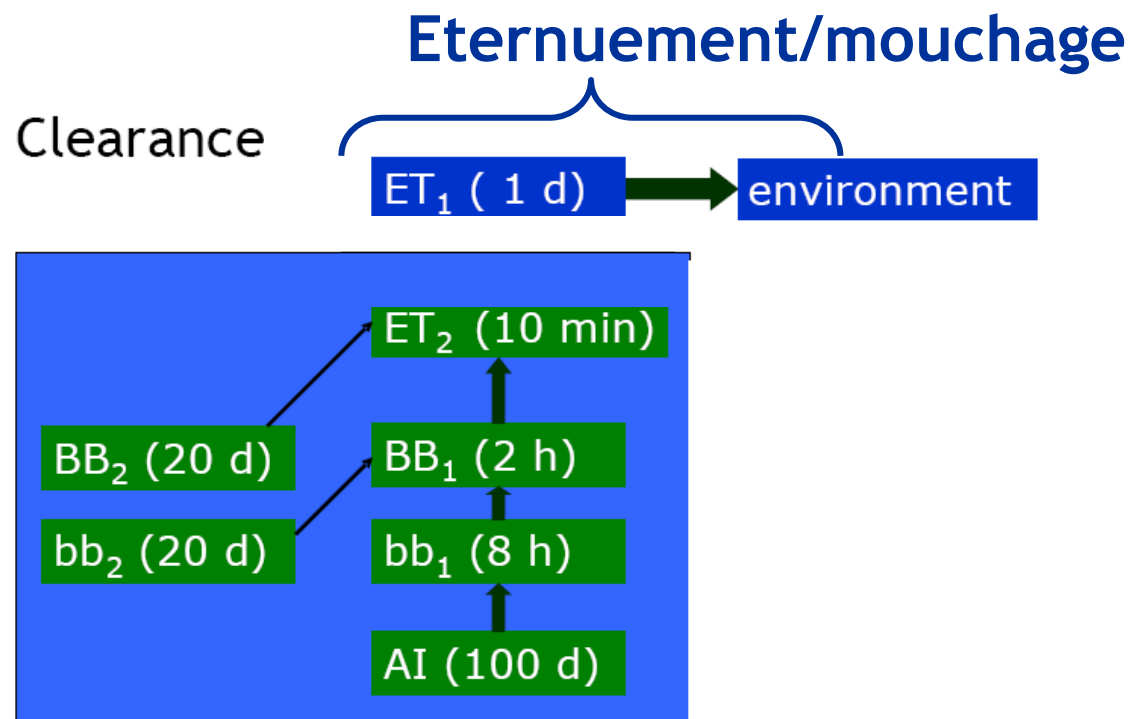
Le modèle respiratoire humain

2. La clairance

Différents modes de clairance, qui influencent grandement la dose délivrée

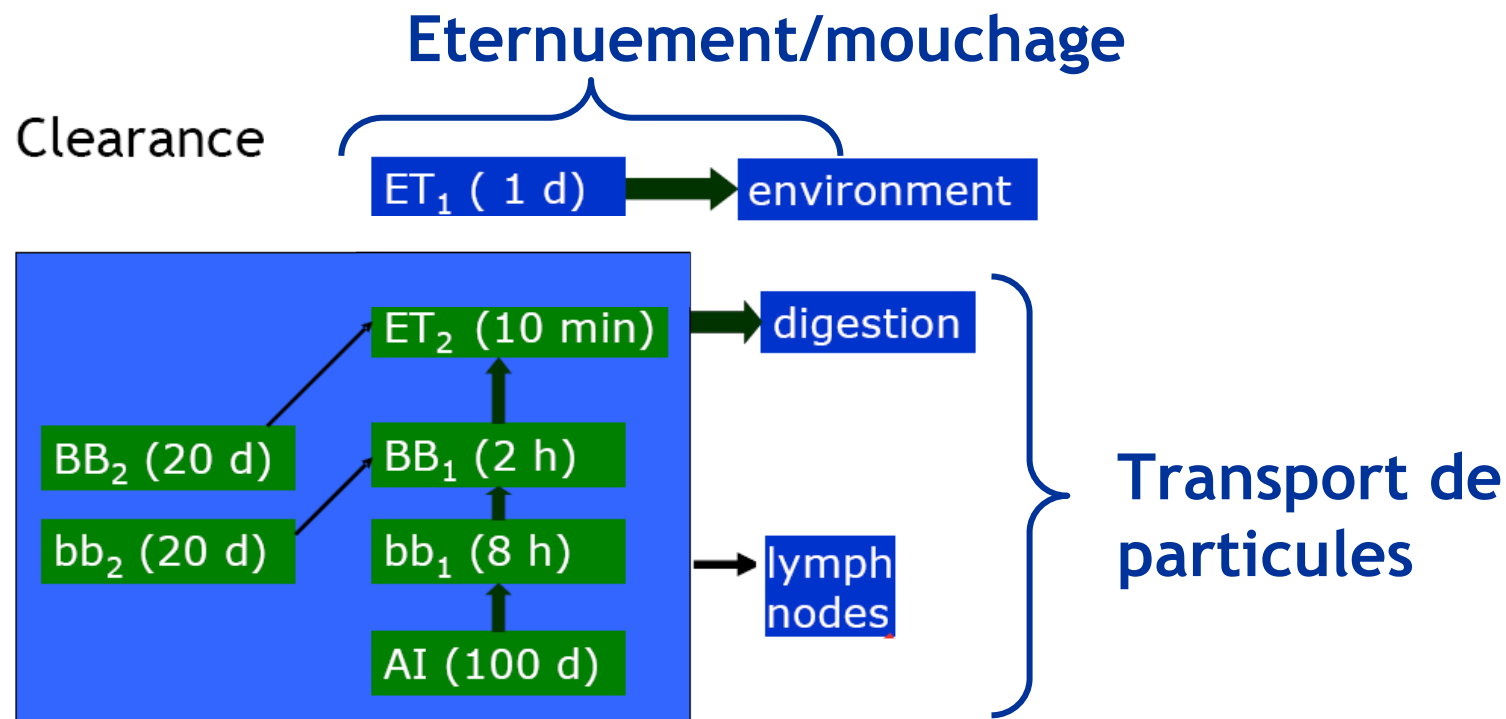
Le modèle respiratoire humain

2. La clairance



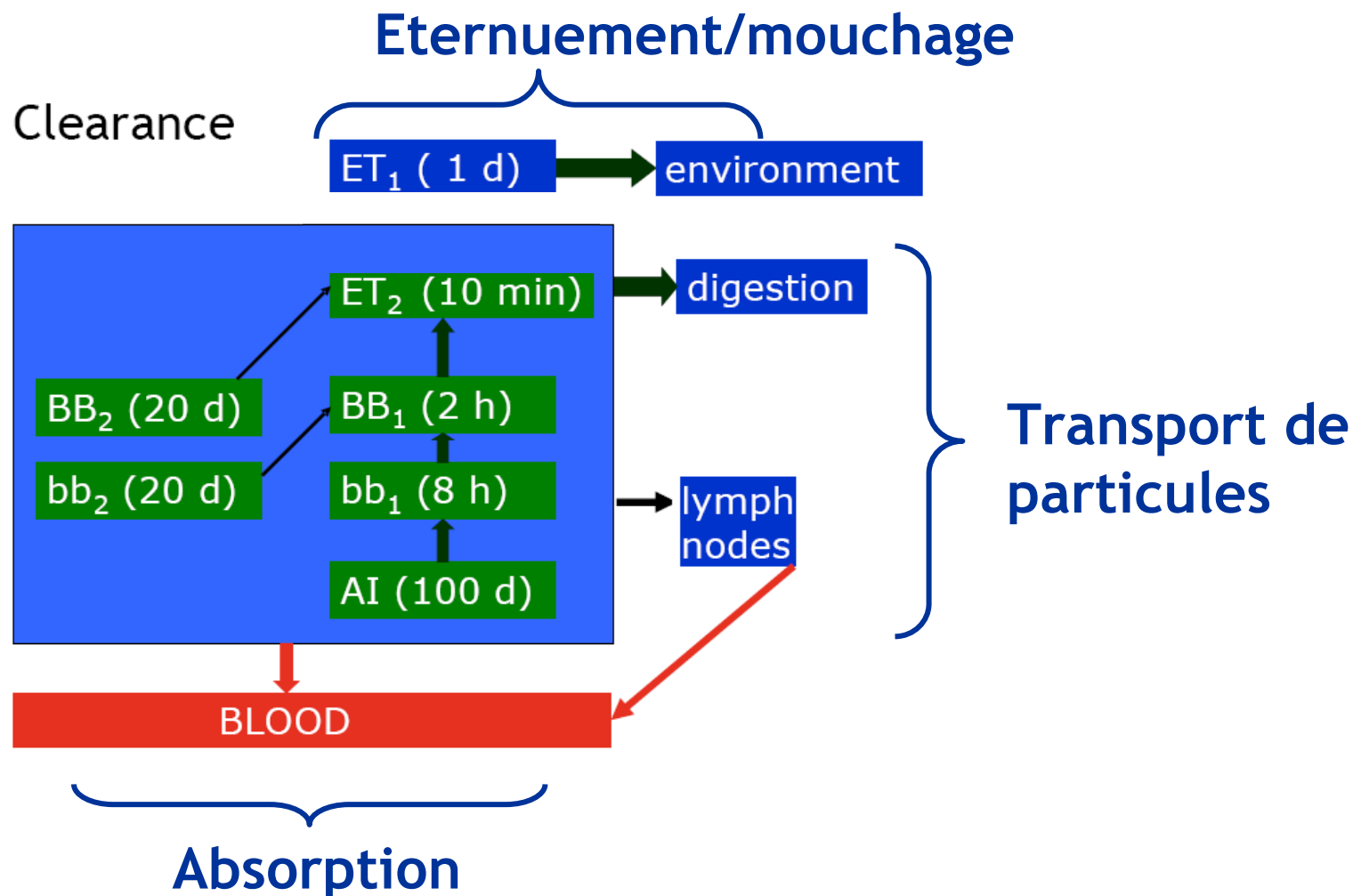
Le modèle respiratoire humain

2. La clairance



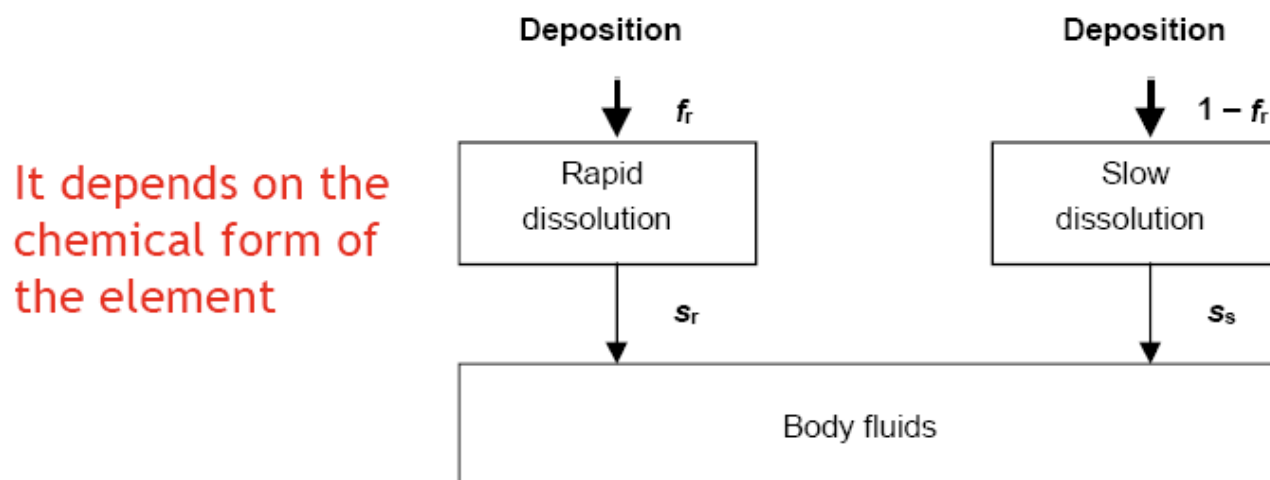
Le modèle respiratoire humain

2. La clairance



Le modèle respiratoire humain

2. La clairance par absorption et solubilité des particules



Type		F (fast)	M (moderate)	S (slow)
rapidly dissolved fraction	f_r	1	0.1	0.001
dissolution rates :				
rapid (d^{-1})	s_r	100	100	100
slow (d^{-1})	s_s	-	0.005	0.0001

default values of absorption parameters for compounds of types F, M and S

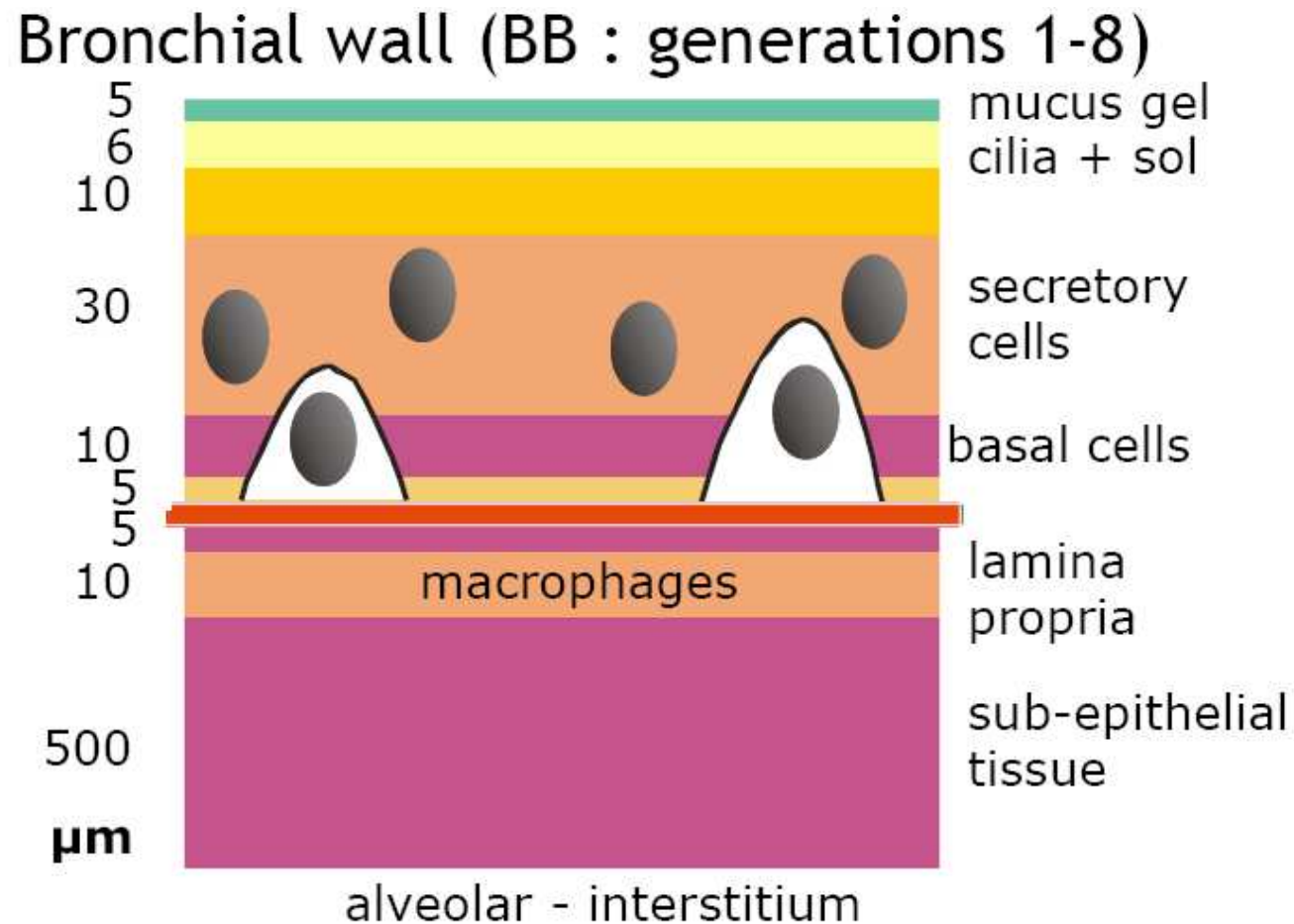
Le modèle respiratoire humain

2. La clairance par absorption et solubilité des particules

element	type	compounds
cobalt	M	unspecified compounds
	S	oxides, hydroxides, halides and nitrates
iodine	F	all compounds
caesium	F	all compounds
	M	oxides, hydroxides, halides, carbonates et nitrates
uranium	F	most of hexavalent compounds, e.g. UF_6 , UO_2F_2 and $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$
	M	less soluble compounds, e.g. UO_3 , UF_4 , UCl_4
	S	highly insoluble compounds, e.g. UO_2 and U_3O_8
plutonium	M	unspecified compounds
	S	insoluble oxides
americium	M	all compounds

Le modèle respiratoire humain

4. La position des cellules cibles



Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

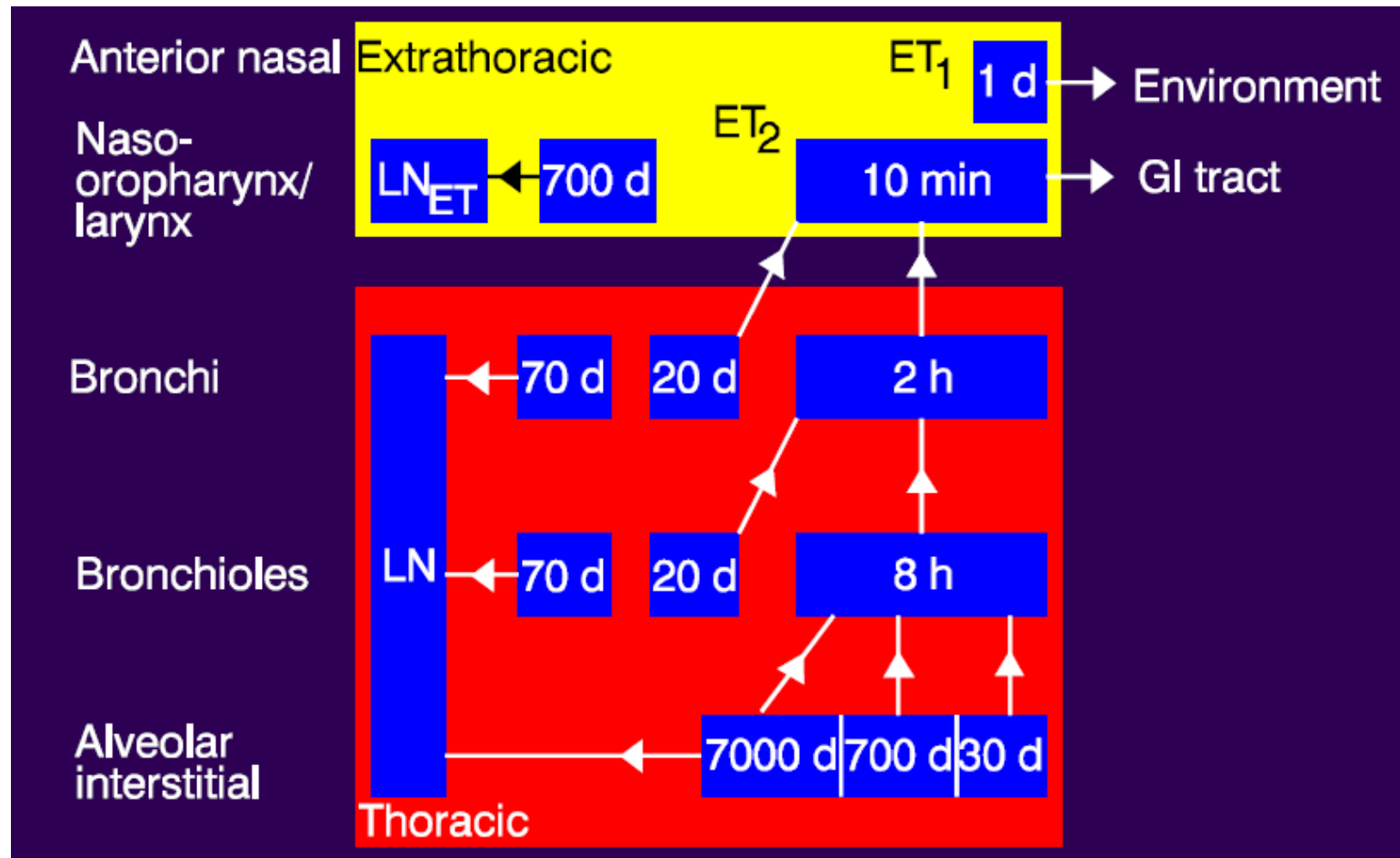
Portent surtout sur

- La clairance des compartiments ET1, BB, bb et AI
- L'adoption de valeurs d'absorption spécifiques aux composés

Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

1. La clairance du compartiment ET



Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

1. La clairance du compartiment ET

Insoluble ^{111}In labelled polystyrene latex (PSL) particles:
9 subjects inhaled $3\text{ }\mu\text{m}$ ^{111}In -labelled PSL sitting (at rest)
3 or 4 of the nine also inhaled

Aerosol size

Exercise level

1.5 μm

sitting at rest

3 μm

light exercise

6 μm

sitting at rest

6 μm

light exercise

Nose blows collected and measured

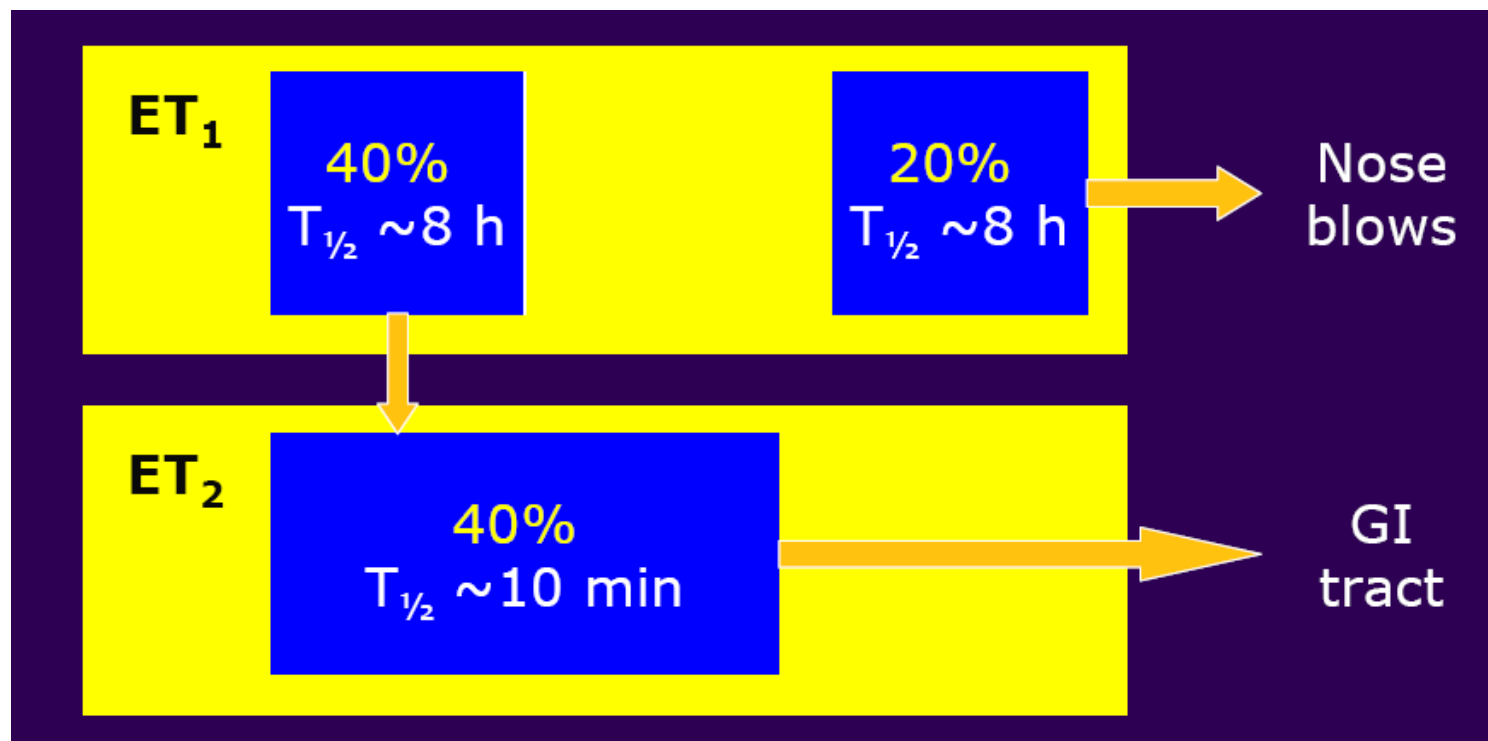
Retention in head followed

No effect of aerosol size or exercise

Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

1. La clairance du compartiment ET



Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

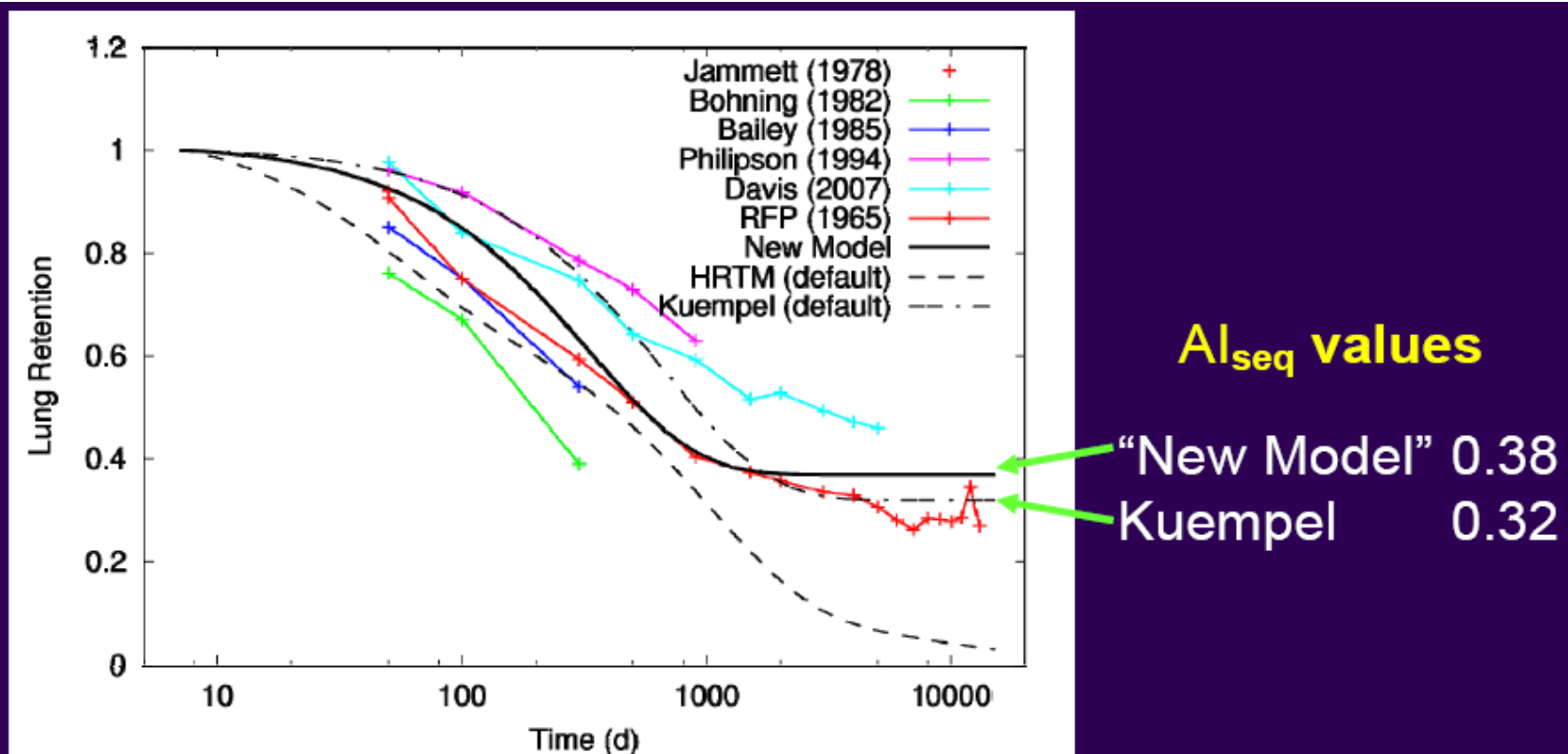
1. La clairance du compartiment alvéolaire

- Le Guen cobalt-60 study: Accidental intake, 15-year follow-up (Davis et al, 2007)
- Philipson et al 1996: experimental study (^{195}Au -labelled teflon) 900-day follow-up
- Kuempel et al (2001) autopsy study on US coal miners
- Rocky Flats Fire cases showing long term lung retention?

Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

1. La clairance du compartiment alvéolaire



Studies used in ICRP 1994, with HRTM default $Al_1:Al_2:Al_3 = 0.3:0.7:0.1$

Data from Philipson *et al* (1996), Davis *et al* (2007), RFP (1967, 2007).

Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

2. L'adoption de paramètres spécifiques pour l'absorption

Compound	Absorption parameter values			Type
	f_r	s_r (d ⁻¹)	s_s (d ⁻¹)	
Default Type F	1.0	100		
<i>Uranyl nitrate, UO₂(NO₃)₂</i>	0.9	3	0.005	(F)
<i>U-Tri-butyl-phosphate</i>	0.97	12	0.002	(F)
<i>Uranium peroxide hydrate</i>	0.9	0.9	0.024	(F)
Default Type M	0.1	100	0.005	
<i>Ammonium diuranate, ADU</i>	0.8	0.7	0.02	(M)
<i>Uranium tetrafluoride</i>	0.6	0.15	0.005	(M)
<i>Uranium trioxide</i>	0.8	1	0.01	(M)
<i>U₃O₈</i>	0.04	1	0.004	(M)
Default Type S	0.001	100	0.0001	
<i>Uranium dioxide</i>	0.015	1	0.0005	(S)

Le modèle respiratoire humain

Les modifications en cours du modèle respiratoire

2. L'absorption vers le sang

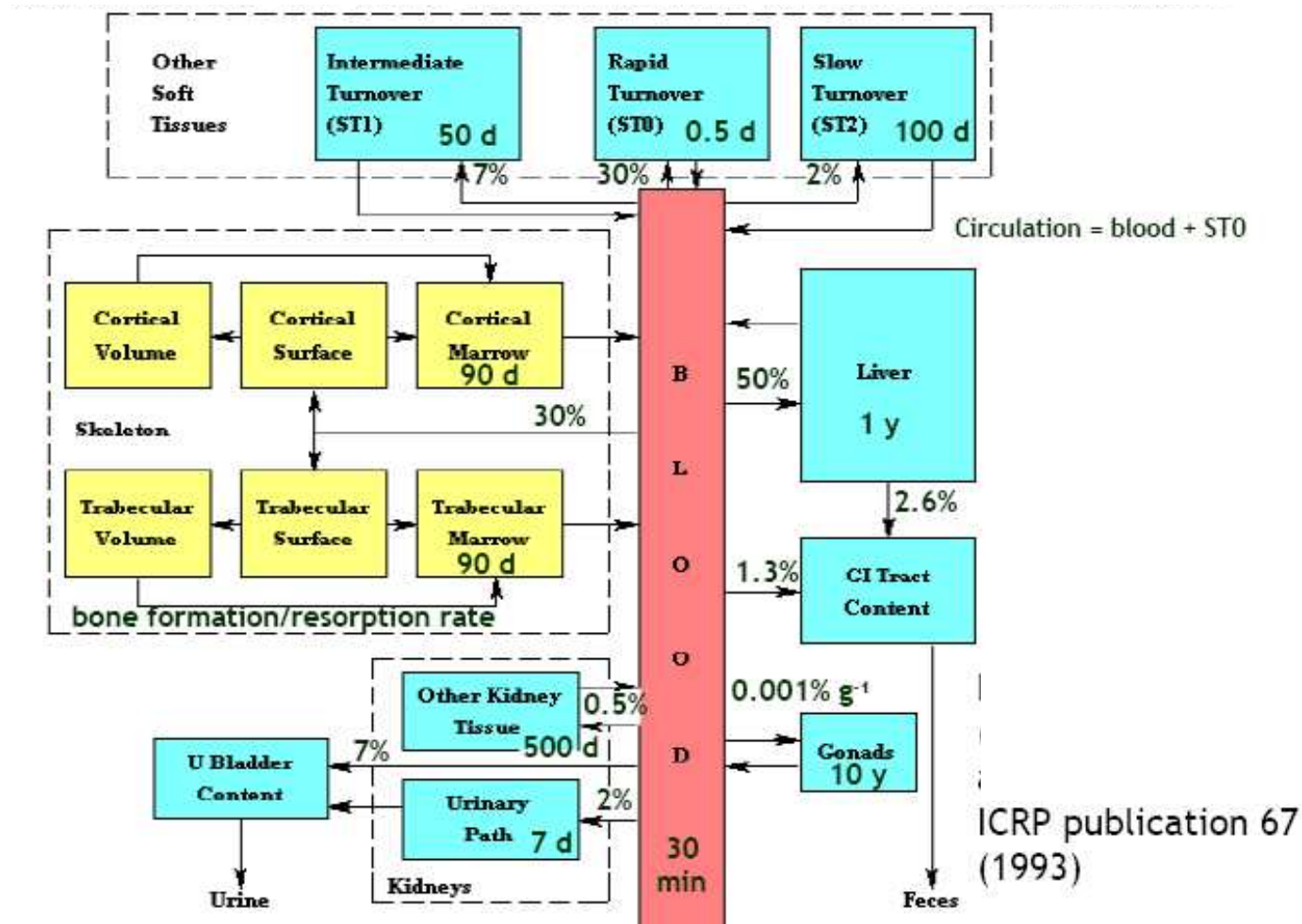
	N		f_r	s_r (d ⁻¹)	s_s (d ⁻¹)
Type F		<i>Default</i>	<i>1.00</i>	<i>100</i>	
	16	GM	0.98	15	
Type M		<i>Default</i>	<i>0.1</i>	<i>100</i>	<i>0.005</i>
	24	GM	0.21	1	0.0026
Type S		<i>Default</i>	<i>0.001</i>	<i>100</i>	<i>0.0001</i>
	14	GM	0.009	3	0.00008

Element-specific rapid rate s_r ?

Les modèles systémiques

Les modèles systémiques

Structure du modèle humain de l'américium



Les modèles systémiques

Paramètres du modèle humain de l'américium

transfer rates (d⁻¹)

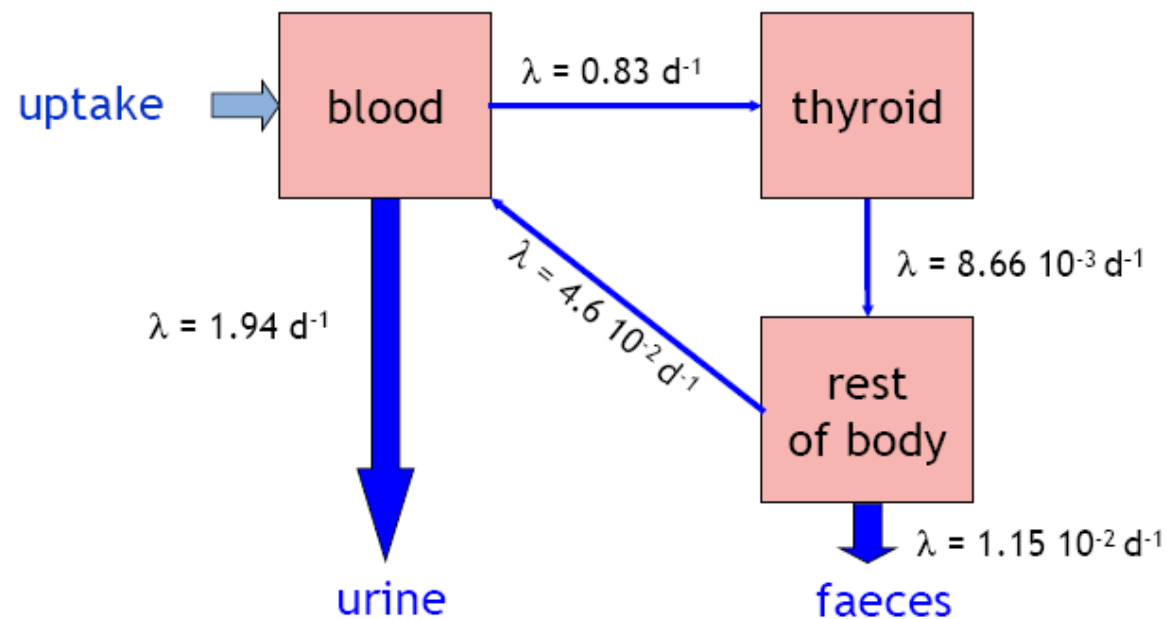
$\lambda(\text{blood} \rightarrow \text{tissue}) = \text{outflow rate from circulation} \times \text{fraction entering the tissue}$

$\lambda(\text{tissue 1} \rightarrow \text{tissue(s) 2}) = \ln(2) / \text{removal half-time}$

blood -> liver	11.6	ST0 -> blood	1.39
blood -> ST0	10.0	ST1 -> blood	1.39E-02
blood -> ST1	1.67	ST2 -> blood	1.90E-05
blood -> ST2	0.466	cortical surface -> marrow	8.21E-05
blood -> cortical surface	3.49	cortical surface -> cortical volume	4.11E-05
blood -> trabecular surface	3.49	cortical volume -> marrow	8.21E-05
blood -> U path	0.466	marrow -> blood	7.60E-03
blood -> ULI content	0.303	trabecular surface -> marrow	4.93E-04
blood -> other kidney tissue	0.116	trabecular surface -> trabecular volume	2.47E-04
blood -> testes	8.20E-03	trabecular volume -> marrow	4.93E-04
blood -> ovaries	2.60E-03	U path -> UB content	9.90E-02
blood -> UB content	1.63	other kidney tissue -> blood	1.39E-03
liver -> blood	1.85E-03	gonads -> blood	1.90E-04
liver -> SI content	4.90E-05		

Les modèles systémiques

Structure du modèle humain de l'iode



Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30, 54, 68, 78 (1982-1997), sur l'exposition des travailleurs

Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30, 54, 68, 78 (1982-1997), sur l'exposition des travailleurs

Données biocinétiques, coefficients de dose et fonctions d'excrétion pour 40 éléments

(H, C, Na, Mg, P, S, K, Ca, Fe, Co, Ni, Zn, Zr, Se, Nb, Mo, Tc, Ag, Ru, Sb, Sr, Ir, Y, Cs, I, Te, Ba, Ce, Pb, Bi, Po, Ra, U, Th, Np, Pu, Am, Cm, Cf + Rn)

OIR Part 1 et 2 ICRP Publication 2011 et 2012

Les autres éléments dans partie 3, à paraître en 2014

Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30 (1982), 54 (1988), 68 (1995), 78 (1997) sur l'exposition des travailleurs
2. Réviser les modèles et publications 56, 67, 69, 71, 72 (1989-1996) sur l'exposition des membres du public

Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30 (1982), 54 (1988), 68 (1995), 78 (1997) sur l'exposition des travailleurs
2. Réviser les modèles et publications 56, 67, 69, 71, 72 (1989-1996) sur l'exposition des membres du public

**Modèles et coefficients de dose, en fonction de l'âge pour
≈ 40 éléments**

Prévu pour 2013 et +

Les travaux en cours à INDOS

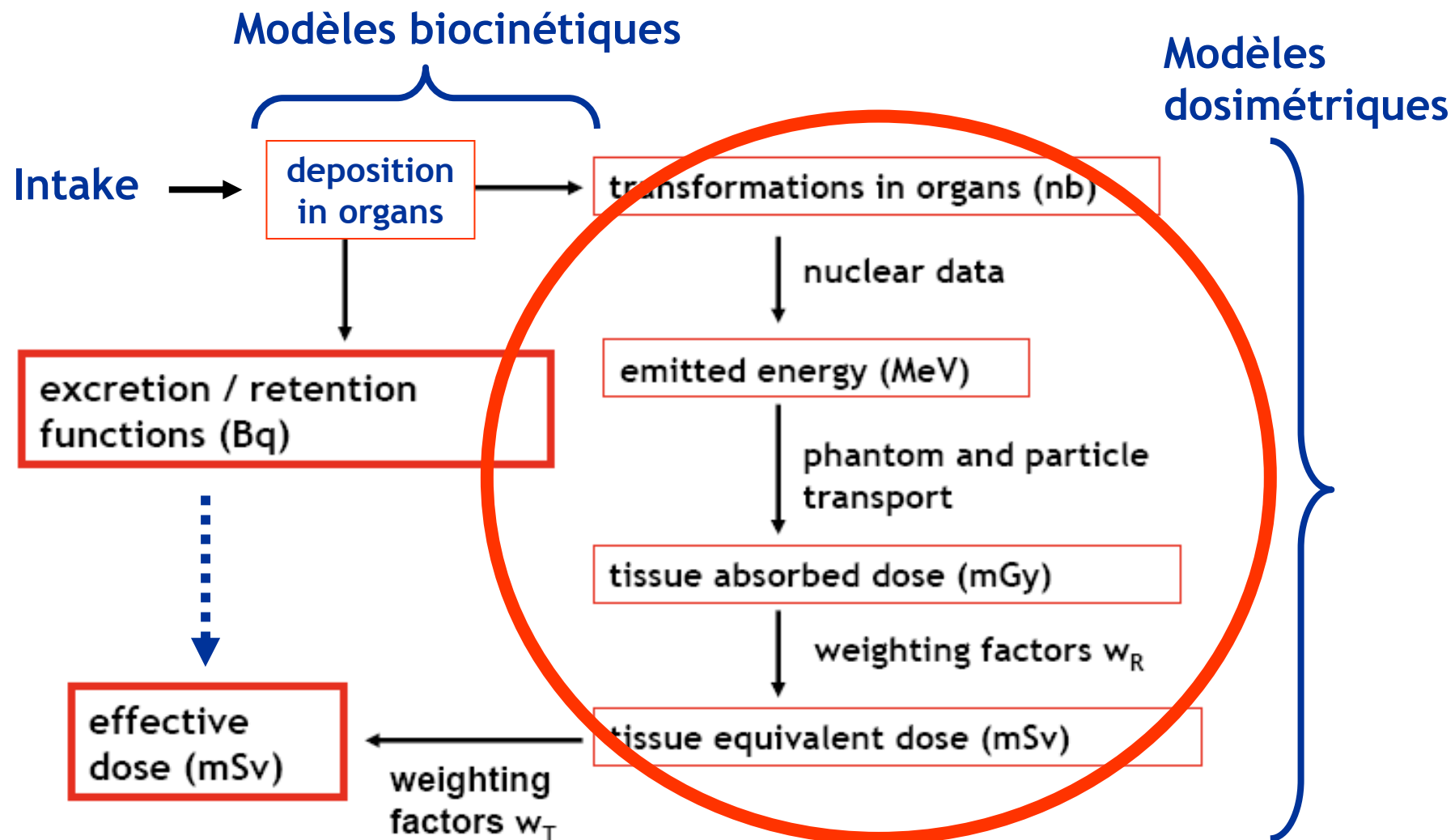
1. Réviser les modèles et publications 30 (1982), 54 (1988), 68 (1995), 78 (1997) sur l'exposition des travailleurs
2. Réviser les modèles et publications 56, 67, 69, 71, 72 (1989-1996) sur l'exposition des membres du public
3. **Intégrer les nouvelles données du modèle alimentaire**

Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30 (1982), 54 (1988), 68 (1995), 78 (1997) sur l'exposition des travailleurs
2. Réviser les modèles et publications XX sur l'exposition des membres du public
3. Intégrer les nouvelles données du modèle alimentaire
4. **Modifier quelques paramètres du modèle respiratoire**

Les travaux en cours à INDOS

1. Réviser les modèles et publications 30 (1982), 54 (1988), 68 (1995), 78 (1997) sur l'exposition des travailleurs
2. Réviser les modèles et publications XX sur l'exposition des membres du public
3. Intégrer les nouvelles données du modèle alimentaire
4. Modifier quelques paramètres du modèle respiratoire
- 5. Définir un modèle blessure**



Les modèles dosimétriques

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

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

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

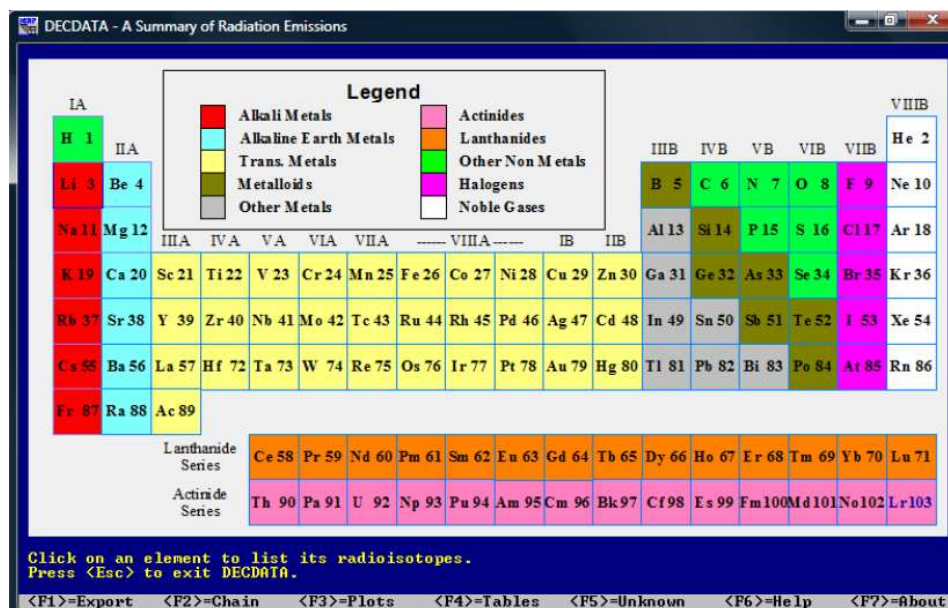
$$S(r_T \leftarrow r_S, T_P, G) = \sum_i E_i Y_i \Phi(r_T \leftarrow r_S, T_P, G, E_i)$$

Les modèles dosimétriques

1. Besoin des données de décroissance radioactive
2. Besoin de développer des fantômes pour la représentation des géométries des cibles et des sources
3. Besoin de calculer les SAF pour chacun des tissus

Les modèles dosimétriques

1. Les données de décroissance radioactive : ICRP 107



Révision de la publication CIPR 38 avec CD et logiciel (2008)

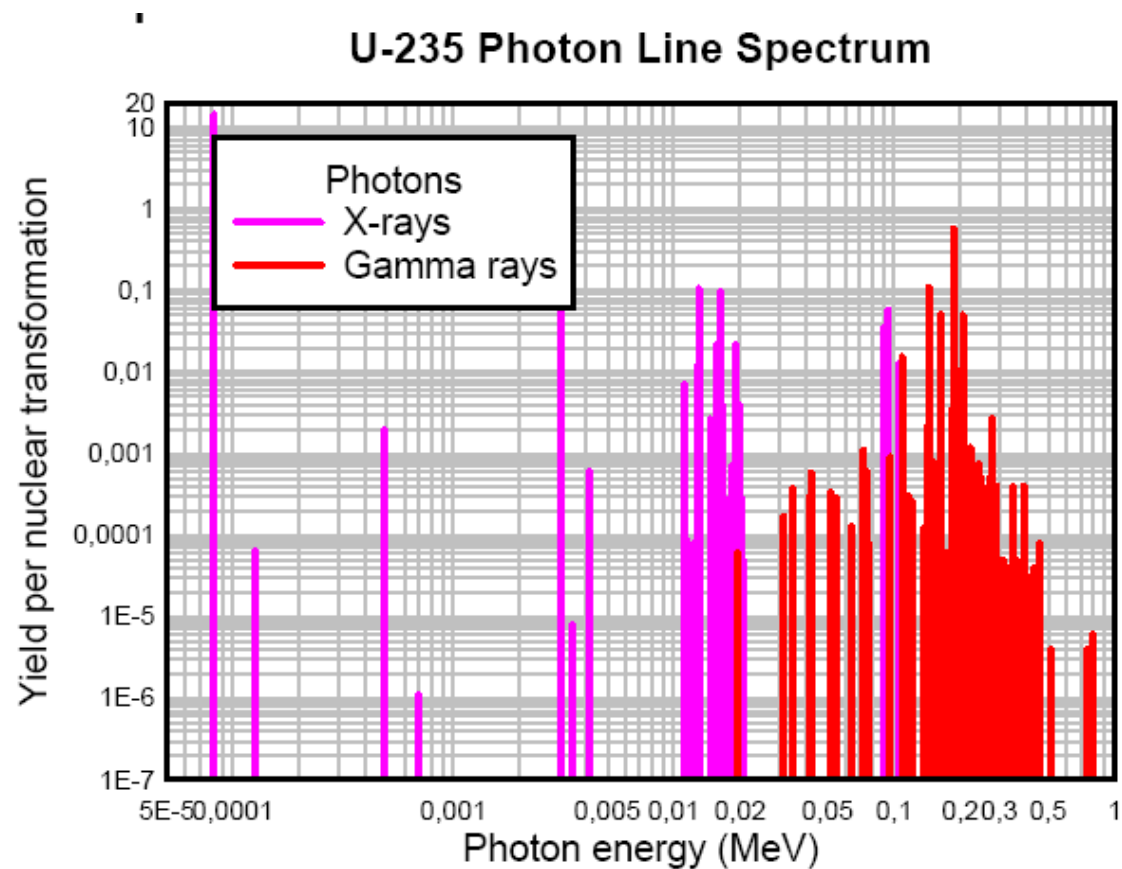
Schémas de décroissance, énergie et rendement des radiations émises pour 1252 radioisotopes (dont 330 périodes < 10 min) de 97 éléments

Spectres β , Auger- CK (136) et neutrons (28)

Débit de kerma dans l'air

Les modèles dosimétriques

1. Les données de décroissance radioactive : ICRP 107



Les modèles dosimétriques

1. Les données de décroissance radioactive : ICRP 107

ICRP DECDATA - A Summary of Radiation Emissions

Summary of U-235 Emissions

Half-Life : 7.04E+8 y
Decay Mode: α

SpA = 7.995E-05 IBq/kg
Data files: ICRP-07

Radioactive daughters & branching fractions
Th-231 1.000E+00

Radiation	Number Records	Yield $\sum Y_i$ </nt>	Energy $\sum Y_i E_i$ <MeU/nt>	Mean Energy $\sum Y_i E_i / \sum Y_i$ <MeU>	Delta <Gy kg/nt>
Gamma rays	61	8.364E-01	1.496E-01	1.789E-01	2.397E-14
X-rays	71	1.486E+01	1.727E-02	1.162E-03	2.767E-15
IC electrons	290	1.397E+00	4.431E-02	3.171E-02	7.099E-15
Auger electrons	15	1.215E+01	8.699E-03	7.160E-04	1.394E-15
Alpha particles	21	1.000E+00	4.393E+00	4.393E+00	7.039E-13
Alpha Recoil	21	1.000E+00	7.578E-02	7.578E-02	1.214E-14
Totals	479		4.609E+00		7.512E-13

Point Source Air Kerma Coefficient = 1.32E-17 Gy m²/Bq s
Air Kerma-Rate Constant = 1.32E-17 Gy m²/Bq s

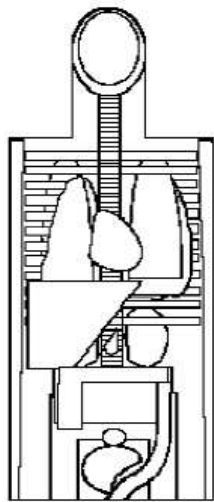
Press a key (or left click mouse) to continue...

<F1>=Export <F2>=Chain <F3>=Plots <F4>=Tables <F5>=Unknown <F6>=Help <F7>=About

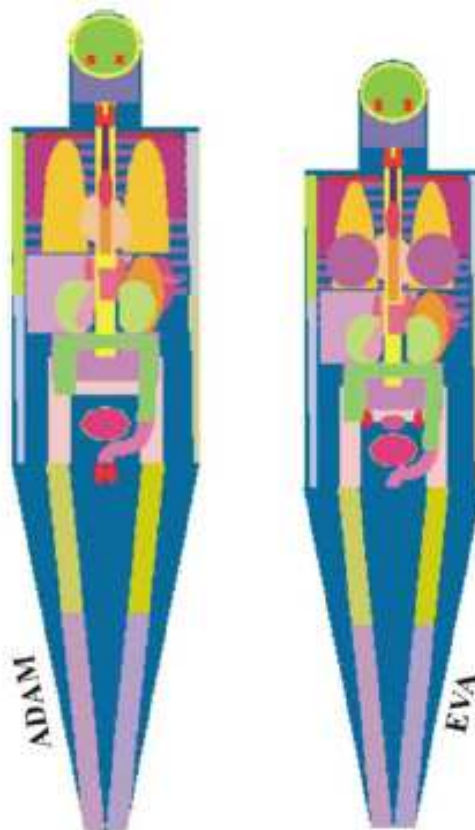
Les modèles dosimétriques

2. Les fantômes anthropomorphes

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 cm³ (Fig. 4).

Fantomes MIRD5 ou ADAM et EVA

Les modèles dosimétriques

2. *Les fantômes anthropomorphes*

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

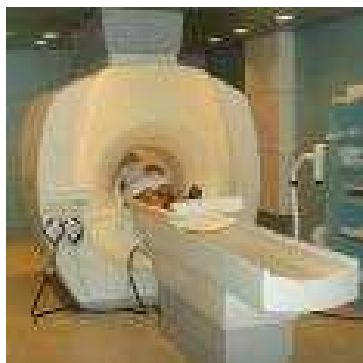
- Position respective des sources et cibles (S et T)
- Masse des organes

Les modèles dosimétriques

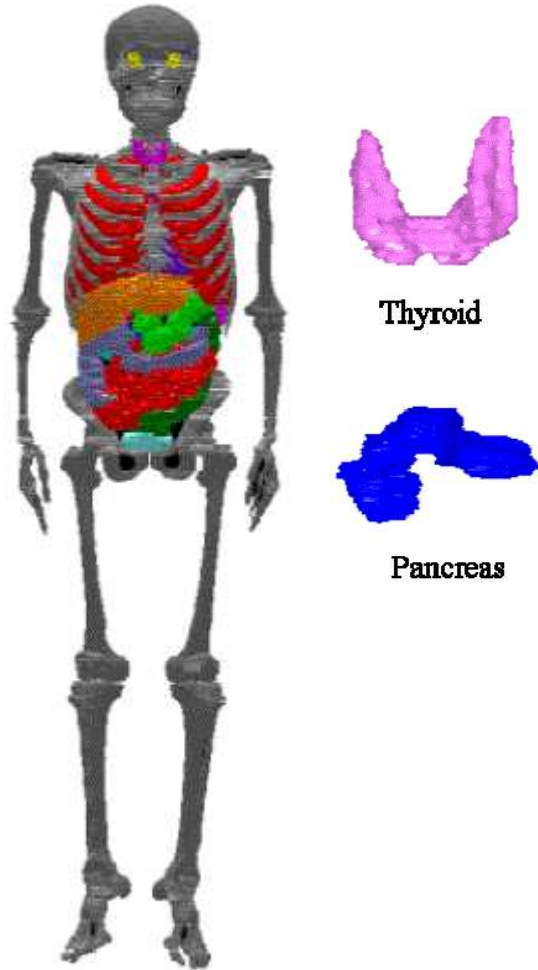
2. *Les fantômes anthropomorphes*

1988 Les fantômes voxélisés

Basés sur images IRM de personnes réelles



Les modèles dosimétriques



Vue antérieure
de certains organes
d'un fantôme voxélisé

Ex. du fantôme GOLEM

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

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

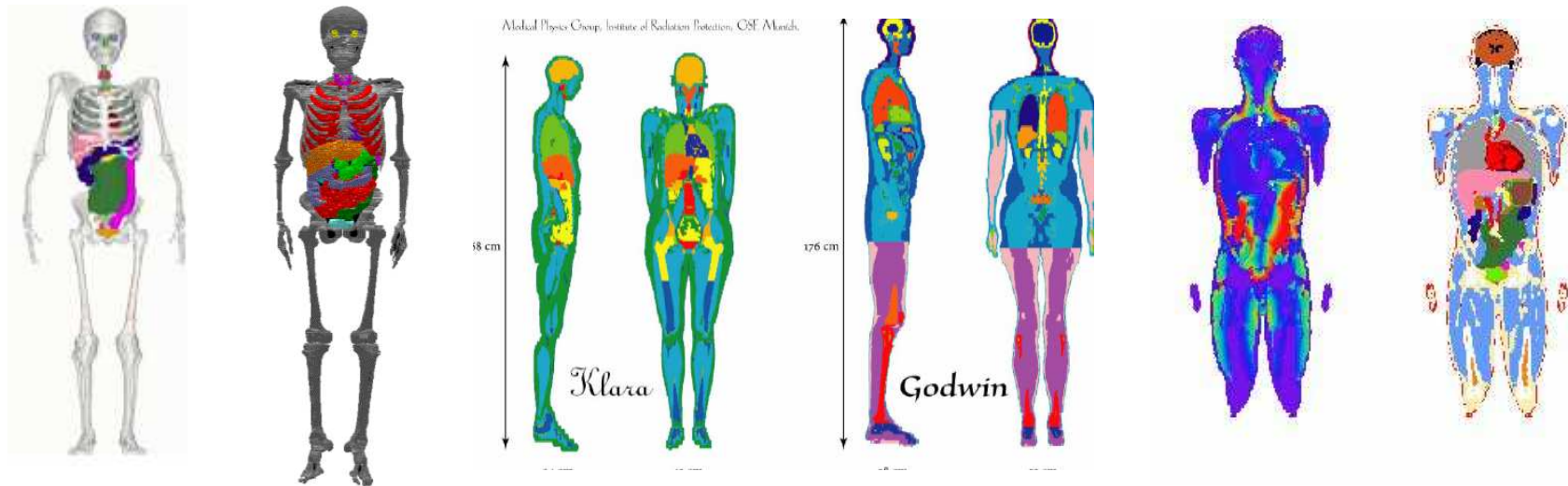
Le dépôt d'énergie de chaque faisceau est calculé pour chaque voxel

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

Les modèles dosimétriques

Environ 30 fantômes différents, représentant anatomie de personnes réelles

Model	Reference	Images	Race	Age and sex	Subject	Comment
Child	[18]	CT	Caucasian	7-year-old female	Leukemia patient	Small for age (5 to 7-year-old)
Baby	[18]	CT	Caucasian	8-week-old female	Cadaver	
VoxelMan ^a	[49, 50]	CT	Caucasian	Adult male	Diffuse melanoma	Head and torso
NORMAN	[14, 30]	MRI	Caucasian	Adult male		Only 10 ribs
Golem	[26, 42]	CT	Caucasian	38-year-old male	Leukemia patient	
ADELAIDE	[51]	CT	Caucasian	14-year-old female	Patient	Torso
VIP-man	[35]	Colour photos	Caucasian	38-year-old male	Cadaver (VHP ^b)	One testicle only
Otoko	[20]	CT	Japanese	Adult male		
UF newborn	[38]	CT	Caucasian	6-day-old female	Cadaver	
UF 2 month	[38]	CT	Caucasian	6-month-old (=2) male	Cadaver	Small for age
Visible-human	[23]	CT	Caucasian	38-year-old male	Cadaver (VHP)	
Frank	[23, 52]	CT	Caucasian	48-year-old male	Patient	Head and torso
Donna	[17, 52]	CT	Caucasian	40-year-old female	Patient	
Helga	[17, 23]	CT	Caucasian	26-year-old female	Patient	Legs absent below mid-thigh
Irene	[17, 23]	CT	Caucasian	32-year-old female	Patient	
MAX ^c	[24]		Caucasian	Modified VoxelMan		Reference man dimensions
Nagaoka man	[32]	MRI	Japanese	22-year-old male	Volunteer	
Nagaoka woman	[32]	MRI	Japanese	22-year-old female	Volunteer	
KR-man	[37]	MRI	Korean	28-year-old male		
Un-named	[53]	CT		9-month-old male		Head and torso
Pregnant woman	[54]	CT		30 weeks pregnant		Part torso



Les modèles dosimétriques

2. *Les fantômes anthropomorphes*

Nécessité de transformer certains fantômes

1. En leur assignant taille et masse des organismes de référence de la CIPR 89 et en faisant apparaître des régions “invisibles” à l’IRM (voies aériennes respiratoires, moelle “active” du squelette, surface os.,...
2. En introduisant certaines régions déjà définies dans certains modèles de la CIPR (surface nasale dans ET, paroi du colon, cristallin, etc...)
3. En ajoutant certaines modifications supplémentaires
suppression paupières,
modification certaines positions (sujets analysés en position couchée)
identification os cortical, moelle médullaire
identification zone corticale et médullaire dans les reins
identification des ganglions lymphatiques

...

Les modèles dosimétriques

2. *Les fantômes anthropomorphes*

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

M. Zankl (Helmholtz)



Les modèles dosimétriques

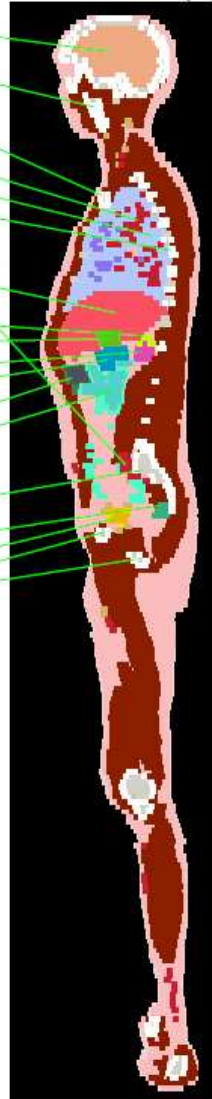
Row no. 85 (coronar)



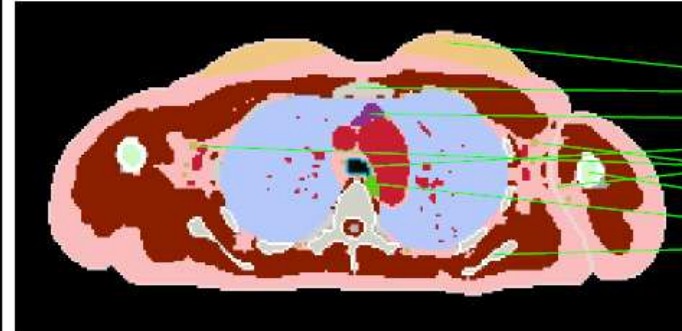
Brain
Mandible
Clavicles
Ribs
Lungs, blood
Lungs, tissue
Thoracic spine
Blood vessels, trunk
Liver
Spleen
Adrenals
Gall bladder
Kidneys
Pancreas
Transverse colon, right
Small intestine
Lumbar spine
Sacrum
Sigmoid colon
Urinary bladder
Pelvis

ICRP-AM

Column no. 109 (sagittal)



Slice no. 279



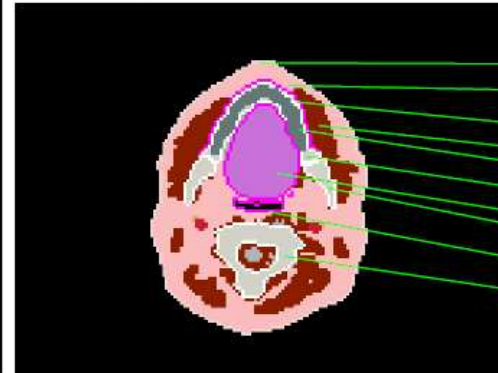
Breast, adipose tissue
Sternum
Thymus
Trachea
Lymphatic nodes
Humerus, upper half
Oesophagus
Scapulae

Slice no. 296



Clavicles
Thyroid
Trachea
Humerus, upper half
Oesophagus
Scapulae

Slice no. 313

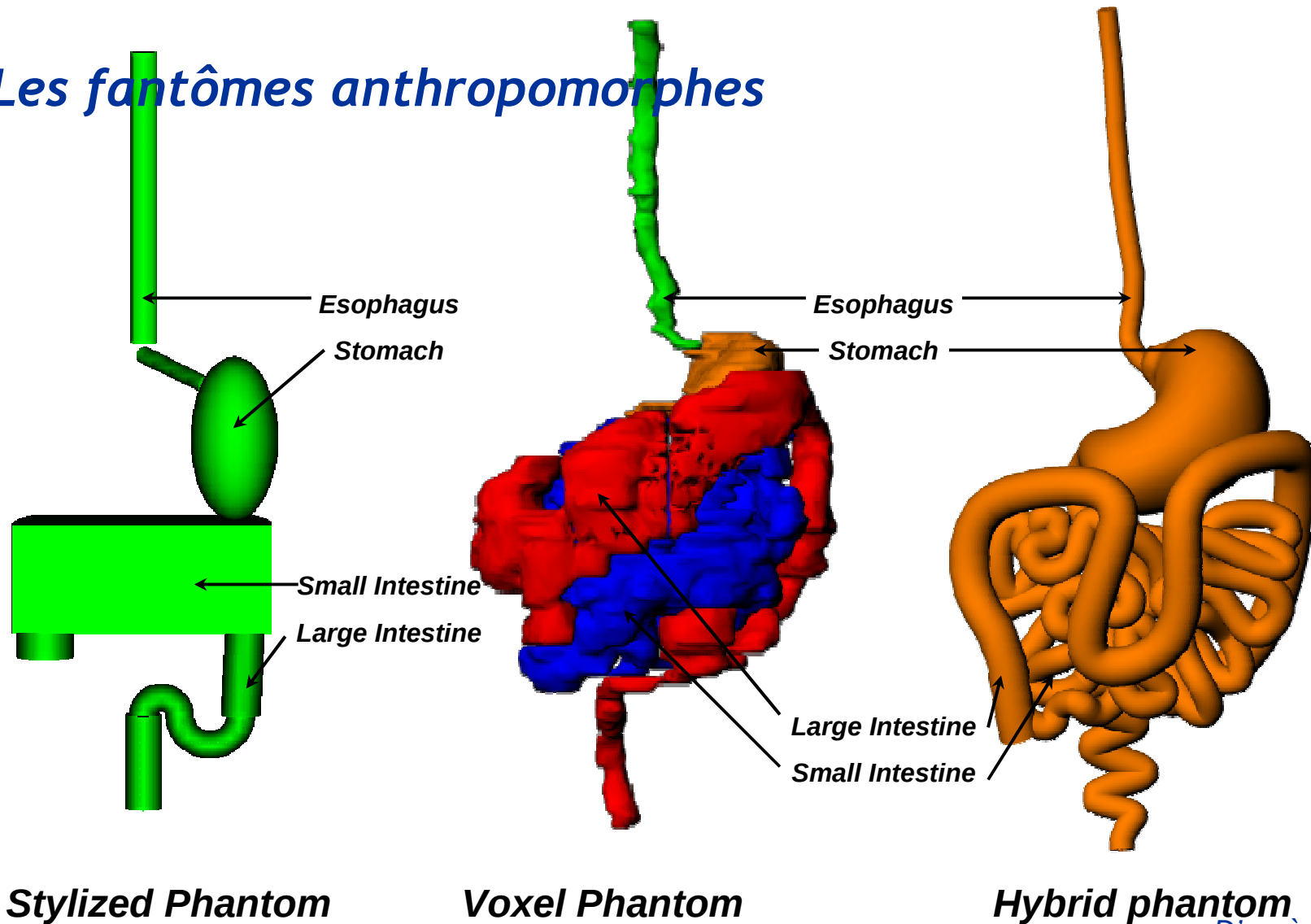


ICRP-AF

Skin, head
Residual (adipose) tissue, head
Oral mucosa
Muscle, head
Teeth
Cranium
Tongue
Mandible
ET₂
Cervical spine

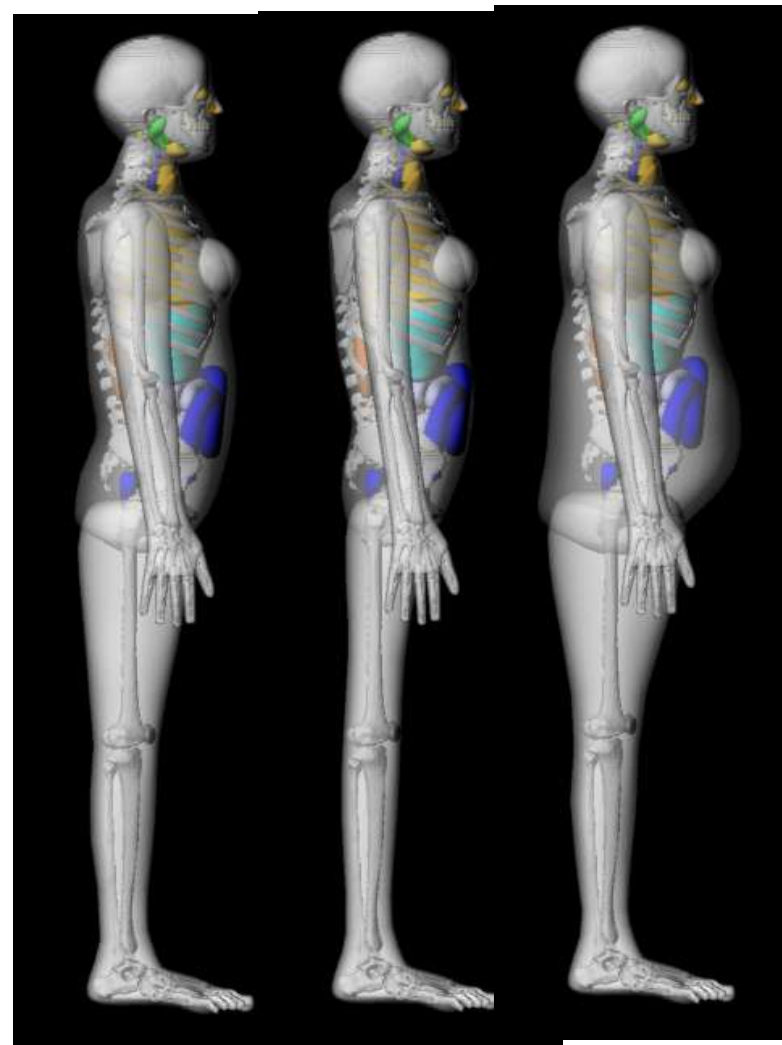
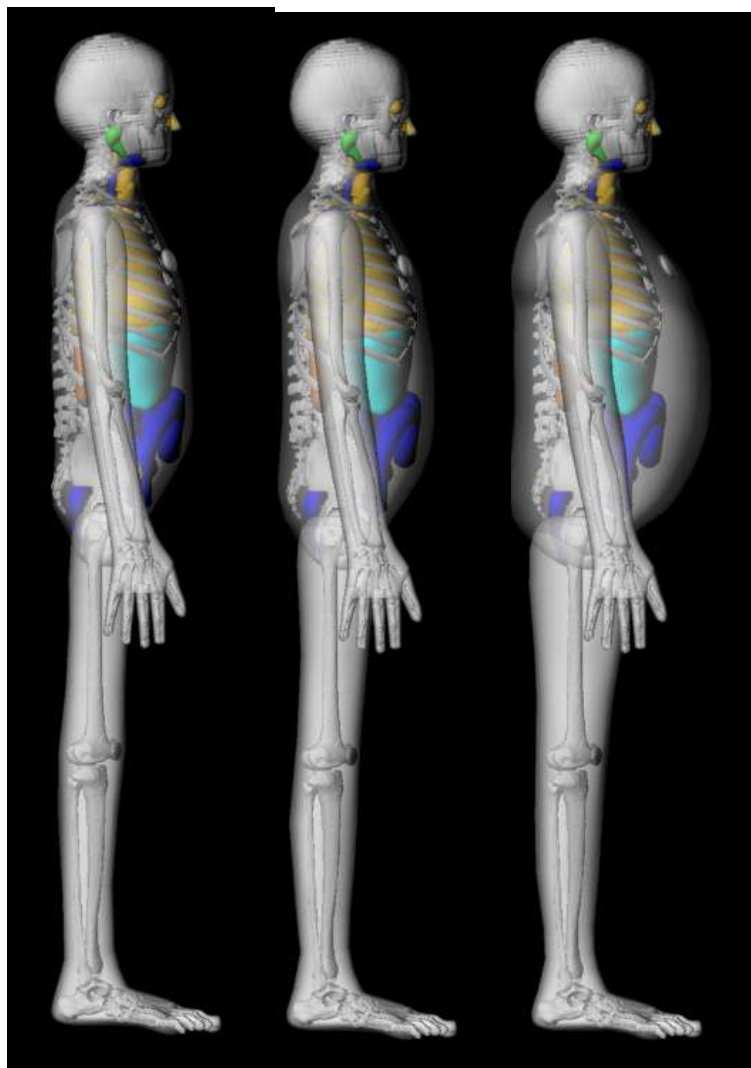
Les modèles dosimétriques

2. Les fantômes anthropomorphes



D'après Bolch

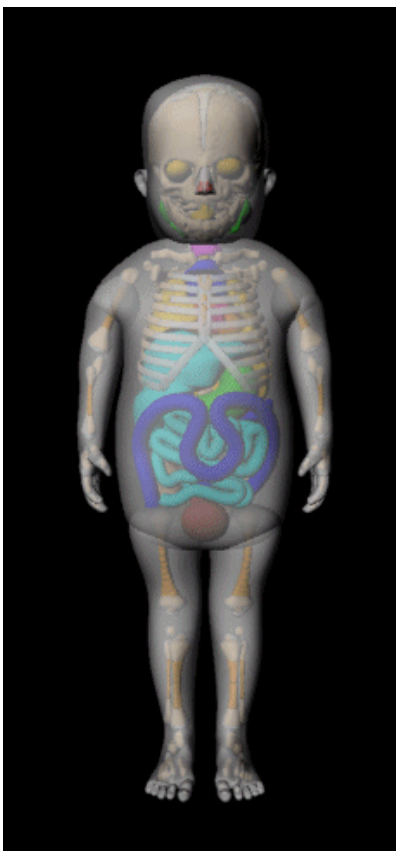
Les modèles dosimétriques



D'après Bolch

Les modèles dosimétriques

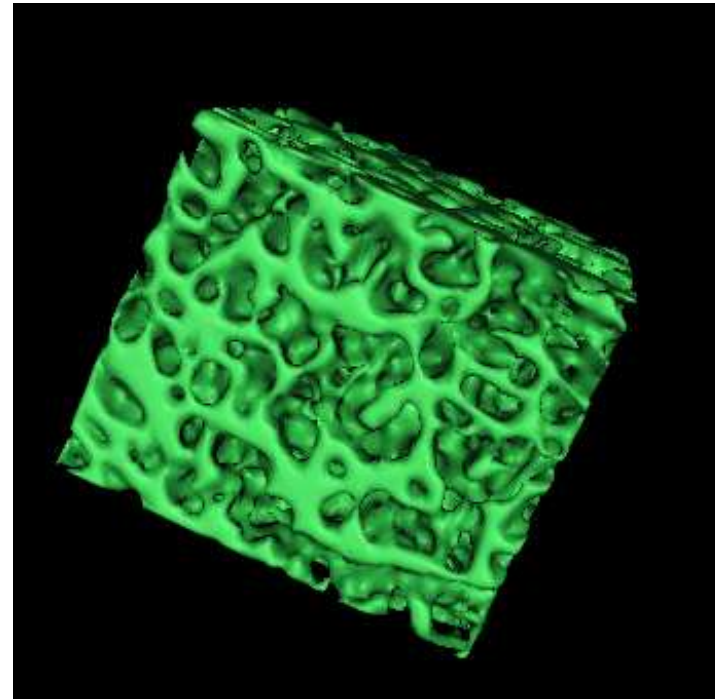
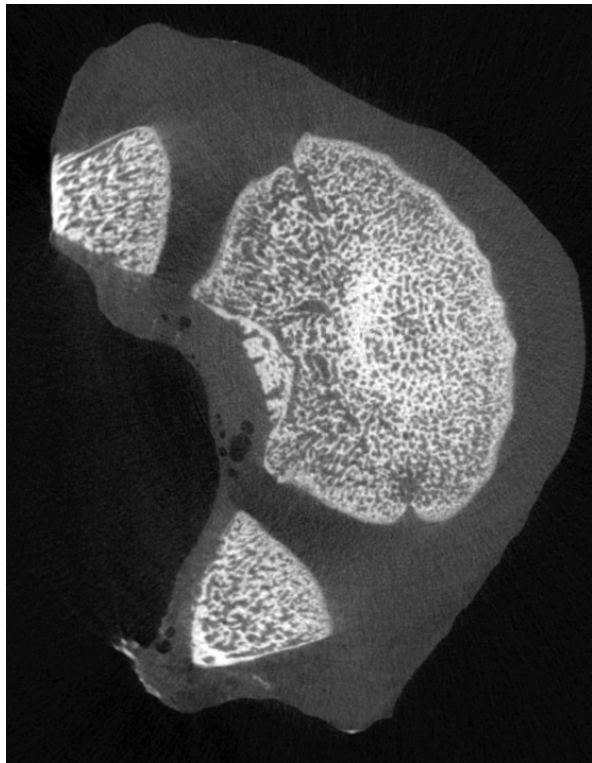
2. *Les fantômes anthropomorphes*



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

Les modèles dosimétriques

2. Les fantômes anthropomorphes



W.E. Bolch (UF)

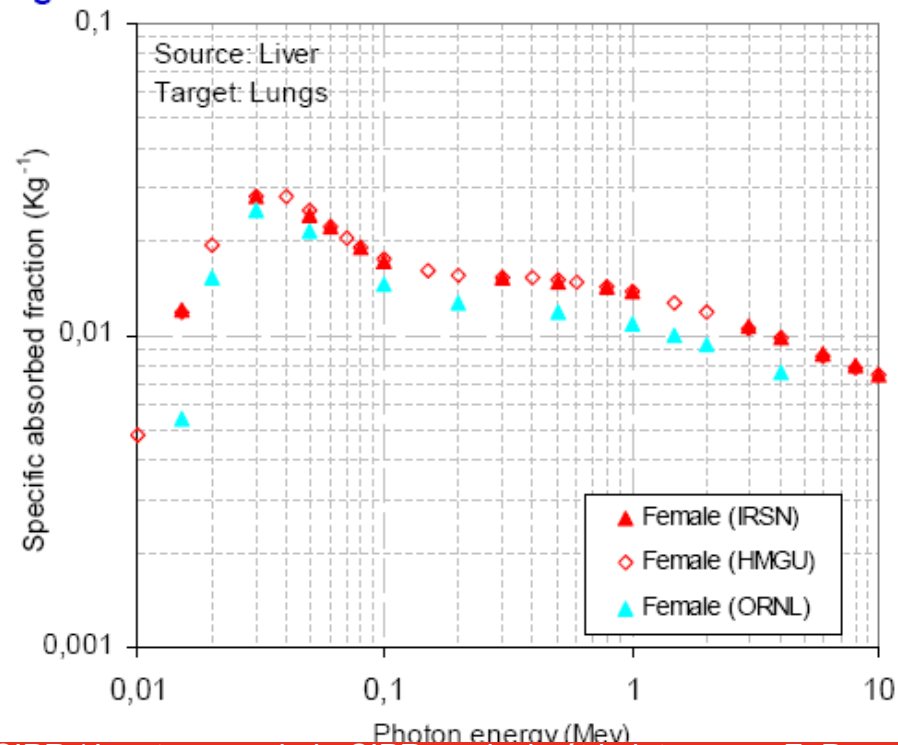
Image μ CT de la vertèbre L2 d'un nouveau-né de 4 jours et reconstruction 3D de l'os trabéculaire et de la moelle

Les modèles dosimétriques

3. Le calcul des SAF

Photons SAF (lungs <- liver)

Specific absorbed fraction (SAF) in a target region of energy emitted in a source region

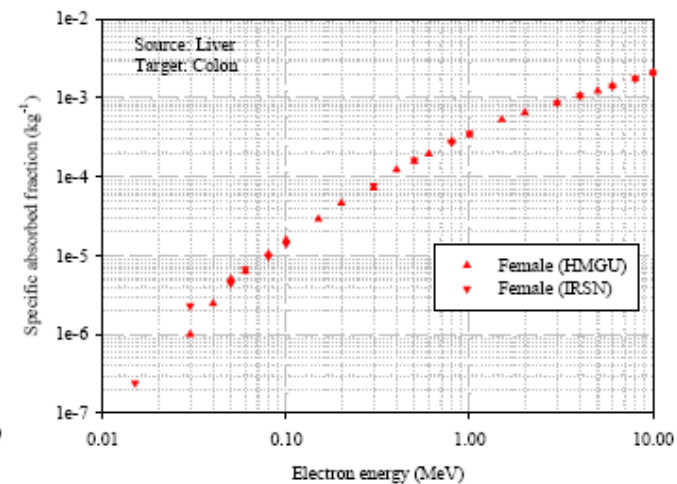
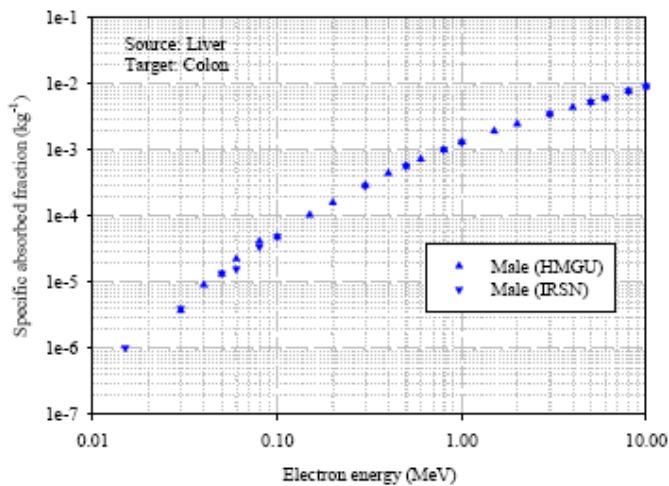


M. Zankl
(Helmholtz)

Les modèles dosimétriques

3. Le calcul des SAF

Electrons, SAF(Colon←Liver)



ICRP publication 110

Les modèles dosimétriques

Energie spécifique efficace

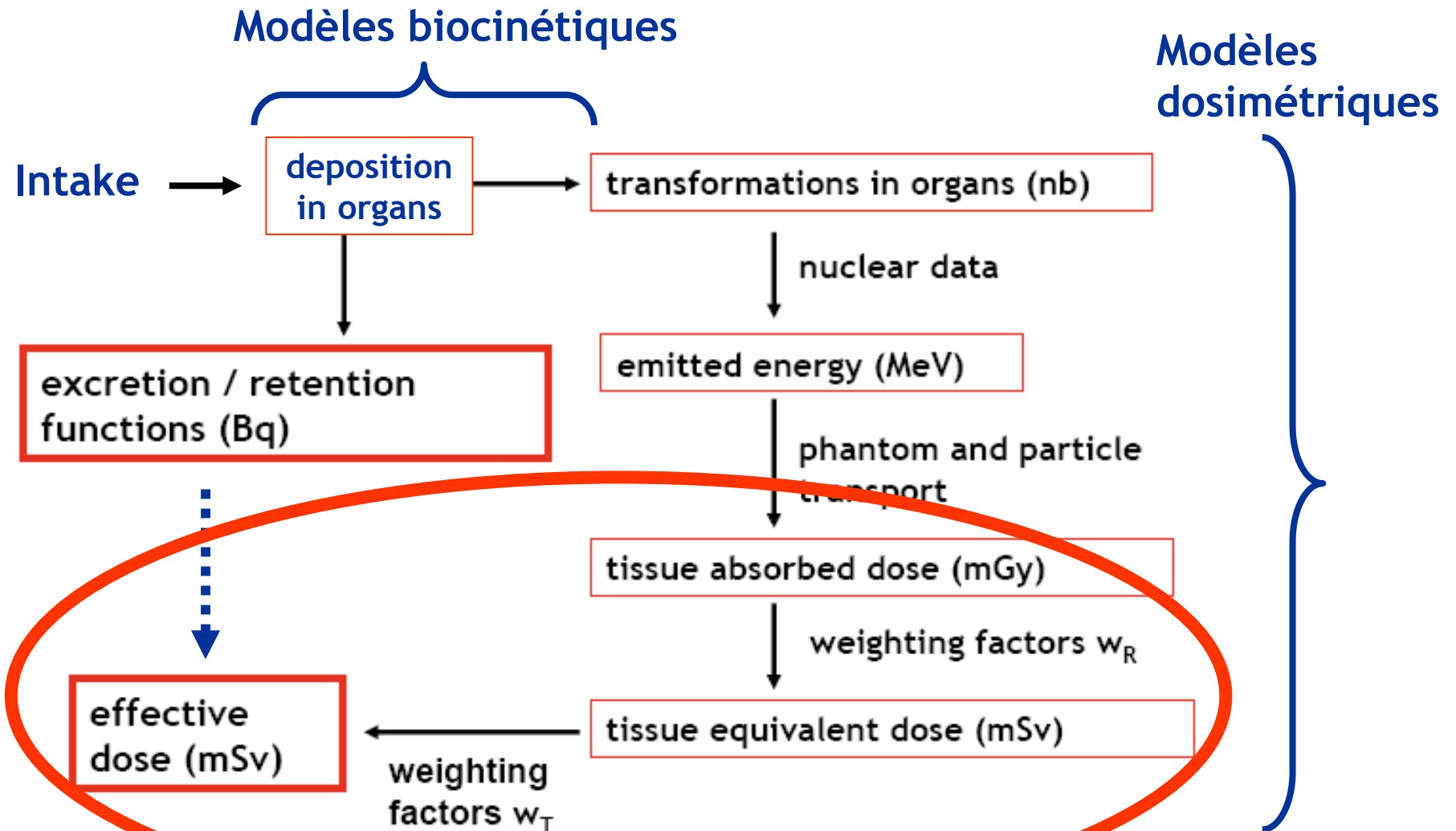
$$SEE(T \leftarrow S) = \sum_R Y_R \cdot E_R \cdot w_R \cdot SAF(T \leftarrow S)_R$$

Débit de dose équivalente

$$\dot{H}_T = \sum_S q_S \cdot SEE(T \leftarrow S)$$

Coefficient de dose efficace engagée

$$e(50) = \sum_T w_T \int_{50ans} \frac{\dot{H}_T^{fém}(t) + \dot{H}_T^{masc}(t) dt}{2}$$



Les travaux en cours de DOCAL

Données de décroissance radioactive (Fait en 2008)

Modèles anatomiques et dosimétriques adultes de référence (Fait en 2009)

Modèles de référence pédiatriques et femme enceinte (>2011)

Fractions spécifiques d'énergie absorbée (SAFs, 2010)

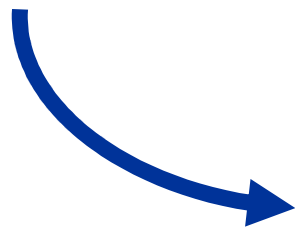
Coefficients de dose efficace engagé (2011)

Prévision des grandeurs radiotoxicologiques mesurables (2011)

Une simplification nécessaire

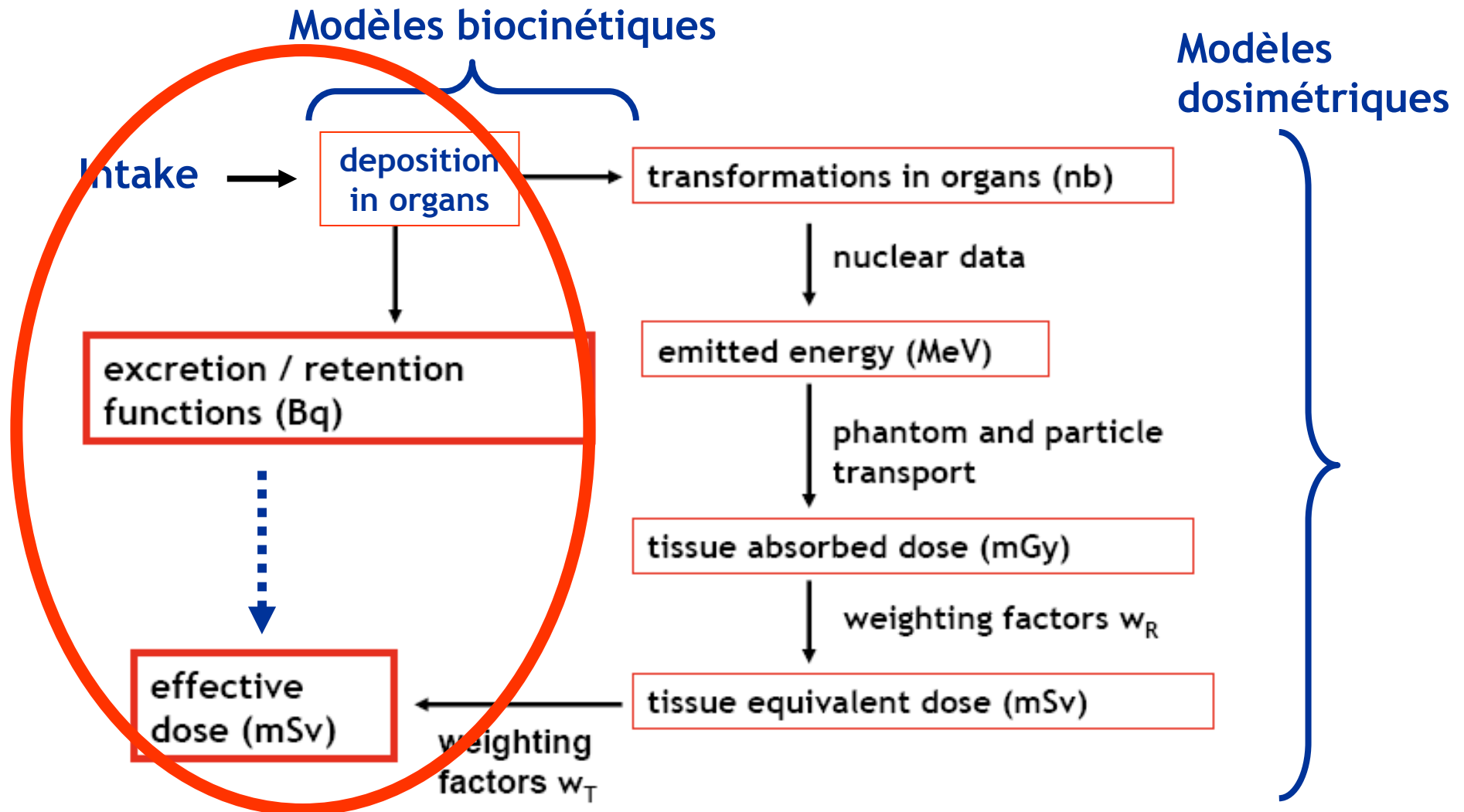
Procédure complexe, limitée aux experts

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



- Dose per unit intake
- Fonctions de rétention et d'excrétion

Une simplification nécessaire



Une simplification nécessaire

Fonctions de rétention et d'excrétion

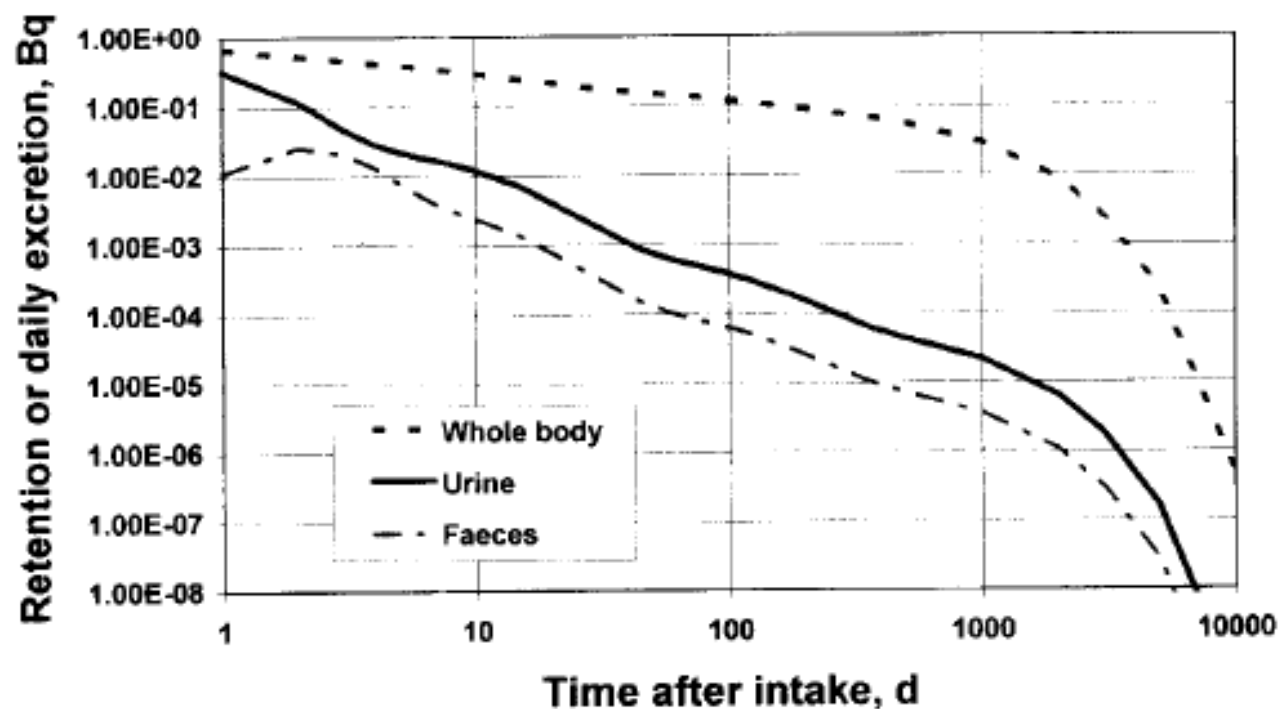


Fig. A.3.15. ^{60}Co Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

Donne une estimation de l'incorporation à partir des bioessais

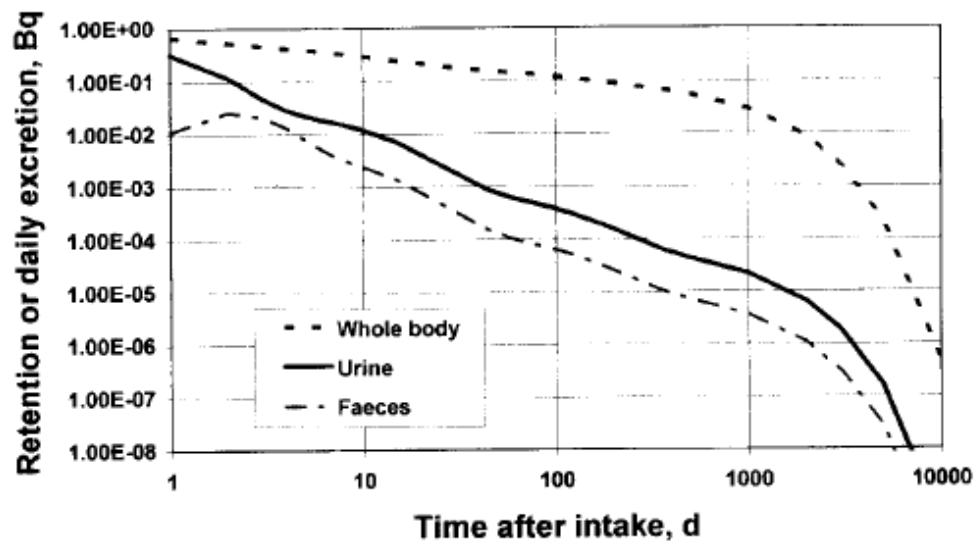


Fig. A.3.15. ^{60}Co Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

Type	F	M	S
DPUI $\mu\text{Sv/Bq}$	0.6	1.8	6.1

For ^{235}U

Dose interne en Sv

$$E(\tau) = h(g) \times A$$

avec $h(g)$ en Sv/Bq

A : Activité incorporée en Bq

La pertinence des modèles de dosimétrie interne

Calcul des coefficients de risque après exposition interne à Pu, Th, Rn, Ra et comparaison à coefficients de risques obtenus après HN

^{222}Rn : cancers du poumons chez travailleurs et membres du public

^{232}Th : leucémies et cancers du foie chez patients ayant eu thorotrast

$^{224/226}\text{Ra}$: cancers osseux chez patients et travailleurs

^{239}Pu : cancers du poumons chez travailleurs de Mayak

COMARE : Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment

CERRIE : Committee Examining Radiation Risks from Internal Emitters

La pertinence des modèles de dosimétrie interne

Estimation des risques d'apparition de cancers après exposition interne/externe

Tumeur	Radioélément	Risque, $\text{Sv}^{-1} \times 10^3$	
		Interne	Externe
Poumons			6.8
Foie			3
Leucémie			5-8
Os			0.1-0.4

D'après Harrison et Muirhead, 2003

La pertinence des modèles de dosimétrie interne

Estimation des risques d'apparition de cancers après exposition interne/externe

Tumeur	Radioélément	Risque, $\text{Sv}^{-1} \times 10^3$	
		Interne	Externe
Poumons	^{222}Rn	2.5	6.8
	^{239}Pu	10	
Foie	^{232}Th	2-4	3
Leucémie			5-8
Os			0.1-0.4

D'après Harrison et Muirhead, 2003

La pertinence des modèles de dosimétrie interne

Estimation des risques d'apparition de cancers après exposition interne/externe

Tumeur	Radioélément	Risque, $\text{Sv}^{-1} \times 10^3$		
		Interne		Externe
Poumons	^{222}Rn	2.5		6.8
	^{239}Pu	10		
Foie	^{232}Th	2-4		3
Leucémie	^{232}Th	0.3-0.5	≠	5-8
Os	^{224}Ra	0.06	≠	0.1-0.4

D'après Harrison et Muirhead, 2003

Les (bonnes) initiatives en marge de la CIPR

GT MEDOR



Groupe de travail composé de médecins et de dosimétristes, piloté par le Dr. Blanchin

L'objectif est de produire un guide pour la pratique clinique sur
« *La surveillance médico-professionnelles de l'exposition interne par des radionucléides dans les installations nucléaires de base (INB)* »

Objectifs et principes de calcul de l'estimation de dose interne ?

Comment établir des protocoles de surveillance ?

Quels sont les éléments nécessaires pour l'estimation d'une dose ?

Comment utiliser et interpréter les résultats d'analyses radiotoxicologiques ?

Quelle signification accorder à la dose et comment doit-on la prendre en compte ?

Quand faire appel à l'expertise et que peut-elle apporter ?

Sera soumis au label HAS

Dernières publications de la CIPR dans le domaine de la dosimétrie interne

Publication 88 . Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother.
Ann. ICRP 31 (1-3) 2001. Elsevier Science Ltd., Oxford.

Supporting Guidance 3 . Guide for the practical application of the ICRP Human Respiratory Tract Model.
Ann. ICRP 32 (1-2) 2002. Elsevier Science Ltd., Oxford.

Publication 89 . Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.
Ann. ICRP 32 (3-4) 2002. Elsevier Science Ltd., Oxford.

Publication 95 . Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk.
Ann. ICRP 34 (3-4) 2004. Elsevier Science Ltd., Oxford.

Publication 100 . Human Alimentary Tract Model for radiological protection. Ann. ICRP 36 (1-2) 2006.
Elsevier Science Ltd., Oxford.

Publication 107. Nuclear decay data. Ann. ICRP 38 (3) 2008.

Publication 110. Adult reference computational phantoms. Ann. ICRP 39 (2) 2009.

Fin

francois.paquet@irsn.fr