

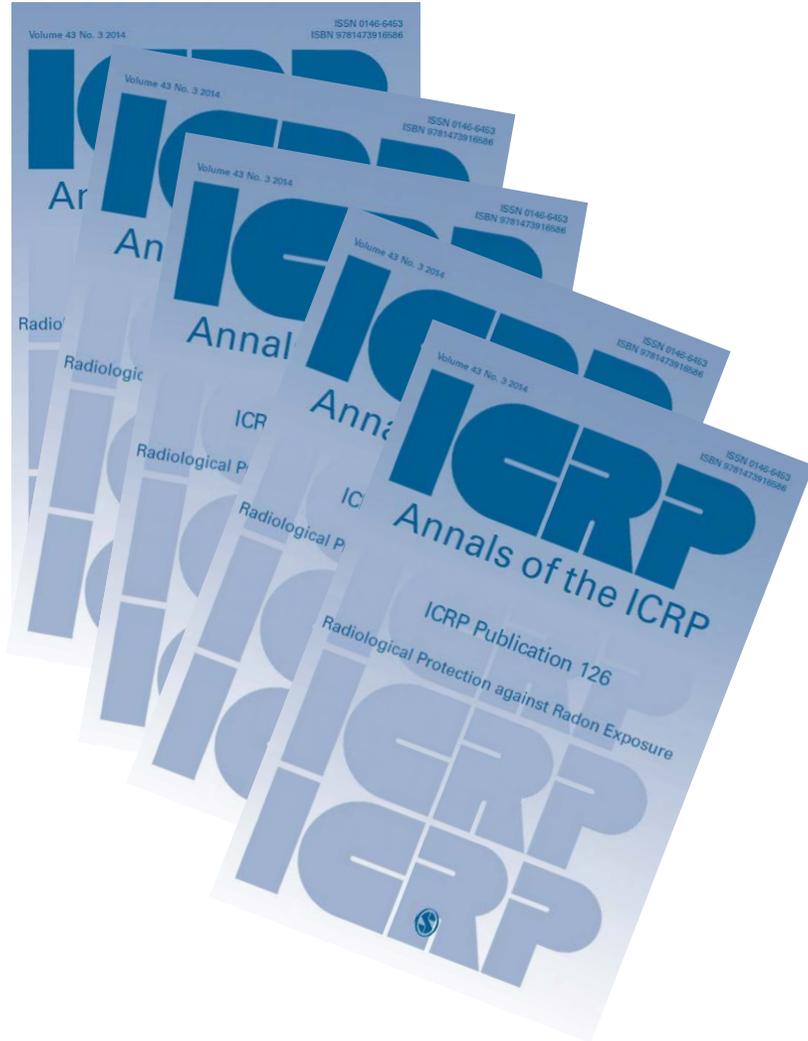


François Bochud, IRA / CHUV

# Événements 2017 de radioprotection

Réunion d'information en radioprotection  
CHUV, mercredi 6 décembre 2017

# Les publications ICRP commencent à être gratuites



## ICRP-1 à ICRP-50

ICRP-53

ICRP-103

ICRP-111

ICRP-119

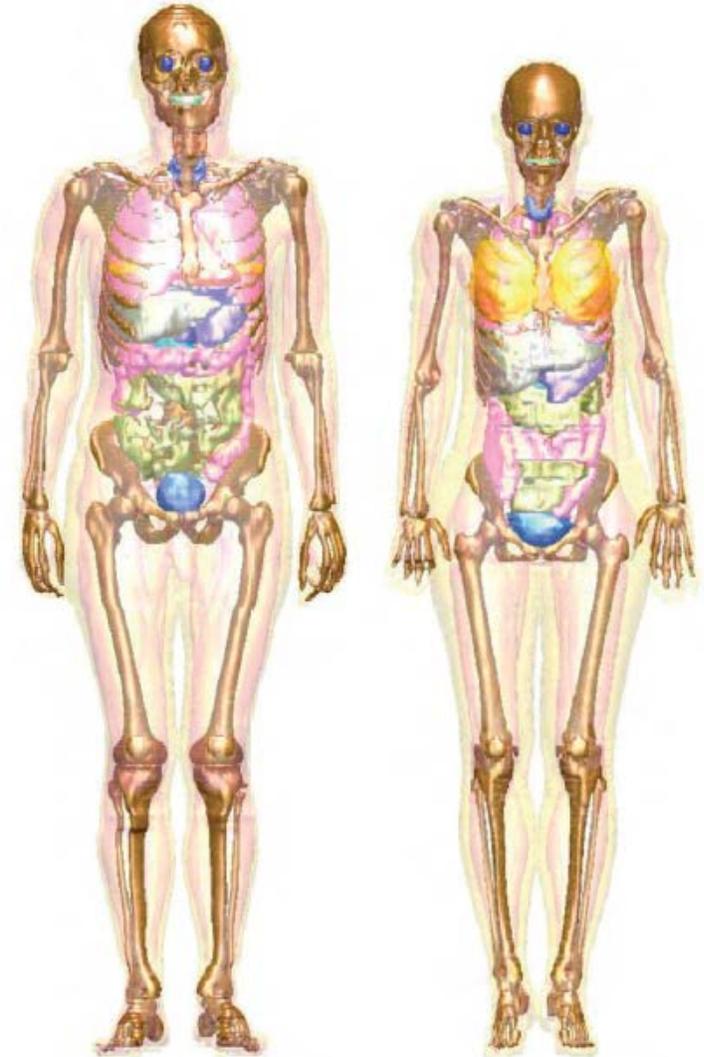
*proceedings de conférences*

# Annals of the ICRP

ICRP PUBLICATION 134

Occupational Intakes of Radionuclides:  
Part 2

**OIR-2**



## Pourquoi la série OIR ?

Prendre en compte la **recommandation ICRP-103** (2007)  
Mettre à jour la **série ICRP-30** (1979, 1980, 1981, 1988) et **ICRP-68** (1994)  
Nouvelles **données biologiques**  
Nouveaux **modèles biocinétiques**  
Augmentation des besoins en **monitoring** et **estimations rétrospectives**

**ICRP-133** – SAF : Décrit en détail la manière de calculer  
les **fractions d'absorption spécifique**  
et le **formalisme** des modèles biocinétiques

**ICRP-130** – OIR-1 : Décrit les **modèles biocinétique et dosimétriques**,  
les **monitorings** individuels et de la zone de travail,  
ainsi que les **mesures rétrospectives**

# Contenu des OIR 2,3,4,5

Données sur les **éléments** individuels et leurs **isotopes** :

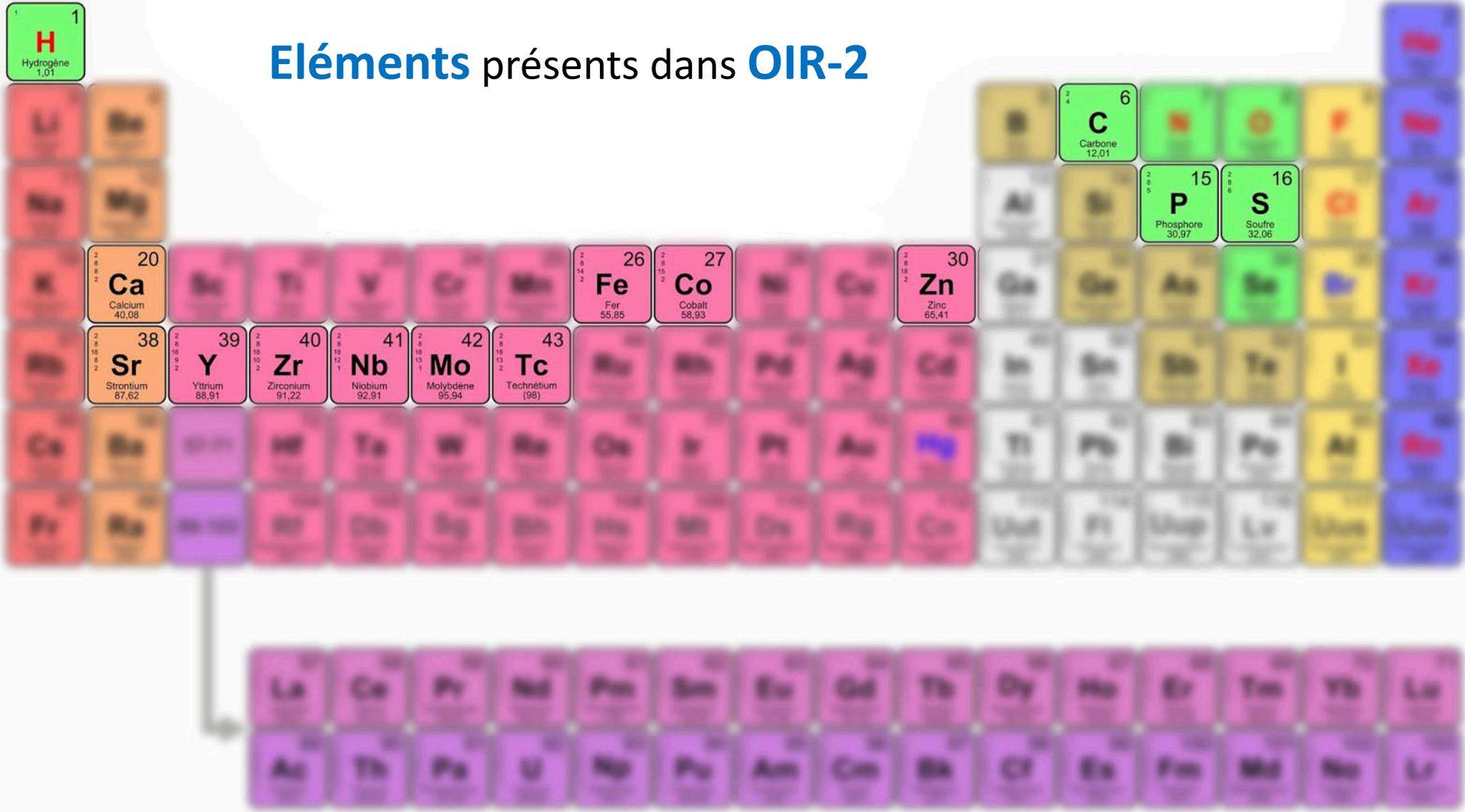
**Formes chimiques** rencontrées sur les **places de travail**

Données pour les techniques de **monitoring**  
*(pour les éléments les plus fréquemment rencontrés sur la place de travail)*

Revue des **données biocinétiques**  
pour l'inhalation, l'ingestion et le transport systémique

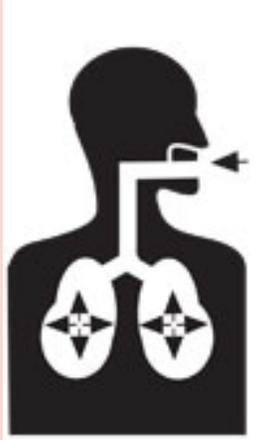
**Tables de  $E_{50}$**  par unité incorporée (Sv/Bq)  
Graphiques de rétention pour l'inhalation

# Eléments présents dans OIR-2





## Effets de ces nouveaux calculs sur les coefficients de dose



### Inhalation

des radionucléides  
dans la forme de référence  
(aérosols of  $5 \mu\text{m}$ , type F, M ou S)

Grande majorité **légèrement plus bas**  
(inférieur à un facteur 2)

Quelques cas **facteur 2 plus haut**

$^{14}\text{C}$  monoxyde,  $^{14}\text{C}$  dioxyde

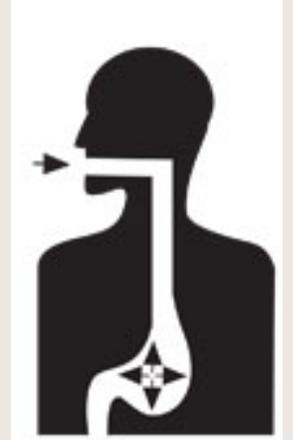
$^{59}\text{Fe}$  Type F

$^{90}\text{Sr}$  Type S

$^{60}\text{Co}$  Type S

(révision des **modèles** biocinétiques et  
meilleures description de la **réten**tion  
et de la **distribu**tion dans les tissus)

### Ingestion



Valeurs **similaires**  
ou quelques % plus bas

**Exception** notable  
 $^{90}\text{Y}$  facteur 5 **plus bas**

### 3. CARBON ( $Z = 6$ )

#### 3.1. Chemical forms in the workplace

(80) Carbon is a non-metal that occurs mainly in oxidation states II and IV. It may be encountered in industry in a variety of chemical forms, including carbon monoxide, carbon dioxide, and methane, as well as in a wide range of organic carbon compounds and particles containing  $^{14}\text{C}$ .

(81) Only **two isotopes** of carbon are of importance for radiological protection,  $^{11}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$ . Table 3.1 shows the isotopes of carbon addressed in this publication. Due to its short half-life, and the penetrating 511 keV annihilation radiation it emits, external irradiation from  $^{11}\text{C}$  may well be a greater hazard than internal exposure.

Table 3.1. Isotopes of carbon addressed in this publication.

Isotope	Physical half-life	Decay mode
$^{11}\text{C}$	20.39 min	EC, B +
$^{14}\text{C}^*$	5700 y	B-

\*Dose coefficients and bioassay data for this radionuclide are given in the printed copy of this publication. Data for other radionuclides listed in this table are given in the accompanying electronic annex.

EC, electron-capture decay; B+, beta-plus decay; B-, beta-minus decay

### 3.2. Routes of intake

(82) It is not feasible to provide biokinetic models, dose coefficients, and bioassay functions for the large number of carbon compounds with potentially distinct biokinetic behaviour. Hence, systemic **biokinetic models** and **dosimetric information** are **only given for selected forms**. It is the responsibility of employers to assess doses to ensure appropriate protection for forms for which dose coefficients are not provided.

Table 3.2. Deposition and absorption for gas and vapour forms of carbon.\*

Chemical form/origin	Percentage deposited <sup>†</sup>						Absorption		Systemic model <sup>‡</sup>
	Total	ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB	bb	AI	Type	f <sub>A</sub>	
<b>Carbon monoxide</b> (CO)	40 <sup>§</sup>	0	8	4	8	20	V	**	CO
<b>Carbon dioxide</b> (CO <sub>2</sub> )	100 <sup>§</sup>	0	20	10	20	50	V	**	CO <sub>2</sub>
<b>Methane</b> (CH <sub>4</sub> )	0.3 <sup>§</sup>	0	0.06	0.03	0.06	0.15	V	**	Methane
Unspecified	100 <sup>¶</sup>	0	20	10	20	50	F	1.0	C

... **passablement de compositions chimiques**

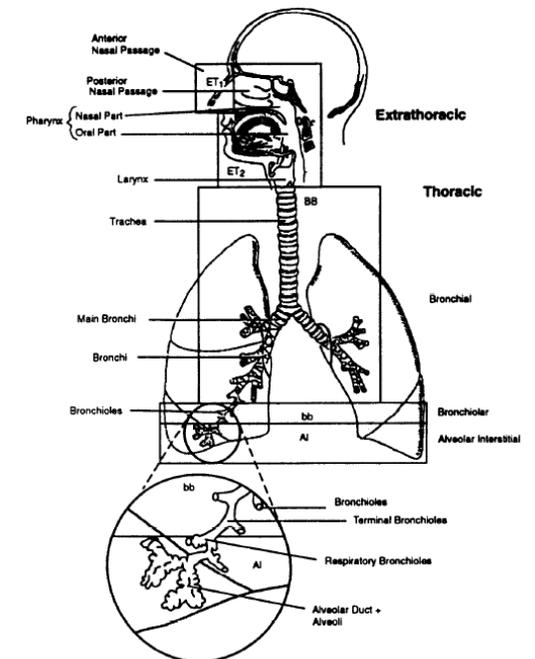


Fig. 1. Anatomical regions of respiratory tract.

Table 3.4. Retention of  $^{14}\text{C}$  in the human body at 7 d, and relative effective dose estimates for intake of various [ $^{14}\text{C}$ ]-labelled compounds, as estimated by Taylor (2004, 2007) on the basis of a review of biokinetic models and data for carbon.

$^{14}\text{C}$ -labelled compound	Intake mode	Retention at 7 d (%)	Relative effective dose*	Reference
Testosterone	IV	<20	0.1	Fukushima et al., 1954
Corticosterone	IV	~10	0.05	Migeon et al., 1956
Glycine	IV	~35	0.6	Berlin and Tolbert, 1955
Cholesterol	IV	~55	0.5	Hellman et al., 1955
Cortisol	IV	<10	0.02	Hellman et al., 1954
Estrone–oestradiol-17 $\beta$	IV	<20	0.08	Sandberg and Slaunwhite, 1957
Thymidine	IV	~30	1.1	Thierens et al., 1994
Methanol <sup>†</sup>	IV	<10	0.09	Crawley, 1977
Acetate	IV	<10	0.08	Crawley, 1977; Crawley and Haines, 1978; Crawley and Haines, 1979a
Alanine	IV	~18	0.3	Simmons et al., 1982
Inulin	IV	<1	0.01	ICRP, 1987, 1998
Glucose	IV	~35	0.4	Baker et al., 1954; Fine et al., 1962
Potassium cyanide <sup>†</sup>	Intubation	8	0.2	Crawley and Goddard, 1977
Nitrobenzene <sup>†</sup>	Intubation	<6	0.3	Crawley and Haines, 1978
Barium carbonate	Inhalation	~80	1.0	Kramer et al., 1996
Carbon monoxide	Inhalation	<5	0.004	ICRP, 1981, 1996
Methane	Inhalation	<1	0.01	ICRP, 1998
Benzene	Inhalation	<1	0.07	Krins et al., 2003
Carbon dioxide	Inhalation	<10	0.01	Leggett, 2004
	Ingestion	<10	0.005	
Urea				

Table 3.4. (continued)

<sup>14</sup> C-labelled compound	Intake mode	Retention at 7 d (%)	Relative effective dose*	Reference
Triolein	Ingestion	<10	0.5	ICRP, 1998
	Ingestion	<10	0.7	Leide-Svegborn et al., 1999
	Ingestion	~10	3.6	ICRP, 1998
	Ingestion	~10	0.5	Gunnarsson, 2002
Glycocholic acid	Ingestion	~35	0.7	Gunnarsson et al., 2003
DTPA	Ingestion	<1	0.05	Stather et al., 1981
	Inhalation		0.4	
Delmopinol	Ingestion	<5	0.05	Eriksson et al., 1998
Dexloxiglumide	Ingestion	<7	0.4	Webber et al., 2003
Xylose	Ingestion	~15	0.2	Gunnarsson et al., 2003
Colestipol	Ingestion	<1	0.5	Taylor, 2007
Sevelamer	Ingestion	<1	0.5	Taylor, 2007
Levitiracetam	Ingestion	<2	0.02	Taylor, 2007
Ifetroban	Ingestion	<5	0.3	Taylor, 2007

IV, intravenous.

\*Multiple of effective dose based on the International Commission on Radiological Protection's generic model for carbon introduced in *Publication 30* (ICRP, 1981).

†Estimates based on data for rats.

Table 3.5. **Transfer coefficients** for the systemic model **used in this publication** for radiocarbon assumed to reach blood as **carbon dioxide** or **bicarbonate**.

From	To	Transfer coefficient (d <sup>-1</sup> )
Blood 1	Excreta	36.5*
Blood 1	Urinary bladder contents	0.65
Blood 1	Right colon contents	0.15
Blood 1	ST0	60
Blood 1	ST1	1.8
Blood 1	ST2	0.3
Blood 1	ST3	0.44
Blood 1	Trabecular bone surface	0.09
Blood 1	Cortical bone surface	0.06
Blood 1	Trabecular bone volume	0.006
Blood 1	Cortical bone volume	0.004
ST0	Blood 1	49.91
ST1	Blood 1	1.331
ST2	Blood 1	0.2218
ST3	Blood 1	0.01664
ST1	Blood 2	0.05545
ST2	Blood 2	0.009242
ST3	Blood 2	0.0006931
Blood 2	Urinary bladder contents	1000
Trabecular bone surface	Blood 1	0.01733
Cortical bone surface	Blood 1	0.01733
Trabecular bone volume	Blood 1	0.000493
Cortical bone volume	Blood 1	0.0000821

ST, soft tissue.

\*36.2 d<sup>-1</sup> in expired air and 0.3 d<sup>-1</sup> via skin.

### 3.3. Individual monitoring

(140)  $^{14}\text{C}$  intake is generally monitored through measurement of the activity excreted in **urine**. The most common method of analysis is **liquid scintillation** counting (Table 3.8). Measurement of activity in exhaled breath may be used for  $^{14}\text{C}$ -labelled organic material metabolised to carbon dioxide, but there is no information on detection limits or routine use of the technique.

Table 3.8. Monitoring techniques for  $^{14}\text{C}$ .

Isotope	Monitoring technique	Method of measurement	Typical detection limit	Achievable detection limit
$^{14}\text{C}$	Urine bioassay	Liquid scintillation counting	60 Bq l <sup>-1</sup>	3 Bq l <sup>-1</sup>

3.4. **Dosimetric data for carbon**

Table 3.9. Committed effective dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for the inhalation or ingestion of <sup>14</sup>C compounds.

	Effective dose coefficients (Sv Bq <sup>-1</sup> )
<b>Inhaled gases or vapours</b>	<sup>14</sup> C
Carbon monoxide (CO)	1.8E-12
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	1.3E-11
Methane (CH <sub>4</sub> )	5.1E-14
Unspecified	1.7E-10
<b>Inhaled particulate materials</b> (5 μm AMAD aerosols)	
Type F, barium carbonate	1.3E-11
Type F	1.1E-10
Type M, all unspecified forms	5.8E-10
Type S, elemental carbon, carbon tritide	6.7E-09
<b>Ingested materials</b>	
$f_A = 1.0$ , all chemical forms	1.6E-10

AMAD, activity median aerodynamic diameter.

Table 3.10. Dose per activity content of  $^{14}\text{C}$  in daily excretion of urine ( $\text{Sv Bq}^{-1}$ ); 5  $\mu\text{m}$  activity median aerodynamic diameter aerosols inhaled by a reference worker at light work.

Time after intake (d)	Carbon monoxide Urine	Carbon dioxide Urine	Methane Urine	Unspecified organic compounds Urine	Type F, barium carbonate Urine	Type F Urine	Type M Urine	Type S Urine
1	N/A	7.1E-10	5.6E-10	3.6E-10	1.2E-09	4.2E-10	1.2E-08	2.8E-06
2		1.8E-08	4.9E-10	3.6E-09	8.7E-09	1.6E-09	2.8E-08	6.2E-06
3		5.3E-08	7.6E-10	1.1E-08	3.7E-08	6.3E-09	1.2E-07	2.6E-05
4		1.2E-07	1.2E-09	1.5E-08	1.2E-07	1.2E-08	2.6E-07	5.9E-05
5		2.0E-07	1.9E-09	1.8E-08	2.4E-07	1.7E-08	3.5E-07	8.1E-05
6		2.8E-07	3.0E-09	2.2E-08	3.7E-07	2.1E-08	4.2E-07	1.0E-04
7		3.4E-07	4.8E-09	2.7E-08	4.8E-07	2.5E-08	5.0E-07	1.2E-04
8		4.1E-07	7.6E-09	3.3E-08	5.8E-07	3.0E-08	5.9E-07	1.4E-04
9		4.7E-07	1.2E-08	3.9E-08	6.8E-07	3.7E-08	7.0E-07	1.7E-04
10		5.4E-07	1.9E-08	4.8E-08	7.8E-07	4.4E-08	8.2E-07	2.0E-04
15		9.0E-07	1.9E-07	1.2E-07	1.3E-06	1.1E-07	1.6E-06	4.4E-04
30		1.6E-06	1.1E-05	1.8E-06	2.4E-06	1.7E-06	4.5E-06	1.5E-03
45		2.1E-06	1.4E-05	8.2E-06	3.1E-06	8.0E-06	5.5E-06	1.8E-03
60		2.7E-06	1.6E-05	1.2E-05	4.0E-06	1.2E-05	6.1E-06	1.9E-03
90		4.5E-06	2.2E-05	1.6E-05	6.7E-06	1.6E-05	7.5E-06	2.1E-03
180		2.1E-05	5.8E-05	4.0E-05	3.1E-05	3.9E-05	1.4E-05	2.5E-03
365		4.7E-04	3.8E-04	2.5E-04	7.0E-04	2.4E-04	4.6E-05	3.4E-03

Beaucoup de **données additionnelles** précalculées sont à disposition dans un **logiciel séparé** de la publication papier/pdf

Nom	Modifié le
IRData	27.10.2017 06:42
LICENSE_OIR_DViewer.TXT	27.10.2017 06:42
ICRP OIR OIR_Data_Viewer.exe	27.10.2017 06:42
OIR_Data_Viewer.ini	27.10.2017 06:42
OIRDataViewerHelp.chm	27.10.2017 06:42
README!!! Unblock OIR Data Viewer and ...	27.10.2017 06:42

Electronic Annex / OIR Data Viewer

Dose per Intake    Dose per Content & Reference Bioassay Functions

Intake Parameters

Radionuclide: C 14

Route of Intake: Inhalation

Material: Aerosols Type M, All unspecified forms,  $f_A=0.2$

AMTD/AMAD,  $\mu\text{m}$ : 5

Displayed Data

Dose per Content Function

Content for the Specified Dose 1 mSv

Content per Intake (Reference Bioassay Function)

Content in an Organ or Excreta Sample Associated with the Specified above Committed Effective Dose (1 mSv), Bq

Time, days	Whole Body	Urine (24-hour sample)	Faeces (24-hour sample)	Alimentary Tract*	Lungs
0	1.4E+6	-	-	-	1.4E+
0.041667	1.4E+6	-	-	4.7E+5	1.3E+
0.083333	1.4E+6	-	-	5.2E+5	1.2E+
0.125	1.3E+6	-	-	5.5E+5	1.2E+
0.25	1.3E+6	-	-	6.1E+5	1.1E+
0.375	1.2E+6	-	-	6.6E+5	1.1E+
0.5	1.2E+6	-	-	6.9E+5	1.0E+
0.625	1.2E+6	-	-	7.1E+5	9.9E+
0.75	1.1E+6	-	-	7.1E+5	9.6E+
0.875	1.0E+6	-	-	7.0E+5	9.4E+
1	9.9E+5	8.4E+4	1.2E+5	6.7E+5	9.2E+
1.125	9.3E+5	-	-	6.4E+5	9.0E+
1.25	8.7E+5	-	-	6.1E+5	8.9E+
1.375	8.1E+5	-	-	5.7E+5	8.8E+
1.5	7.6E+5	-	-	5.2E+5	8.7E+
1.625	7.0E+5	-	-	4.8E+5	8.6E+
1.75	6.5E+5	-	-	4.4E+5	8.6E+
1.875	6.0E+5	-	-	3.9E+5	8.5E+
2	5.5E+5	3.5E+4	3.7E+5	3.5E+5	8.4E+
2.25	4.7E+5	-	-	2.8E+5	8.3E+
2.5	4.0E+5	-	-	2.2E+5	8.3E+

\*See the Key Term help for the explanation

# Annals of the ICRP

ICRP PUBLICATION 135

Diagnostic Reference Levels in Medical  
Imaging



# Niveaux de référence diagnostic (NRD) outil efficace d'optimisation depuis 1996

## Buts de cette publication

Besoins de clarification

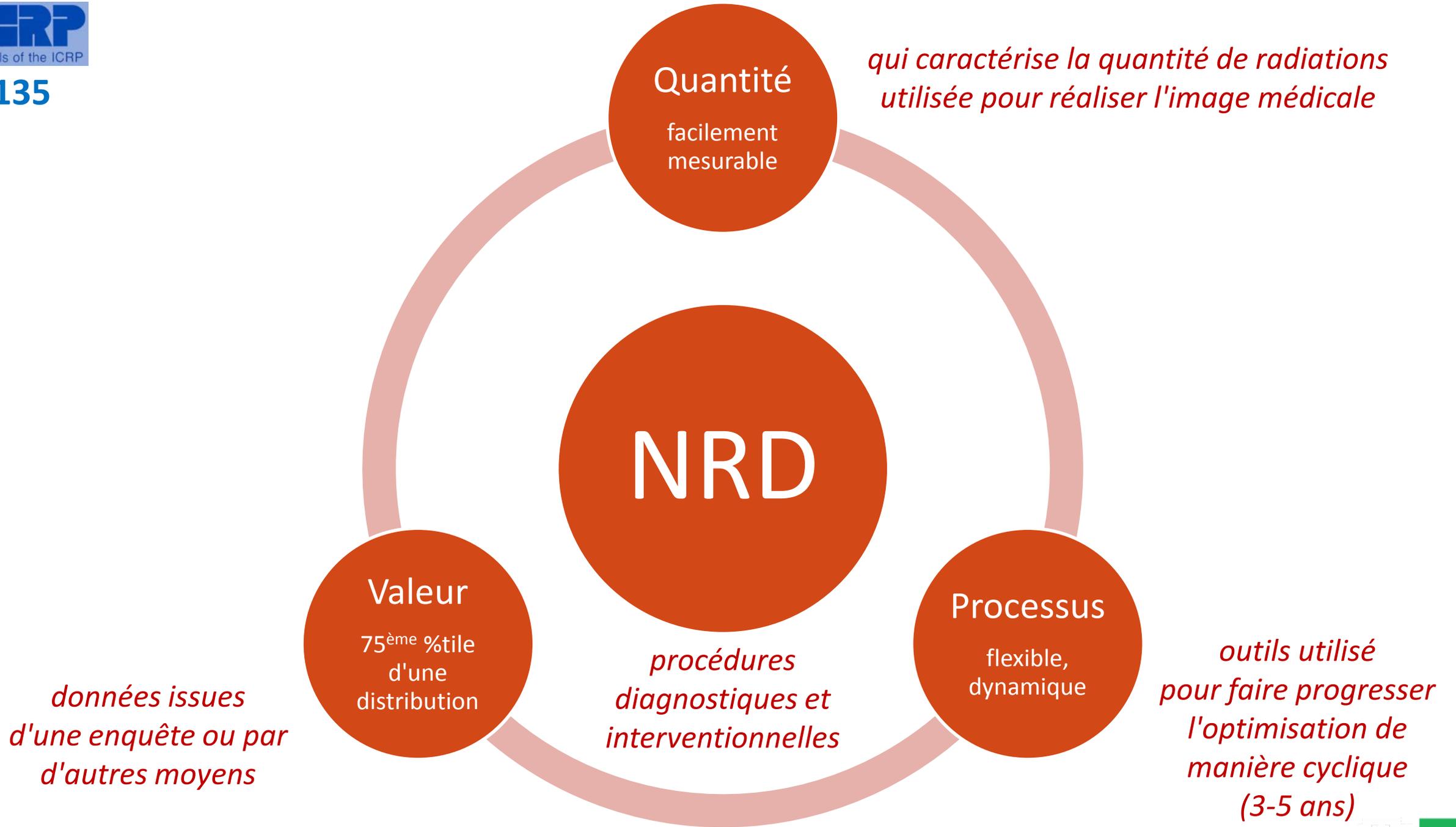
**définitions** des termes

détermination des **valeurs des NRDs**

intervalles de **réévaluation des NRDs**

utilisation des NRDs en **pratique clinique**

application du concept de NRD pour les **nouvelles modalités** d'imagerie



Les NRDs sont un **outil qui complète le jugement** des professionnels dans la **démarche d'optimisation**

La **médiane locale** doit être comparée au **75<sup>ème</sup> percentile national**  
*(pas une limite; pas pour des cas individuels)*

La **qualité d'image** fait partie intégrante du processus  
*(première priorité du diagnostic)*

Le processus d'optimisation **peut aboutir** à une **augmentation de la dose**

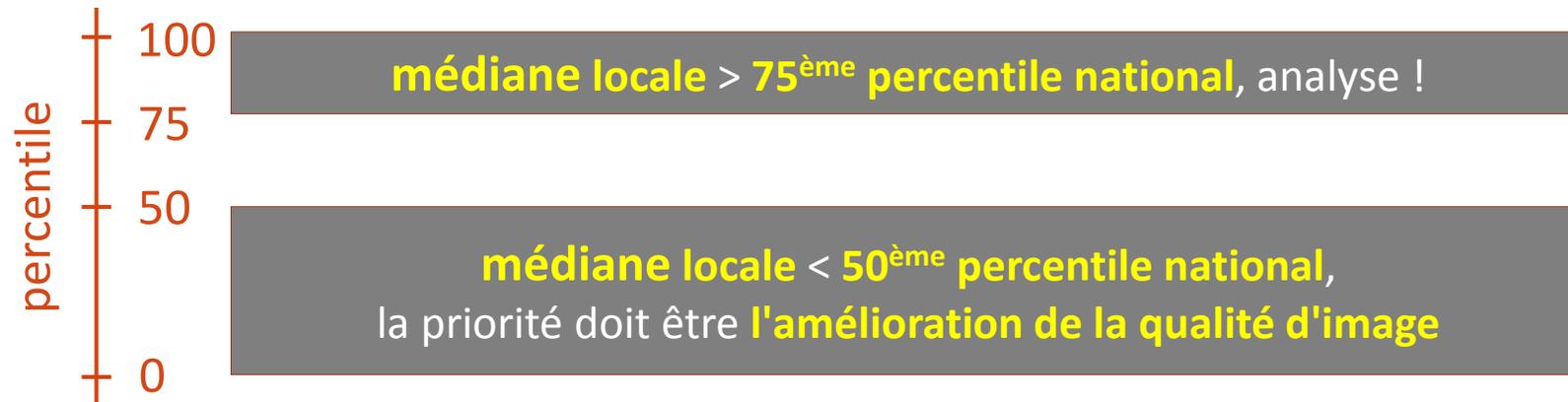


Table 2.1. Examination selection and method of assessment.

Examination	DRL recommended	Method of assessment
Mammography	Yes	Patient survey to set DRL and phantom measurements as standard dose comparator
Intra-oral dental radiography	Yes	Output measurement on standard settings
Panoramic dental radiography	Yes	Measurement of air kerma-area product on standard settings
CT	Yes	Patient survey
Radiography of the trunk	Yes	Patient survey preferred
Skull radiography	Yes	Patient survey
Paediatric radiology	Yes	Patient survey
Paediatric CT	Yes	Patient survey
Extremity radiography	Yes (lower priority)	Patient survey
Mobile radiography	Yes (lower priority)	Patient survey
Neonatal radiography	Yes	Patient survey
Paediatric mobile radiography	Yes (for dedicated children's hospitals)	Patient survey
Barium studies	Yes	Patient survey
Interventional radiology and cardiology	Yes	Patient survey
Other fluoroscopy	Possibly, depending on level of use	Patient survey
Nuclear medicine – adult	Yes	Based on administered activity or, preferably, activity per body weight
Nuclear medicine – paediatric	Yes	Based on administered activity with adjustments for the size or weight of the child
Bone densitometry	Yes (lower priority)	Patient survey

DRL, diagnostic reference level; CT, computed tomography.

Table 2.3. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) symbols for diagnostic reference level quantities.

ICRU symbol*	Meaning	Other common symbol
$CTDI_{vol}$	Computed tomography dose index (volume)	
DLP	Dose-length product	
$K_{a,i}$	Incident air kerma	IAK
$K_{a,e}$	Entrance-surface air kerma	ESAK, ESD
$K_{a,r}$	Incident air kerma at the patient entrance reference point	CAK
$D_G$	Mean glandular dose	MGD, AGD
$P_{KA}$	Air kerma-area product	KAP, DAP

\*This publication uses ICRU symbols. Other common symbols are shown for the convenience of the reader.

Table 2.4. Quantities suitable for setting diagnostic reference levels (DRLs).

Equipment	Recommended quantity	Recommended unit
Radiography	$K_{a,e}$	mGy
	$P_{KA}$	mGy cm <sup>2</sup>
Mammography, breast tomosynthesis	$K_{a,e}$ , $K_{a,i}$ , or $D_G^*$	mGy
Dental intra-oral	$K_{a,i}$	mGy
Dental panoramic	$P_{KA}$ (or dose–width product)	mGy cm <sup>2</sup> (mGy cm)
Diagnostic fluoroscopy, interventional fluoroscopy	$P_{KA}$	Gy cm <sup>2</sup>
	$K_{a,r}$	Gy
	Fluoroscopy time	s
	Number of images in cine or digital subtraction angiography runs	Number
CT, interventional CT	$CTDI_{vol}$	mGy
	DLP	mGy cm
Cone-beam CT (depending on availability of the quantity)	$K_{a,r}$	mGy
	$P_{KA}$	mGy cm <sup>2</sup>
	$CTDI_{vol}$	mGy
	DLP	mGy cm
Nuclear medicine	Administered activity or activity per body weight <sup>†</sup>	MBq or MBq kg <sup>-1</sup>

CT, computed tomography;  $K_{a,e}$ , entrance-surface air kerma;  $P_{KA}$ , air kerma-area product;  $K_{a,i}$ , incident air kerma;  $D_G$ , mean glandular dose;  $K_{a,r}$ , air kerma at the patient entrance reference point;  $CTDI_{vol}$ , computed tomography dose index (volume); DLP, dose–length product.

\*For mammography and tomosynthesis, the recommended DRL quantity is one or more of  $K_{a,e}$ ,  $K_{a,i}$ , or  $D_G$ , with the choice of quantity depending on local practices and regulatory requirements.

†For some nuclear medicine investigations for which the radiopharmaceutical is concentrated predominantly in a single organ (e.g. thyroid, sentinel node imaging, pulmonary ventilation, and perfusion studies), a standard activity could be administered for all adult patients. For other nuclear medicine examinations, the ideal would be for administered activities to be based on patient weights (MBq kg<sup>-1</sup>). The Commission recommends that weight-based administered activities should be used for children, adolescents, and low-weight patients, and considered for other groups. Where only administered activities (MBq) in adults are available from a survey, DRL values in adult nuclear medicine are normally based on the administered activities used for average-sized patients (e.g. 70 ± 10 kg). A DRL value for administered activity per unit body weight (MBq kg<sup>-1</sup>) can be calculated from this as required.

*Suite du document*

## **Etablissement des NRDs**

### **Particularités de chaque modalité**

Radiographie et scopie diagnostique

Procédures interventionnelles

CT, médecine nucléaire et procédures multimodales

Pédiatrie

# Application locale des NRDs

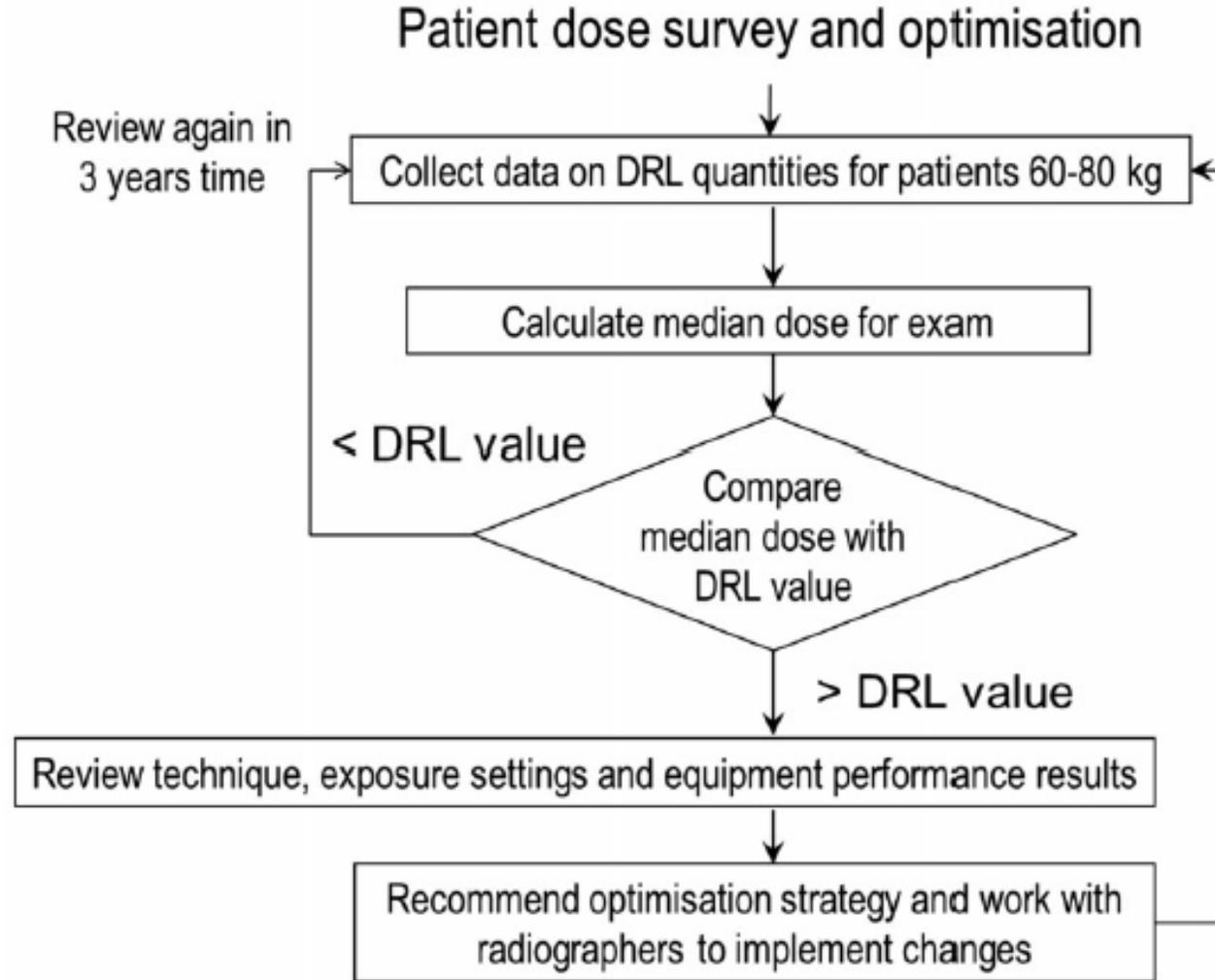


Fig. 7.1. Example of audit cycle and optimisation flow chart. DRL, diagnostic reference level.



ICRP

# Evolution du système de radioprotection

## catégories d'exposition

situations d'exposition

	Professionnelle <i>Occupational</i>	Publique <i>Public</i>	Médicale <i>Patient</i>
<b>Planifiée</b> <i>Planned</i>	J+O L C	J+O L C	J+O DRL
<b>Urgence</b> <i>Emergency</i>	J+O RL	J+O RL	X
<b>Existantes</b> <i>Existing</i>	J+O RL	J+O RL	X

J+O: justification & optimisation

L: limite

C: contrainte

RL: niveau de référence

## Comment

faire entrer explicitement et de manière cohérente l'environnement (plantes et animaux) dans le système ?

via le concept de développement durable ?

en superposant animaux et plantes sur le système actuel ?



# Mieux **communiquer**

Quelle était la valeur des autorités de radioprotection lors de l'accident de Fukushima ?

## **Almost useless!**

*une représentante d'un groupement  
citoyen de Fukushima interrogée lors du  
séminaire ICRP, Séoul, 2015*

Les publications doivent être écrites dans  
un **langage accessible**  
*(plain language)*

Le site Internet présente maintenant des  
résumés des publications et du système  
de radioprotection  
**ICRPaedia**



ICRP + ICRU

FINAL **DRAFT** JULY 2017

Report No. XX

# OPERATIONAL QUANTITIES FOR EXTERNAL RADIATION EXPOSURE

Joint report of  
THE INTERNATIONAL COMMISSION ON  
RADIATION UNITS AND  
MEASUREMENTS  
and  
THE INTERNATIONAL COMMISSION ON  
RADIOLOGICAL PROTECTION



Projet en **consultation** durant l'**été 2017**

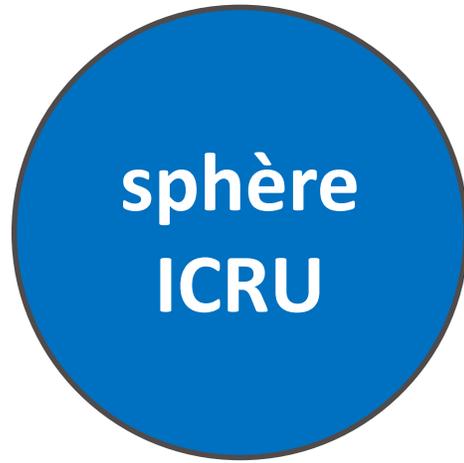
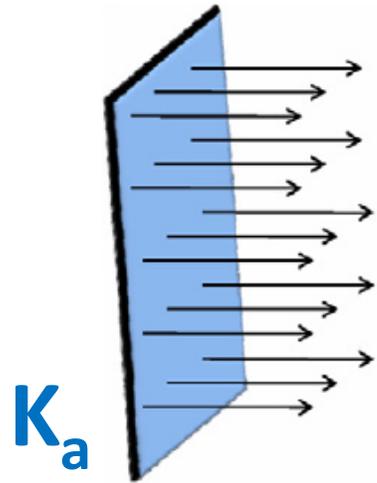
# Idées de base

Remplacer la **sphère ICRU** par les **fantômes 3D ICRP**

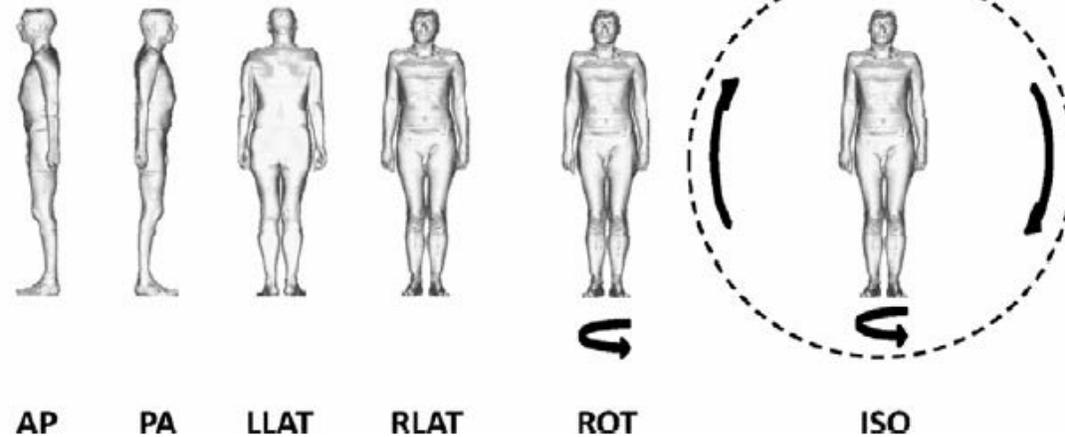
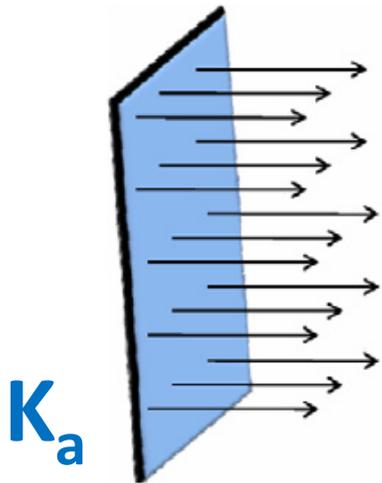
distinguer les  
effets **stochastiques**  
des **réactions tissulaires**

uniquement estimés par  
la **dose efficace, E**  
exprimée en **Sv**

uniquement estimées par  
la **dose absorbée, D**  
exprimée en **Gy**

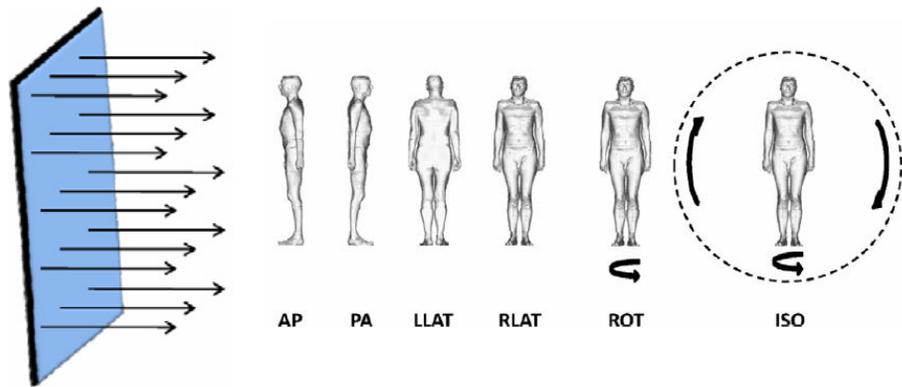


$$E \approx H^*(10) = K_a h_p(10)$$



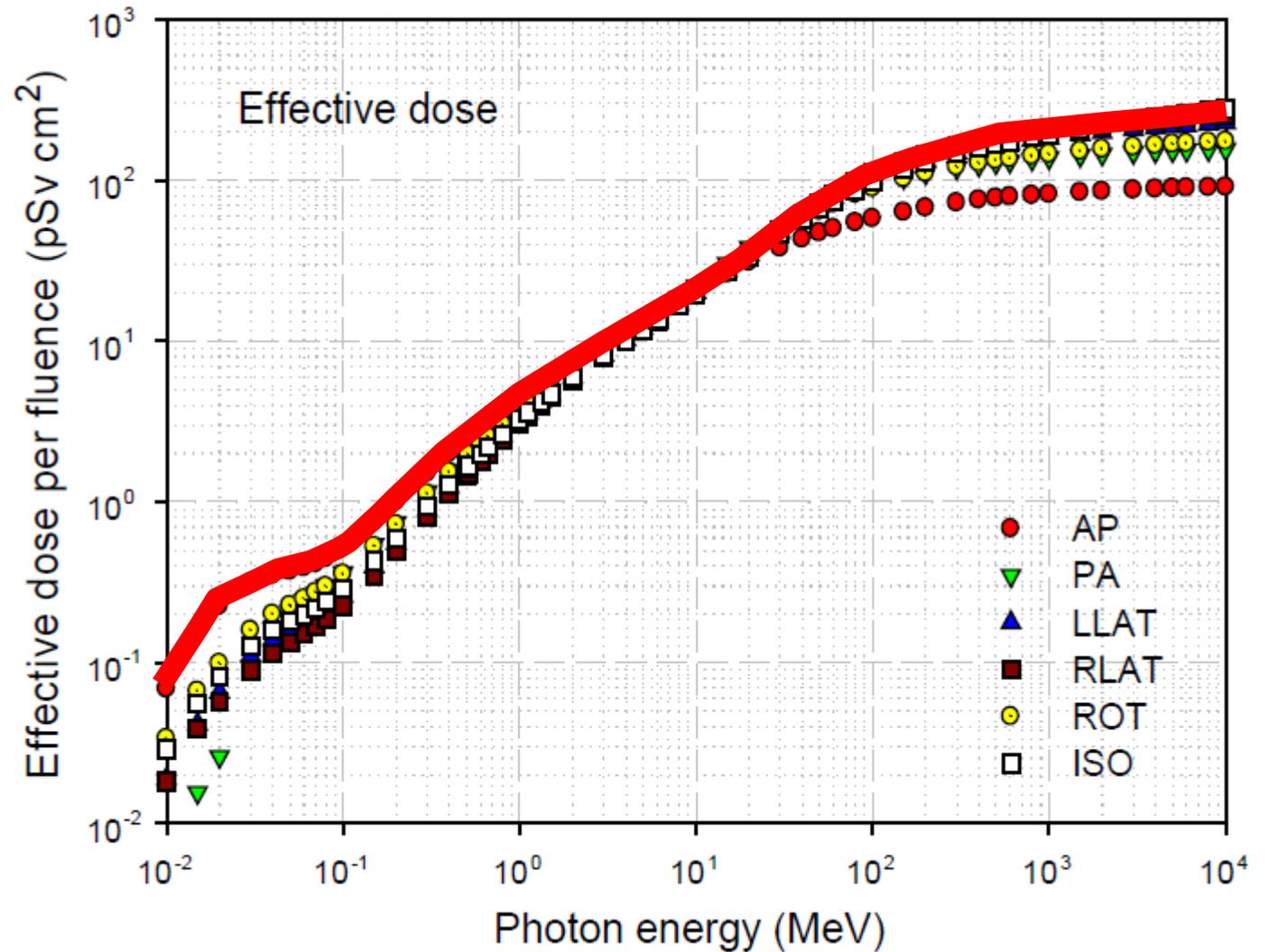
$$E = E_{\max} \approx K_a h_p$$

fantômes 3D ICRP



Simulation réalisée pour  
**chaque géométrie**  
 d'irradiation  
 (AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO)

Dose efficace =  $E_{\max}$   
 (géométrie donnant la valeur maximale)



# Comparaison avec situation actuelle

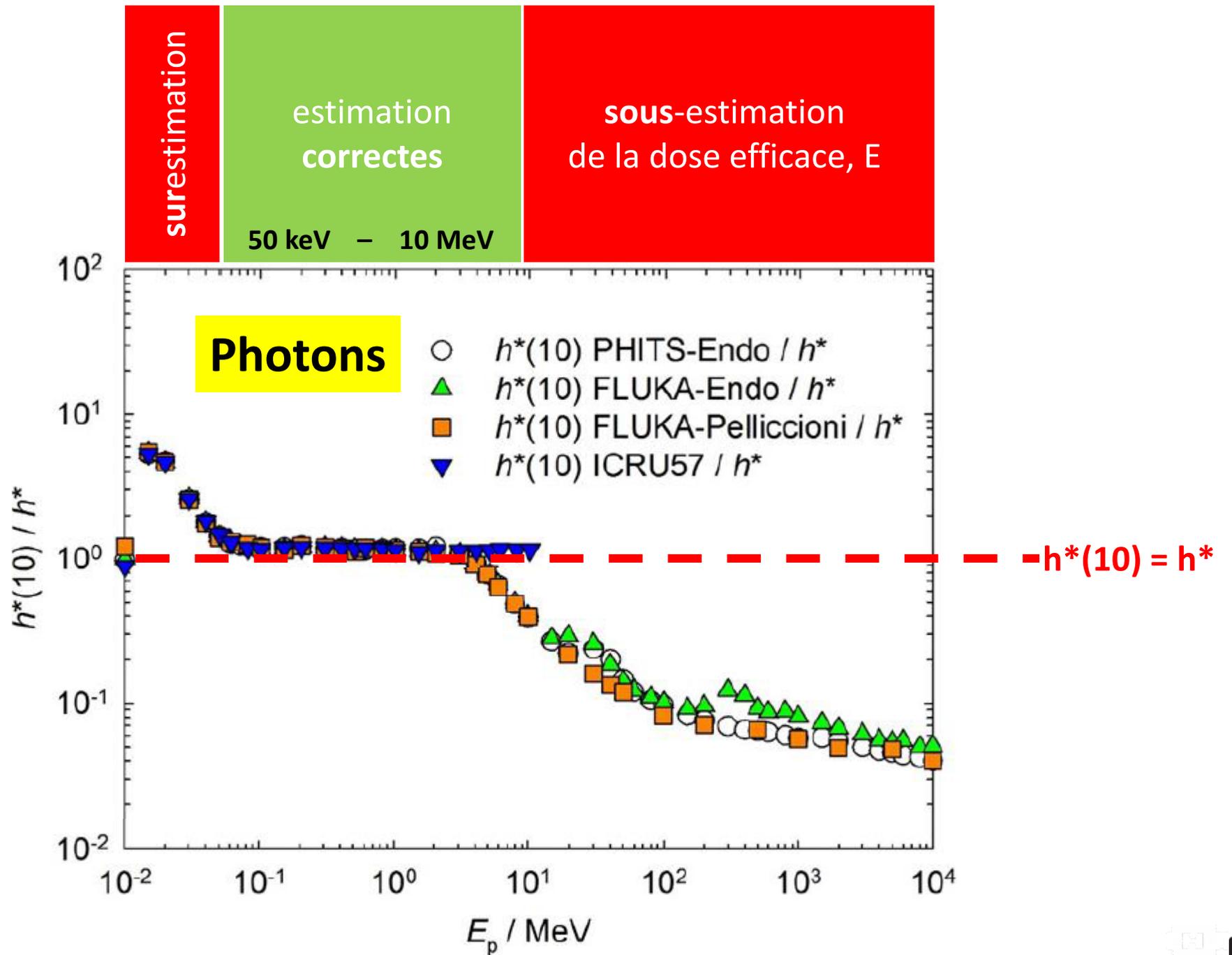


Figure 4.1 du draft

*Dose ambiante,  $H^*$*

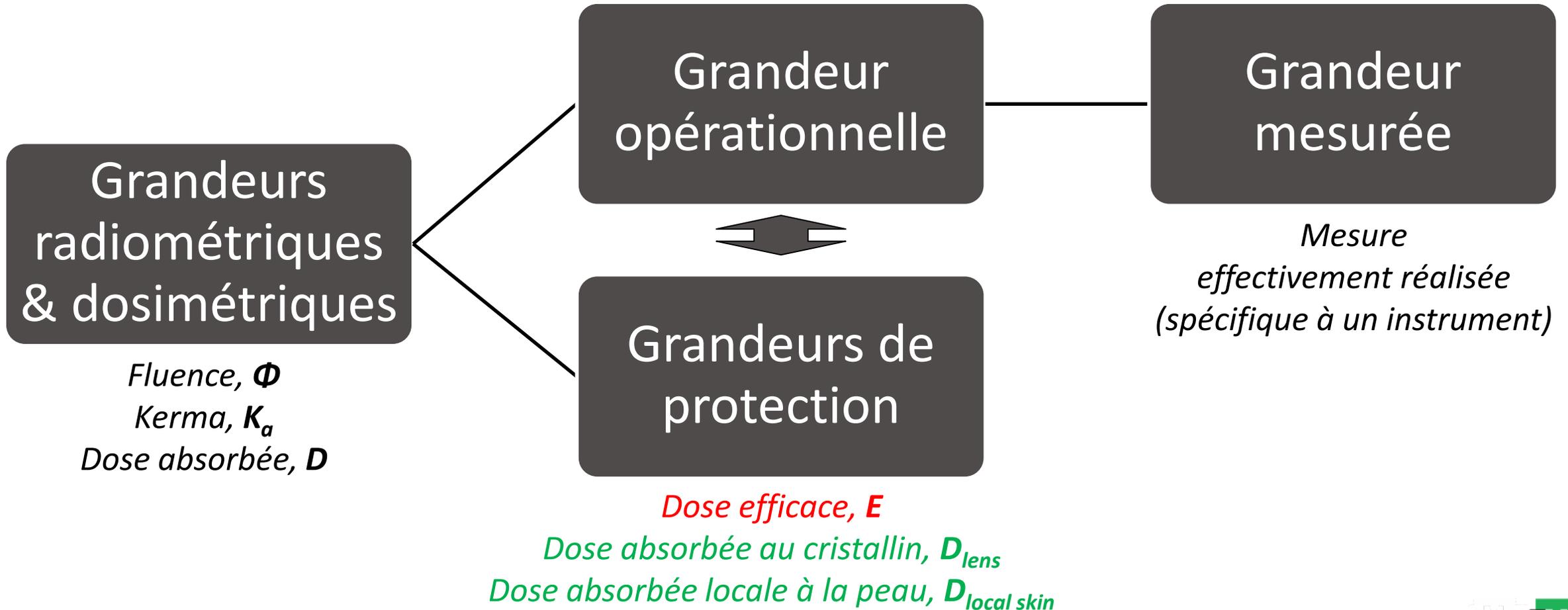
*Dose absorbée directionnelle au cristallin,  $D'_{lens}(\Omega)$*

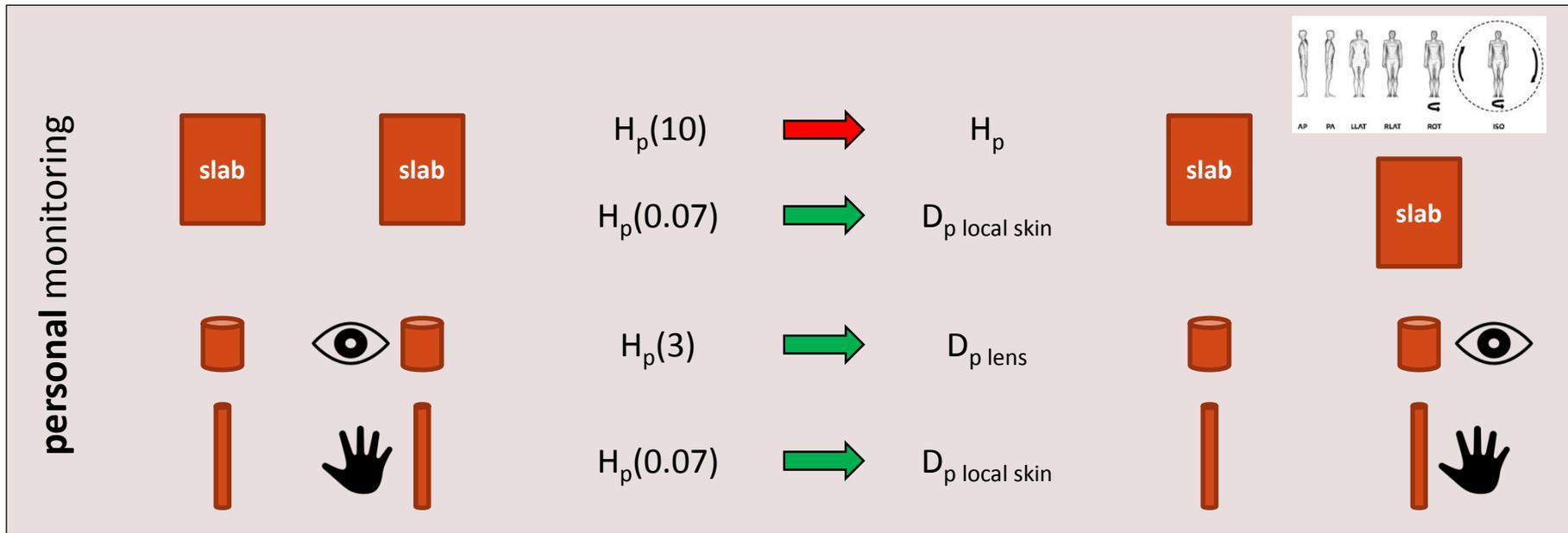
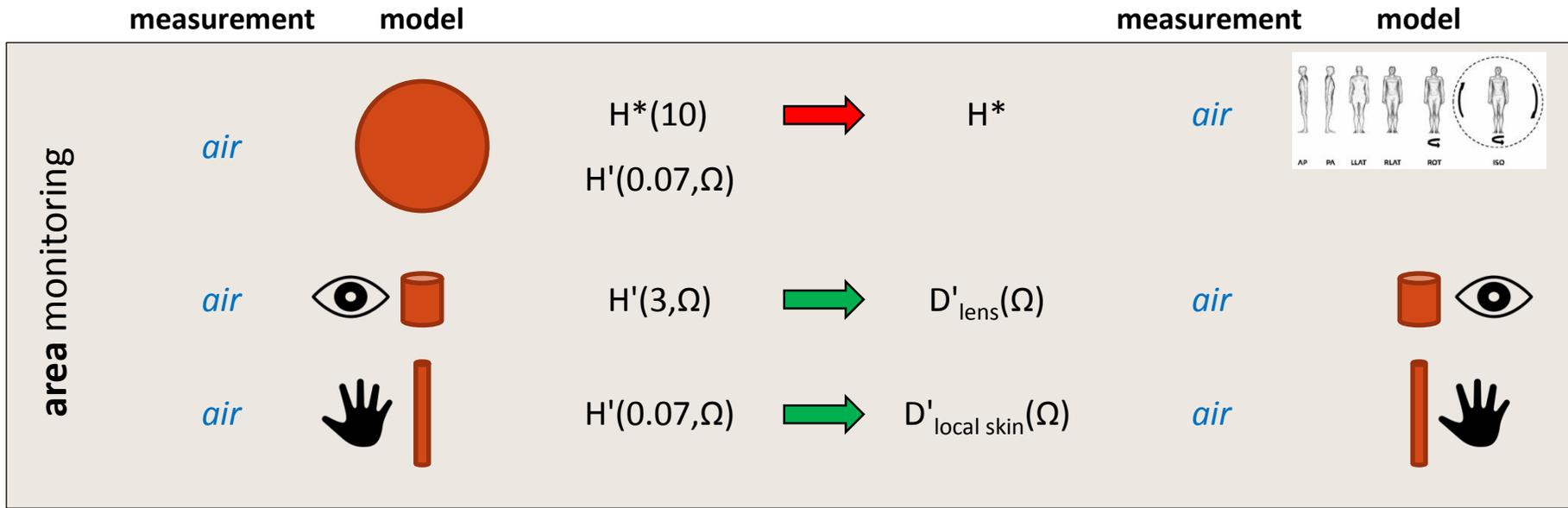
*Dose absorbée directionnelle locale à la peau,  $D'_{local\ skin}(\Omega)$*

*Dose individuelle,  $H_p$*

*Dose absorbée individuelle au cristallin,  $D'_{p\ lens}$*

*Dose absorbée individuelle locale à la peau,  $D'_{p\ local\ skin}$*





**stochastic effect**  
in Sv

**tissue effect**  
in Gy

A stack of numerous old, worn books and newspapers is shown from a slightly elevated, angled perspective. The pages are yellowed and the covers are frayed and discolored in various shades of brown, blue, and red. A semi-transparent white rectangular box is centered over the middle of the stack, containing the text "Autres publications" in a bold, black, sans-serif font.

# Autres publications

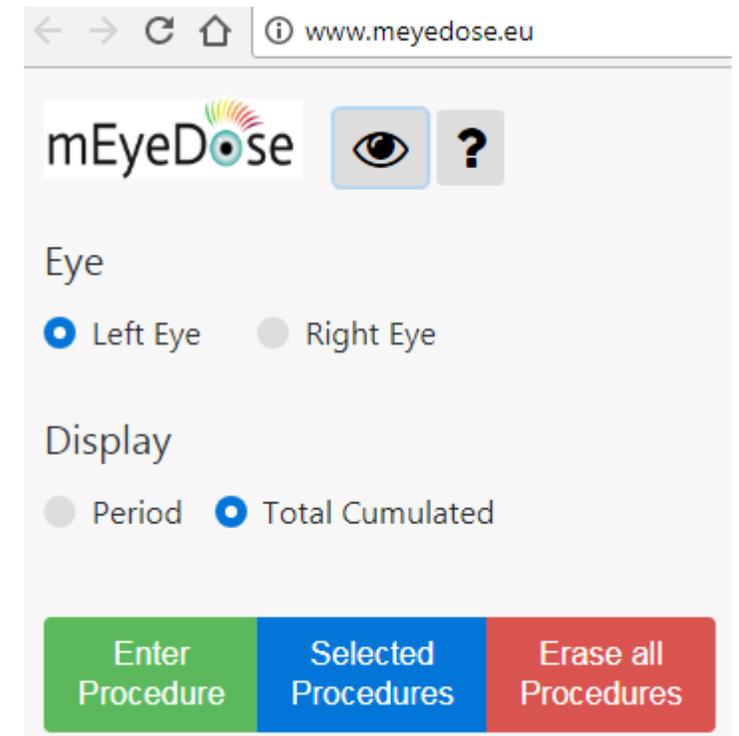
# Estimation du **risque d'opacité de l'œil**

Evaluation de la dose et de l'opacité du cristallin  
chez **268 cardiologues**

Cataracte postérieure sous-capsulaire (*PSC lens opacity*)  
statistiquement **plus fréquente**

Parmi différents modèles dose-réponse et le **LNT** est celui  
qui s'ajuste le mieux aux données : **ERR = 1.31 D<sub>p</sub> lens**  
*avec CI95%(0.13-3.32)*

P.ex. **risque relatif** de développer une opacité PSC  
pour un **cardiologue de 60 ans**  
recevant une **dose cumulée de 0.5 Sv** est de **1.65**



# Quel **biomarqueur** est le plus efficace pour caractériser les effets des **radiations ionisantes** ?

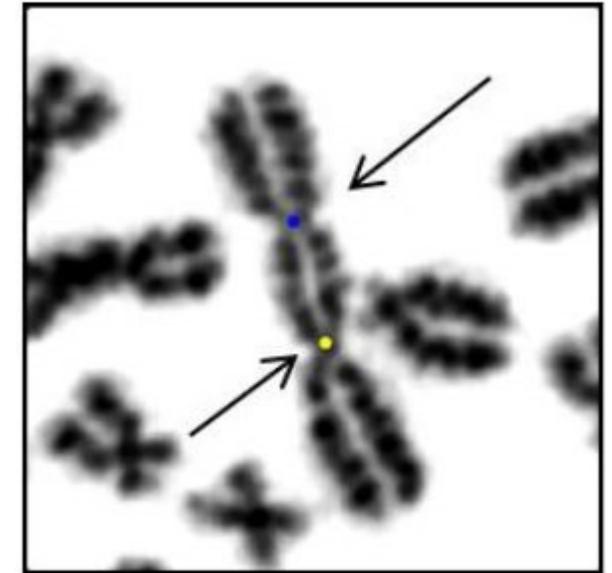
## Chromosomes **dicentriques**

**Marqueur typique** des radiations ionisantes  
(robuste pour trier par rapport à d'autres toxiques)

**Prend du temps** à mesurer

**Automatisation** de plus en plus importante  
meilleure **reproductibilité**  
baisse de la **limite de détection**  
(LD < 50 mGy au sang)

Mesure des dicentriques pour évaluer  
la **sensibilité individuelle** ?



exemple de chromosome  
**dicentrique**  
(2 centromères)

# Absence de relation entre la **leucémie** aiguë de l'enfant et une exposition à la **radioactivité naturelle** en France

**9 056 cas de leucémie** aiguë chez les enfants de moins de 15 ans  
(registre national français des cancers entre 1990 et 2009)

L'**exposition** aux rayonnements gamma naturels, au radon et à la radioactivité totale estimée par la **commune de résidence** au moment du diagnostic

**Aucune association** n'a été **mise en évidence** entre la survenue d'une leucémie aiguë et l'exposition à la radioactivité naturelle



NB : L'**étude suisse** de Spycher (2015) montrait une association, mais elle était **à peine significative**, grâce à 29 cas observés en altitude



# Polonium-210 poisoning: a first-hand account

*Amit C Nathwani, James F Down, John Goldstone, James Yassin, Paul I Dargan, Andres Virchis, Nick Gent, David Lloyd, John D Harrison*

**Lancet 2016; 388: 1075-80**

Published Online

July 22, 2016

[http://dx.doi.org/10.1016/](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(16)00144-6)

[S0140-6736\(16\)00144-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(16)00144-6)

**IOP Publishing** | Society for Radiological Protection

Journal of Radiological Protection

J. Radiol. Prot. 37 (2017) 266–278 (13pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa58a7>

## The polonium-210 poisoning of Mr Alexander Litvinenko

**John Harrison<sup>1,2</sup>, Tim Fell<sup>2</sup>, Rich Leggett<sup>3</sup>, David Lloyd<sup>2</sup>,  
Matthew Puncher<sup>2,†</sup> and Mike Youngman<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Oxford Brookes University, Faculty of Health and Life Sciences, Oxford, OX3 0BP, United Kingdom

<sup>2</sup> Public Health England, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0RQ, United Kingdom

<sup>3</sup> Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 27831, United States of America

**IOP Publishing** | Society for Radiological Protection

Journal of Radiological Protection

J. Radiol. Prot. 37 (2017) 837–851 (15pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa80f5>

## Collateral contamination concomitant to the polonium-210 poisoning of Mr Alexander Litvinenko

**John Harrison<sup>1,2</sup>, Tracy Smith<sup>1</sup>, Tim Fell<sup>1</sup>, Jenny Smith<sup>1</sup>,  
George Ham<sup>1</sup>, Richard Haylock<sup>1</sup>, Alan Hodgson<sup>1</sup> and  
George Etherington<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Public Health England, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0RQ, United Kingdom

<sup>2</sup> Oxford Brookes University, Faculty of Health and Life Sciences, Oxford, OX3 0BP, United Kingdom

# Evolution du **tableau clinique**

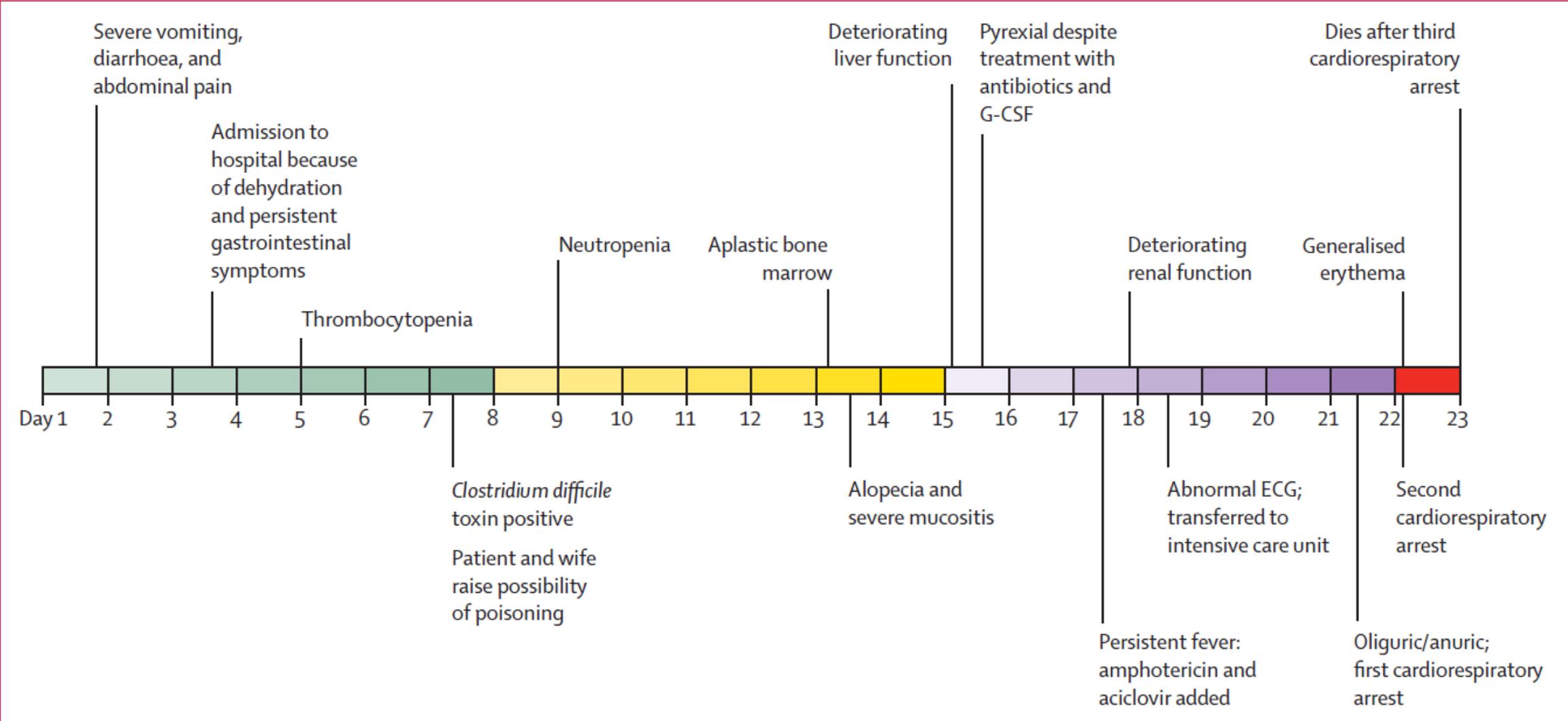


Figure 1: Schematic of clinical milestones following exposure to polonium-210 on day 1

(16) oct 2006

ingestion environ **0.04 GBq**

1 nov 2006

ingestion environ **4.4 GBq**  
(env. 40  $\mu\text{g}$  sous forme de sel)  
inhalation **< 0.2 GBq**

**10 % sang**  
**90 % selles**

22 nov 2006

opacification d'un **film** par un prélèvement sanguin  
**spectro  $\gamma$**  urine met en évidence possibilité  **$^{210}\text{Po}$**

23 nov 2006

**décès** par syndrome de défaillance multiviscérale  
(multiple organ failure)

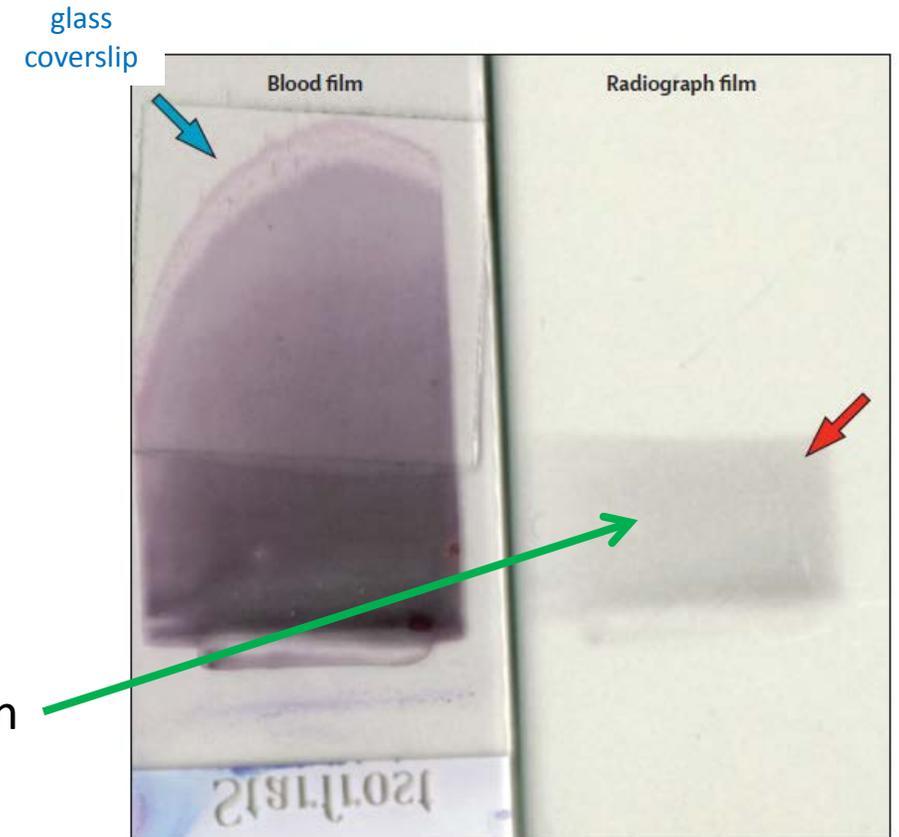


Figure 3: Radiograph film (right image) exposed to the patient's blood smear (left image) showing opacification (red arrow) in the exposed area of the smear but not in the adjacent area that was covered by a glass coverslip (blue arrow)

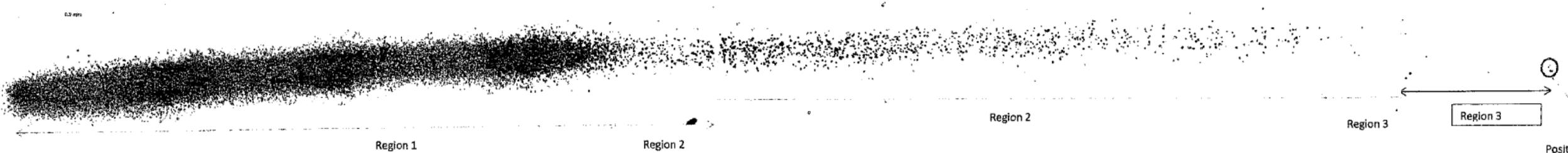
# Autoradiographie d'un cheveu (par détecteur à traces)

env. **100 fois plus** de traces dans **région 1** que dans **région 2**

Région 1

Région 2

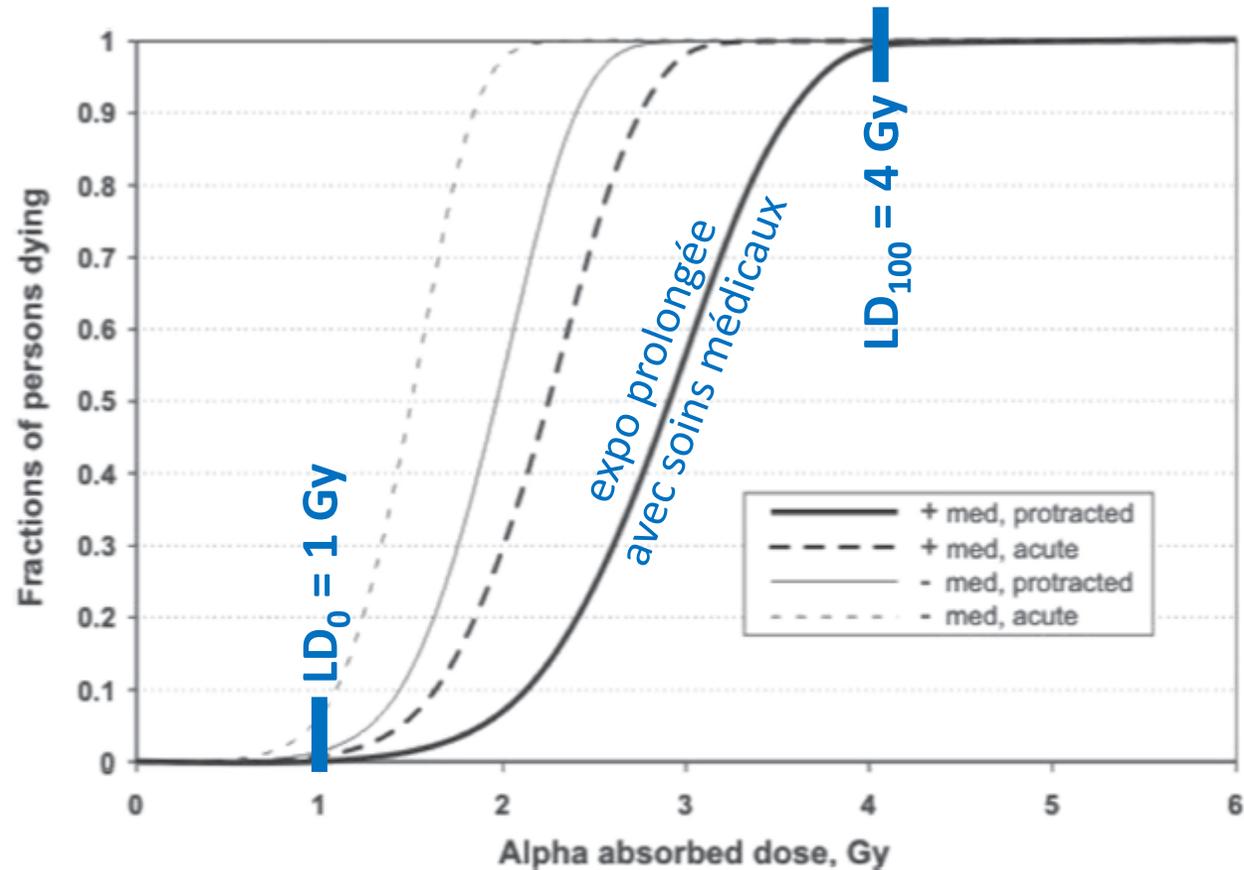
Région  
3



Racine

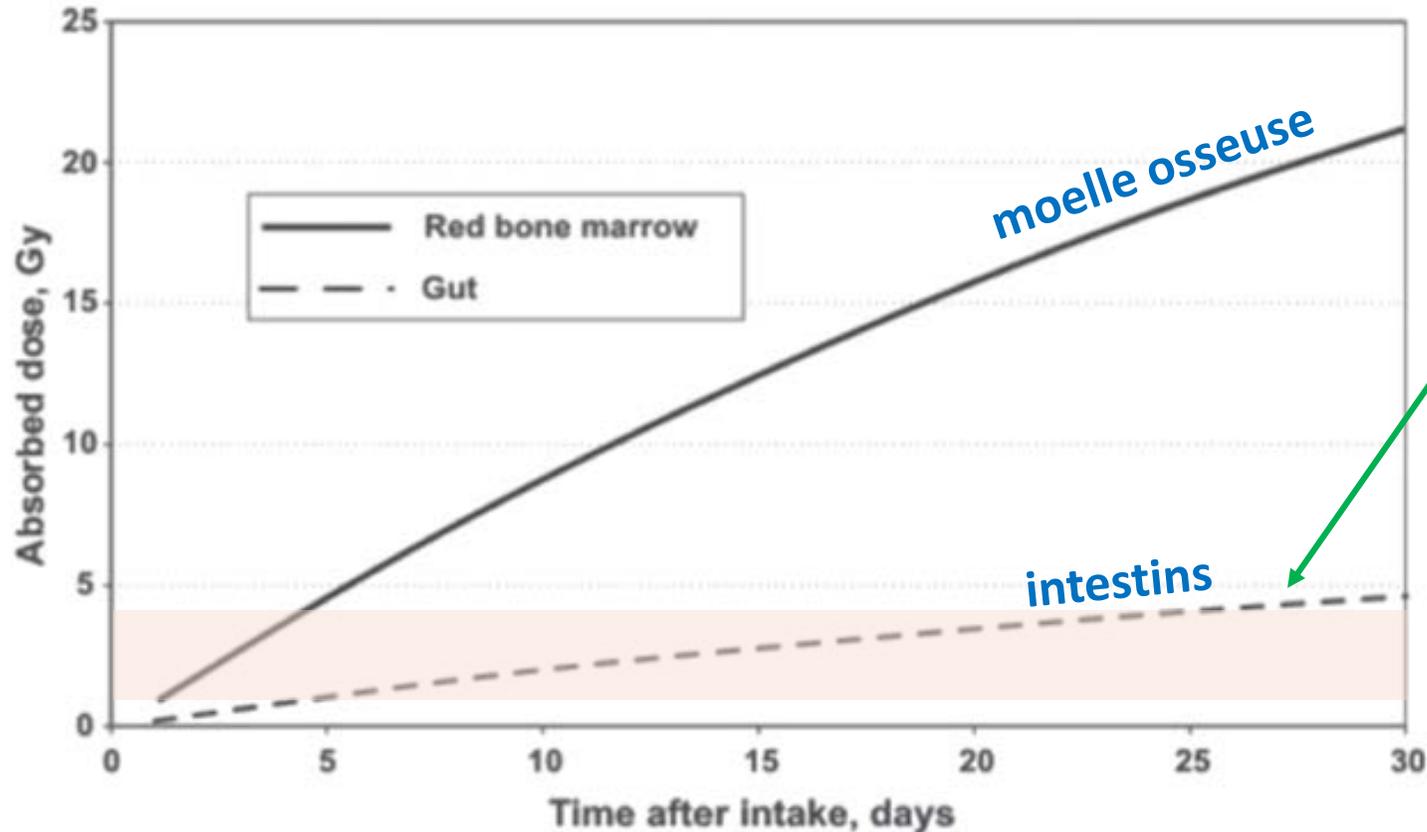
vitesse de pousse **0.3-0.4 mm/d**  
(env. 4 nm/s)

# Fraction de décès en fonction de la dose à la moelle osseuse (selon la littérature)



**Figure 3.** Indicative dose—response curves for mortality due to bone marrow failure after alpha particle irradiation, assuming an  $RBE_{\alpha}$  of 2. Curves are given for minimal medical care (– med) and good supportive care (+ med), acute dose delivery (acute), and protracted dose delivery (protracted) as shown in figure 2.

# Evolution des doses à la **moelle** et aux **intestins** en fonction du temps après incorporation

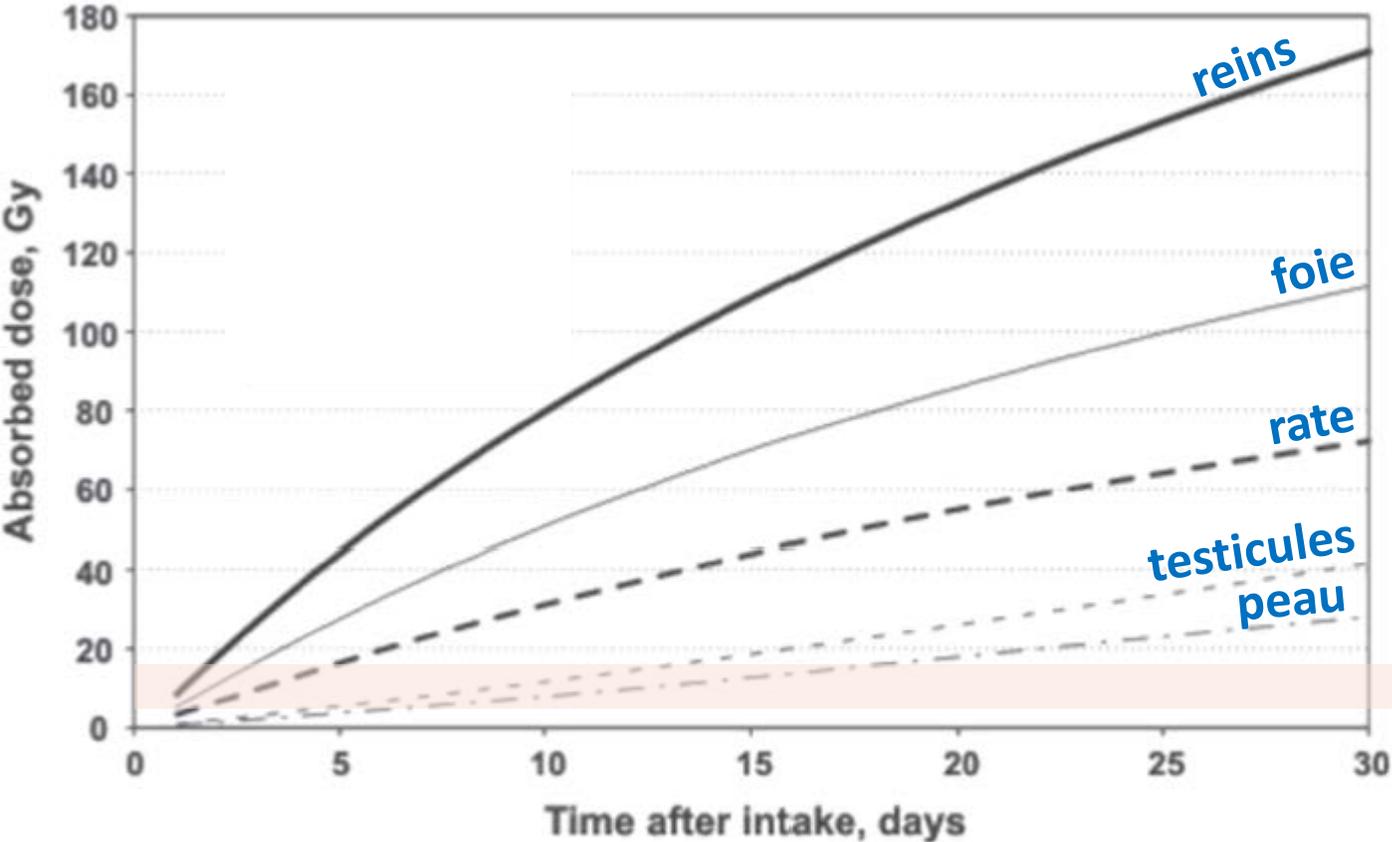


possible que **cette dose** ait été **sous-estimée**, car une irradiation prolongée **détruit progressivement les muqueuses** (l'incorporation d'octobre aurait pu être fatale sur le long terme)

**LD<sub>0</sub>-LD<sub>100</sub>**  
(moelle osseuse)  
**RBE<sub>α</sub>=2**

Figure 2. Cumulative absorbed dose to the red bone marrow and regions of the alimentary tract of a reference adult male after ingestion of 4.4 GBq of <sup>210</sup>Po, assuming 10% absorption to blood.

# Evolution des doses aux autres organes



LD<sub>0</sub>-LD<sub>100</sub>  
(6-15 Gy)  
(syndrome GI)  
RBE<sub>α</sub>=2

Figure 1. Cumulative absorbed dose to organs/tissues of a reference adult male after ingestion of 4.4 GBq of <sup>210</sup>Po, assuming 10% absorption to blood.

# Mesures faites sur les **personnes impliquées**

Mesures d'urine réalisées sur un **grand nombre de personnes**

**1 L d'urine** prélevé sur  
urine de 24 heures  
déposé sur disque Ag pour  
**comptage  $\alpha$**

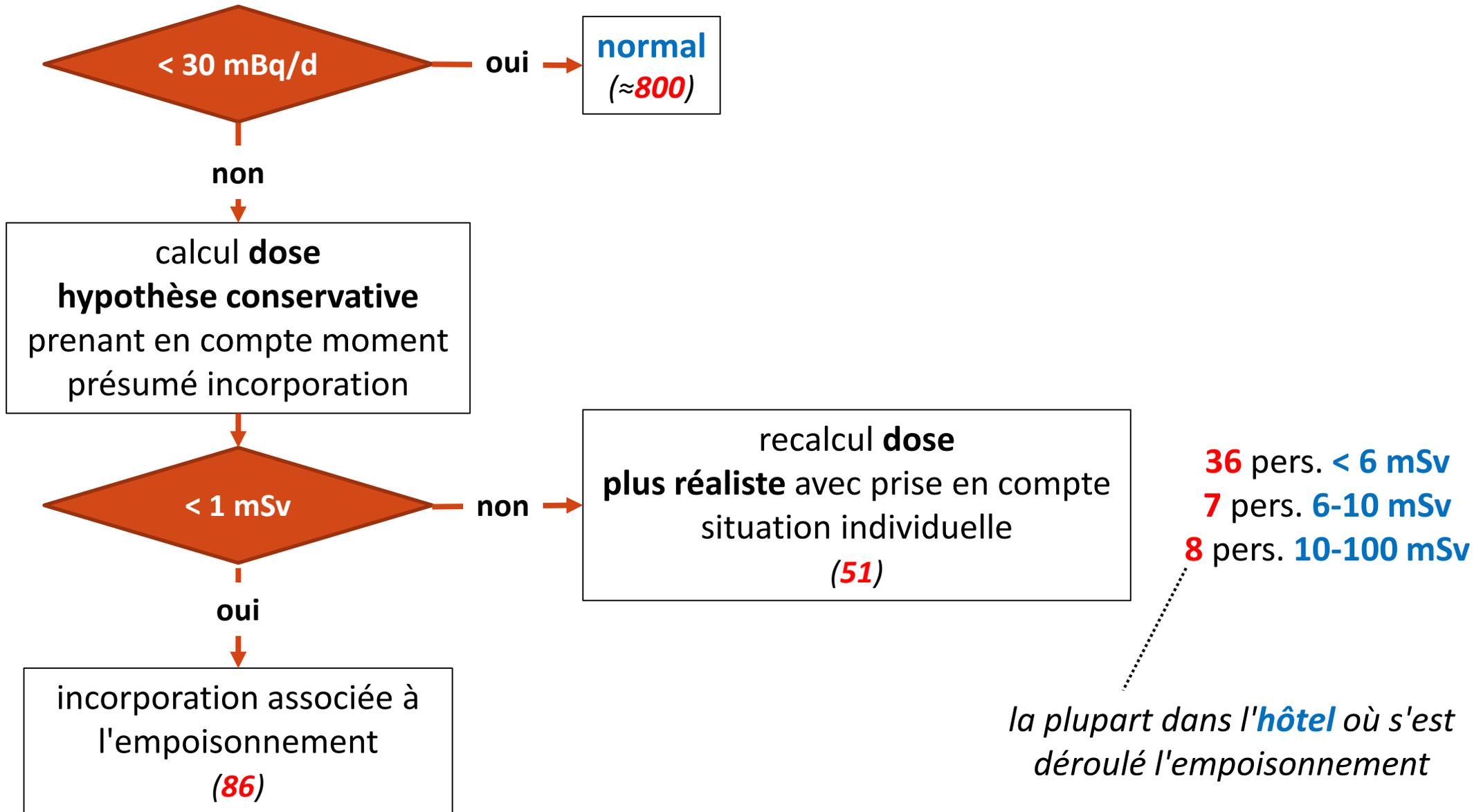


**Situation normale selon la littérature**

moyenne : 14 mBq/d  
médiane : 9 mBq/d

**90 % < 30 mBq/d**  
95 % < 45 mBq/d  
99 % < 70 mBq/d  
max 170 mBq/d

# Mesures faites sur les personnes impliquées



# Mesures faites sur 2 citoyens russes impliqués (X et Y\*)

**excrétion augmentée** d'un  
facteur 4-15  
(réduction de **dose** : 5-10 %)

## Incorporation de X

6-7 MBq  
(si 16.10.2006)  
4 MBq  
(si 01.11.2006)

## Incorporation de Y

facteur 10 inférieur

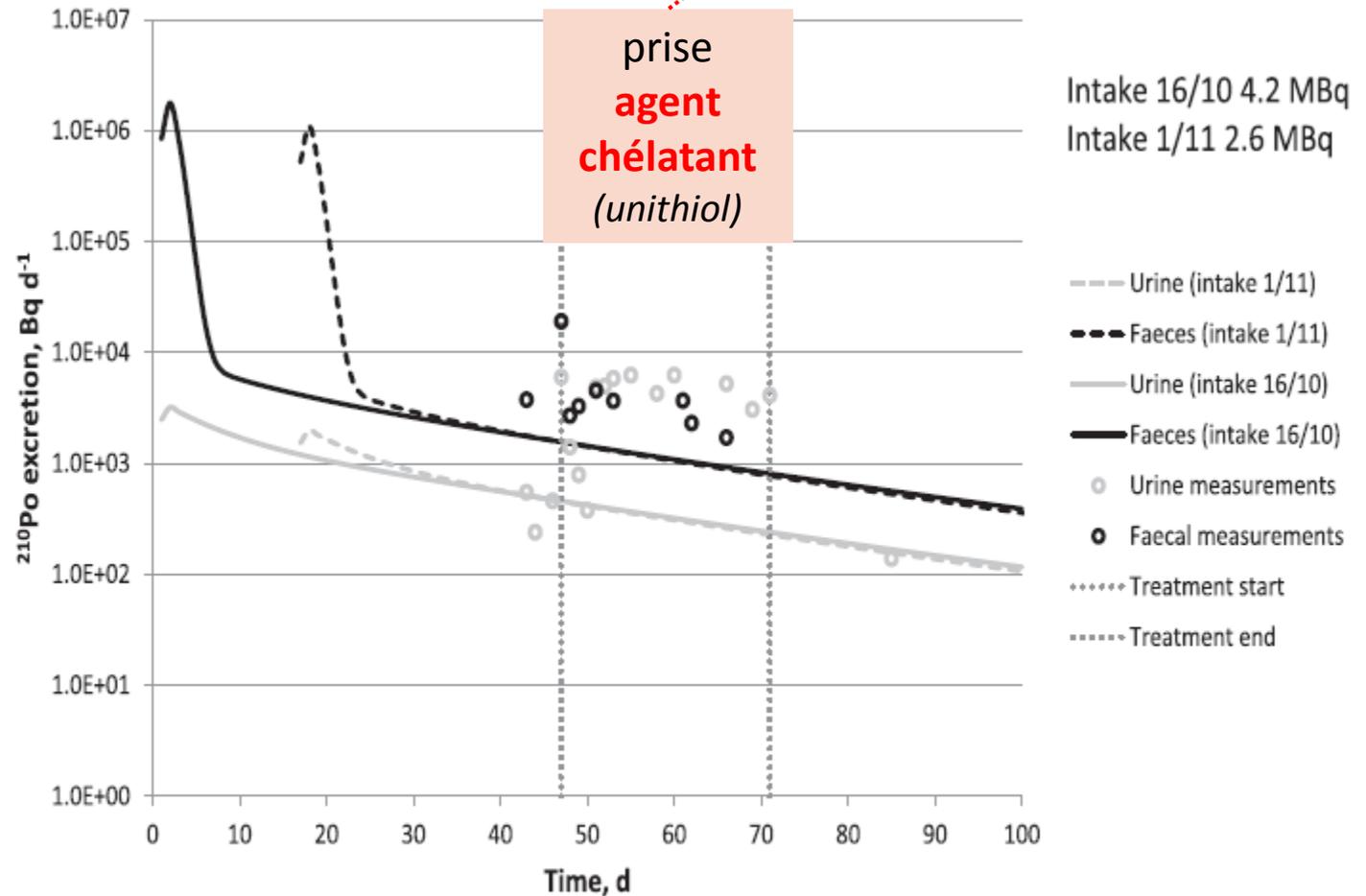


Figure 1. Urinary and faecal excretion of  $^{210}\text{Po}$  for X, comparing modelled excretion for inhalation or ingestion based on intake corresponding to urine sample 3 (table 1), and measured values during unithiol treatment.

# Mesures faites sur 2 citoyens russes impliqués (X et Y\*)

## Incorporation de X

**6-7 MBq**

*(si 16.10.2006)*

**4 MBq**

*(si 01.11.2006)*

## Incorporation de Y

**facteur 10** inférieur

## Dose aux organes

foie : **300 mGy**

reins : **400 mGy**

poumons : **4-5 Gy**

*(si inhalation)*

**facteur 10** plus faible

## Dose efficace

ingestion 100 % : **1.5 Sv**

inhalation 100 % : **9 Sv**

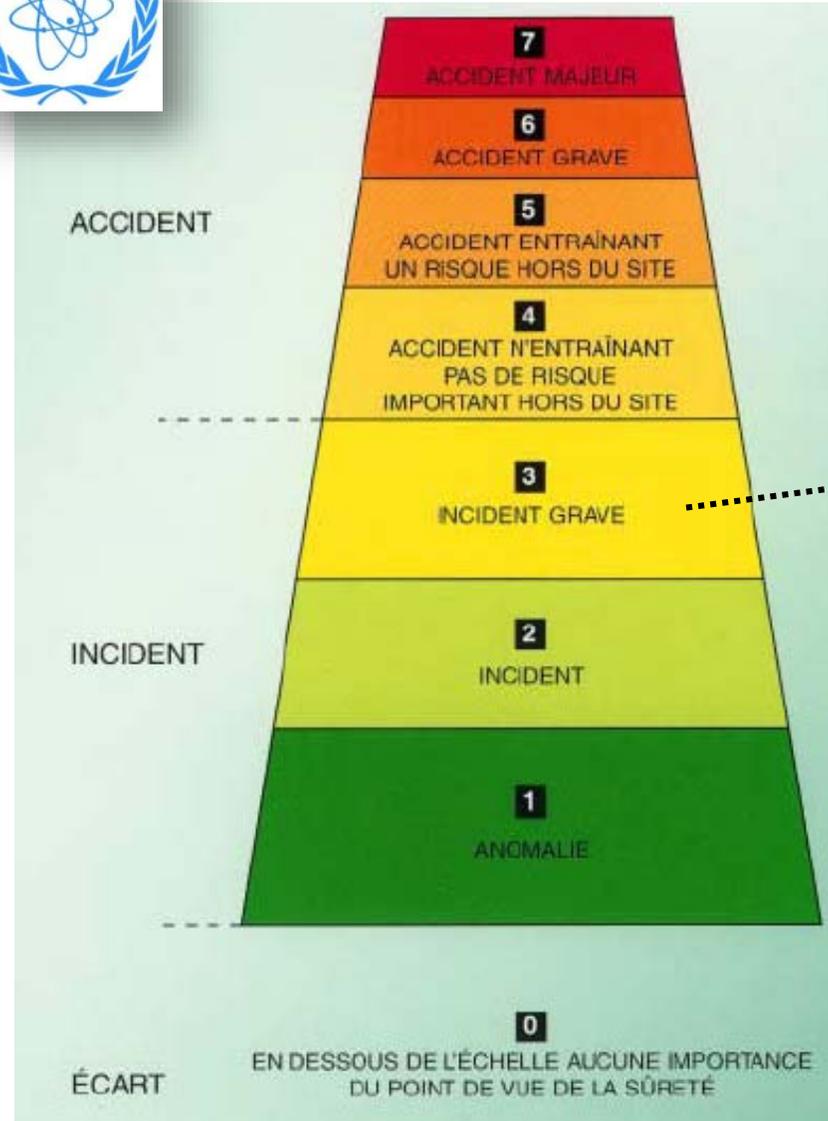
50/50 % : **5 Sv**

ingestion 100 % : **0.2 Sv**

inhalation 100 % : **1 Sv**

50/50 % : **0.8 Sv**

# Accidents 2017



1 événement  
INES 3



Australian Government



Nuclear-based science benefiting all Australians

**22.08.2017**

Australian Nuclear Science  
& Technology Org

# Exposition aux **mains** lors d'un **contrôle de qualité**

Contrôle de qualité  
d'un échantillon de  **$^{99}\text{Mo}$**   
(0.6 mL / **4.5 GBq**)

Le récipient s'est vidé et  
a **éclaboussé les mains**  
de l'opérateur qui portait  
**2 paires de gants**

2 paires de gants  
contaminées

dose aux mains :  
**850 mSv**

**3-4 semaines**  
après exposition  
**érythème et ampoule**  
sur la zone exposée

# Traces de $^{106}\text{Ru}$ mesurées en Europe

2 octobre

Plusieurs pays européens détectent des **traces de  $^{106}\text{Ru}$** , sans impuretés

13 octobre

**IRSN & BfS** suspectent la **Russie** sur la base de rétrocalculs

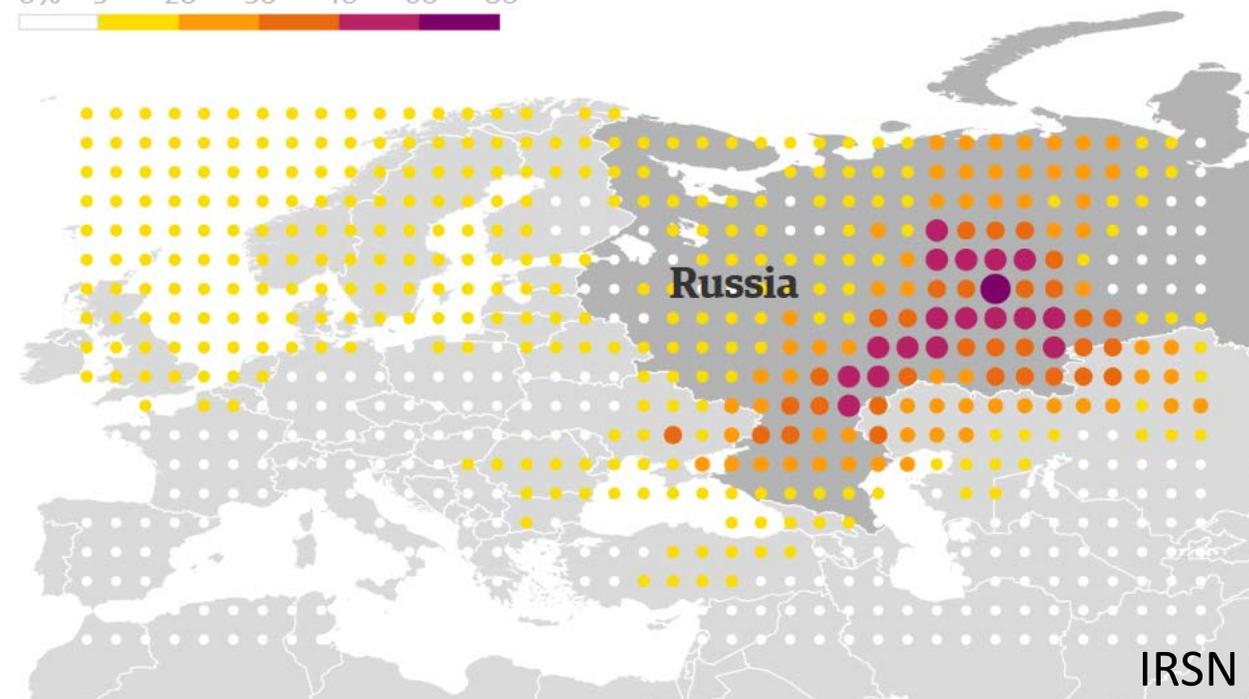
mi-octobre

Autorités **russes** affirment n'avoir **rien mesuré**

21 novembre

Services **météos russes** annoncent des niveau "**extrêmement élevés**" de  $^{106}\text{Ru}$  aux stations de Argayash et Novogorny entre le **25 septembre et le 9 octobre**

0% 5 20 30 40 60 80



**aucune confirmation** de l'origine de l'**incident**

A wooden podium with two microphones is positioned in the foreground. The background is a blurred audience of people seated in a large room, suggesting a conference or lecture hall. The lighting is soft and focused on the podium.

# Conférences de radioprotection

# Colloques annuels de la Commission fédérale de radioprotection



**7 avril 2017, Berne Liebefeld**

**Justification et éthique  
en radioprotection**

**14 avril 2018, Berne-Liebefeld OFSP**

**Les relations internationales de la  
Suisse en radioprotection**



**19 février 2018, 16h00**

**GT radiobiologie**

Effets

cardiovasculaires

**23 mars 2018, 13h00**

**Assemblée  
générale**



# Le(s) mot(s) de l'OFSP

Réunion annuelle d'information en radioprotection IRA 2017

Thérapie au  $^{177}\text{Lu}$ : aspects de radioprotection

Fabien Devynck

Détection de Ru-106 dans l'air en Suisse et en Europe

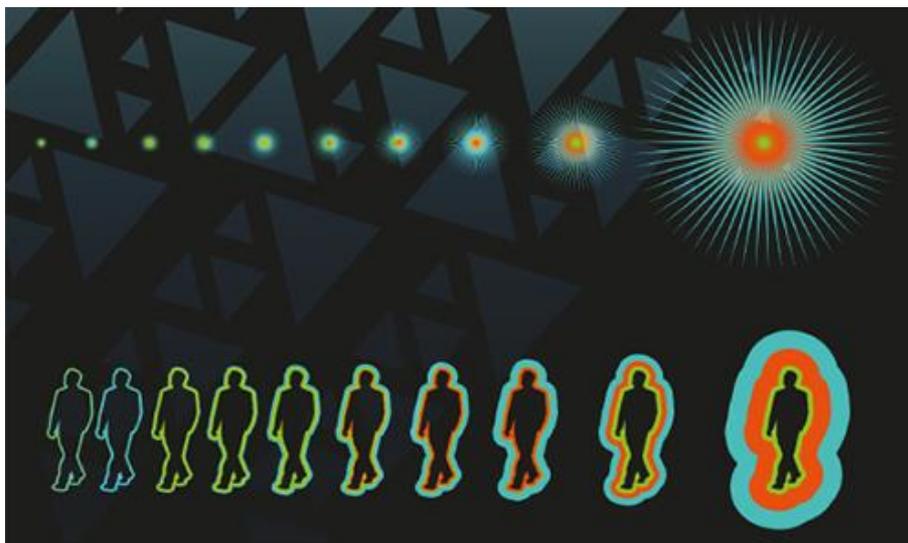
Philipp Steinmann

Etablissement de niveaux de référence diagnostique en

CBCT tête cou

Julien Ott

# Révision de la législation suisse en radioprotection



[www.strahlenschutzrecht.ch](http://www.strahlenschutzrecht.ch)  
[www.legislationradioprotection.ch](http://www.legislationradioprotection.ch)  
[www.dirittoradioprotezione.ch](http://www.dirittoradioprotezione.ch)

Approbation par le Conseil fédéral: 26 avril 2017  
Entrée en vigueur : 1<sup>er</sup> janvier 2018



# Thérapie au $^{177}\text{Lu}$ : aspects de radioprotection

Réunion annuelle d'information en radioprotection IRA 2017

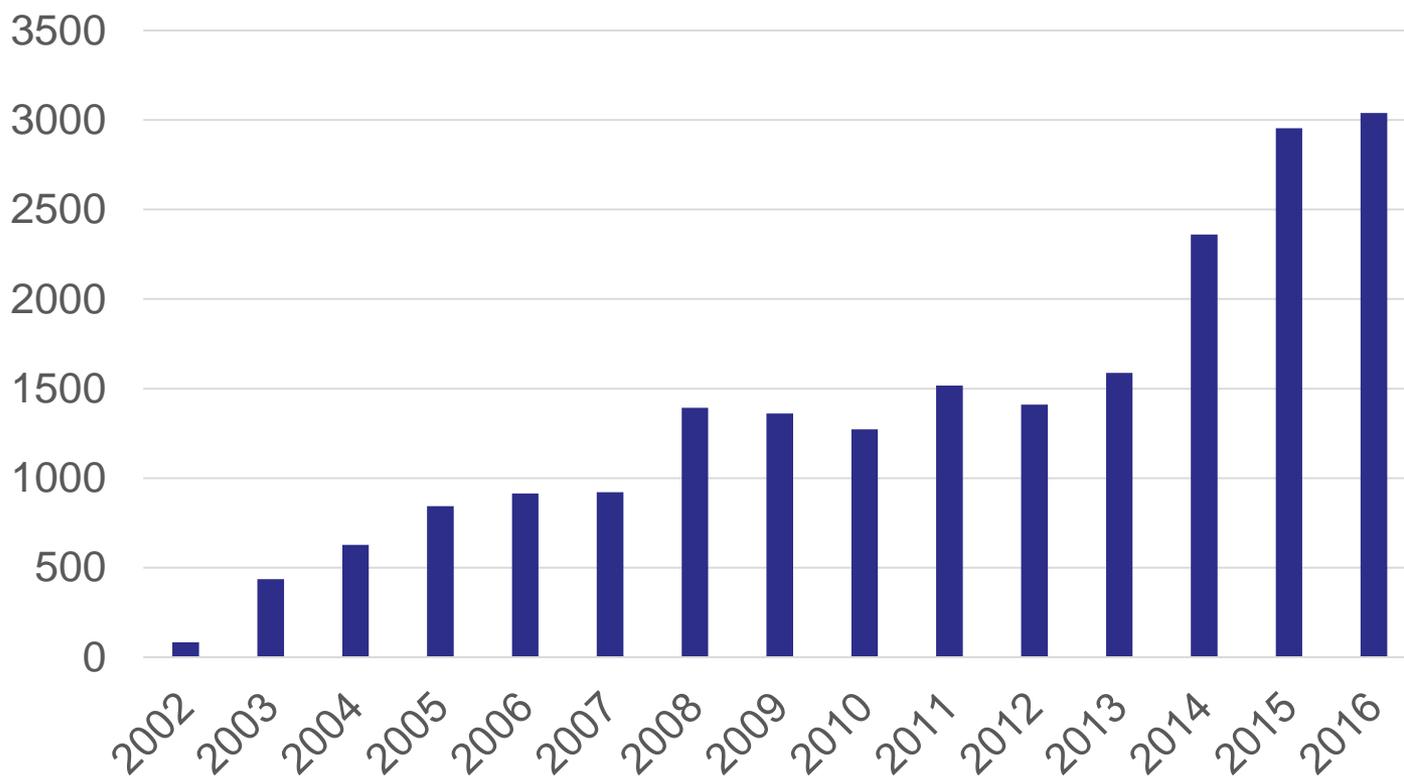


**Fabien Devynck**

**Division Radioprotection - Office Fédéral de la Santé Publique**

## Activité utilisée en Suisse par année

Utilisation annuelle de  $^{177}\text{Lu}$  en Suisse (GBq)

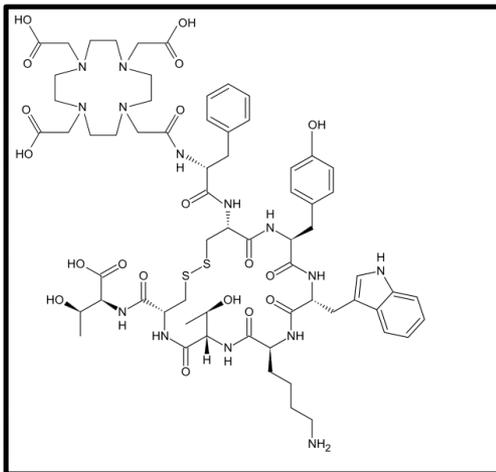




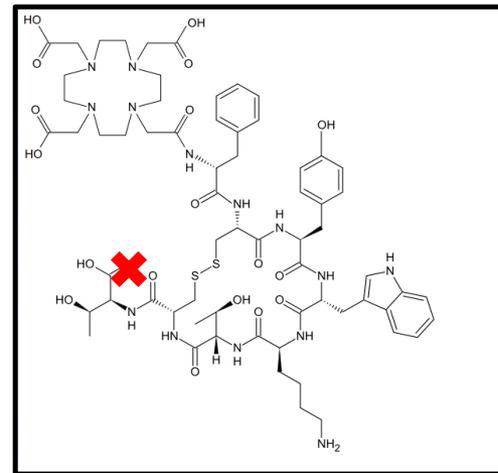
## Autorisations de distribution à durée limitée

- Trois autorisations établies par Swissmedic actuellement en vigueur pour deux radiopharmaceutiques utilisés en routine

$^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE:  
AAA



$^{177}\text{Lu}$ -DOTATOC:  
USB (Bâle), Uni Bern



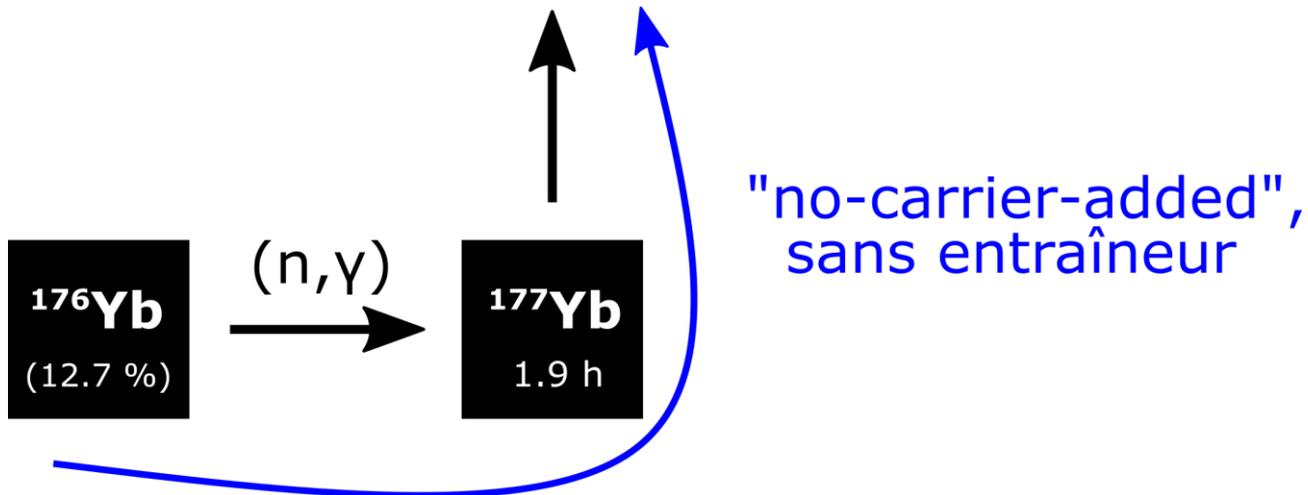
- Indication: tumeurs neuroendocrines
- 4-7 GBq par application, 3-4 applications par patient (8 semaines d'intervalle)

## Données de radioprotection $^{177}\text{Lu}$

- $h_{10}$  :  $6 \mu\text{Sv/h/GBq}$  @ 1 m (sans blindage, source ponctuelle)
- Atténuation par patient du DD à 1 m comparé à  $h_{10}$  : 50-70%
- Activité administrée: 4-7 GBq
- Débit de dose initial du patient @ 1 m: 12-17  $\mu\text{Sv/h}$
  
- Limite d'immission dans les eaux accessibles au public (ORaP 2018) : 308 Bq/L (concentration moyenne par semaine)
- Valeur 1 CS = 3 Bq/cm<sup>2</sup> ~ 90 cps net (Como 170)

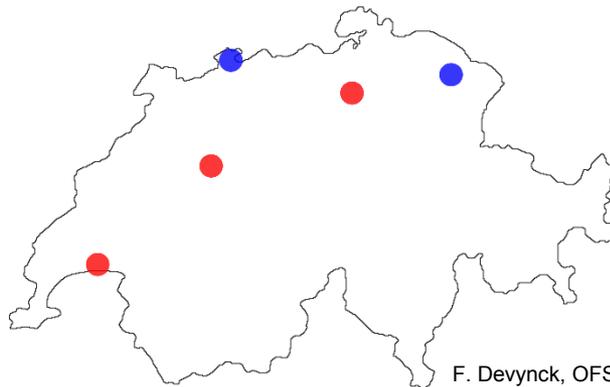
## Voies de production pour le $^{177}\text{Lu}$

"carrier-added",  
avec entraîneur



## Caractéristiques des voies de production

	Avec entraîneur	Sans entraîneur
Difficulté	Traitement de la cible et chimie « faciles »	Traitement de la cible et purification chimique « difficiles »
Activité spécifique maximale	925-1220 GBq/mg (3 atomes de Lu stable pour chaque $^{177}\text{Lu}$ )	4000 GBq/mg (quasiment chaque atome de Lu est du $^{177}\text{Lu}$ )
Impuretés	<b>~ 0.01 % de <math>^{177m}\text{Lu}</math></b> + $^{152}\text{Eu}$ (13.3 a), $^{154}\text{Eu}$ (8.8 a), $^{178}\text{Hf}$ (31 a), $^{46}\text{Sc}$ (84 j)	~ 0.00001 % de $^{177m}\text{Lu}$



## Quels critères de sortie ?

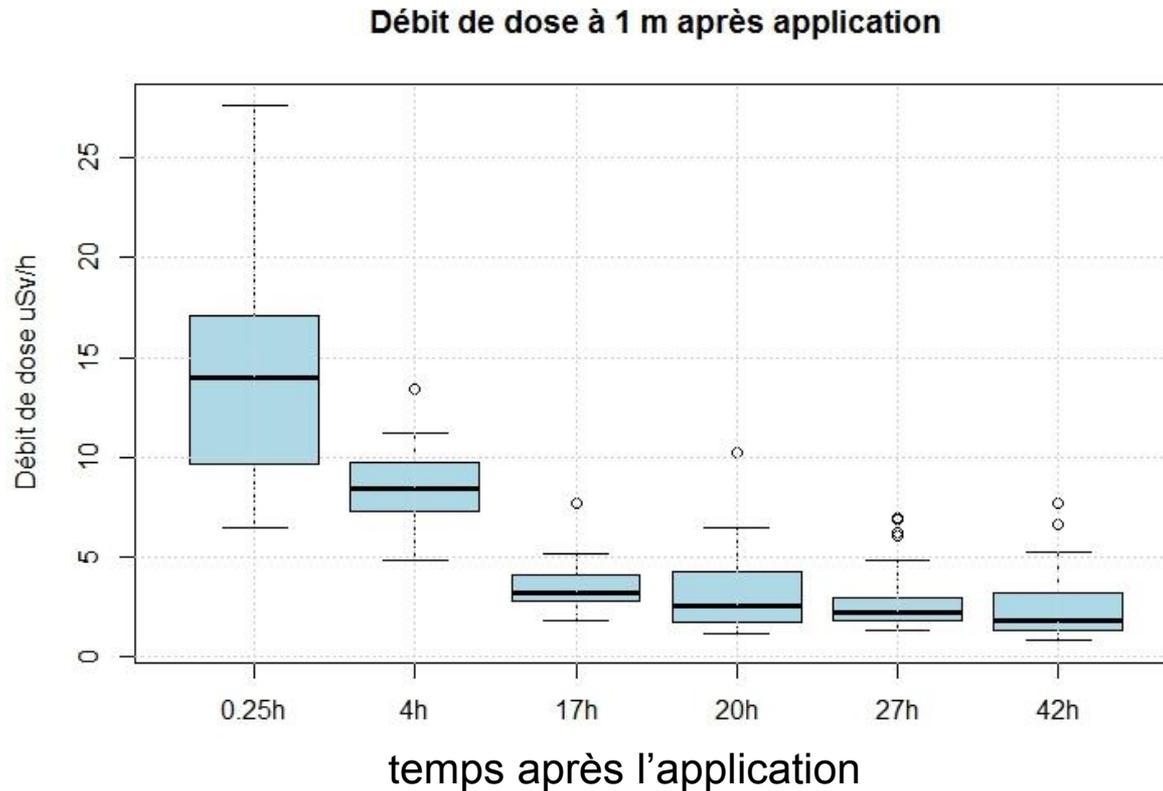
- Débit de dose à proximité du patient ?
- Contamination possible ?
- Limites d'immission du  $^{177}\text{Lu}$  et  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  ?

## Mesures réalisées à Bâle

- Enquête réalisée sur 24 patients en juin 2017
  - Administration de 4.1-7.1 GBq, médiane 6.8 GBq
1. **Mesures du débit de dose** à 50 cm et 100 cm 3 fois/jour
  2. **Mesures de contamination** après la sortie du patient
    - ✓ Literie, serviettes de bain, mobilier, WC
    - ✓ Porte, effets personnels, lavabo, couverts
  3. **Mesures du débit de dose avec sonde Mira** placée en dessus du lit des patients
    - ✓ 2 chambres avec un patient par chambre
    - ✓ 1 chambre double



# 1. Evolution du débit de dose



Après 24 h, le débit de dose à 1 m du patient est inférieur à 10  $\mu\text{Sv/h}$  ✓

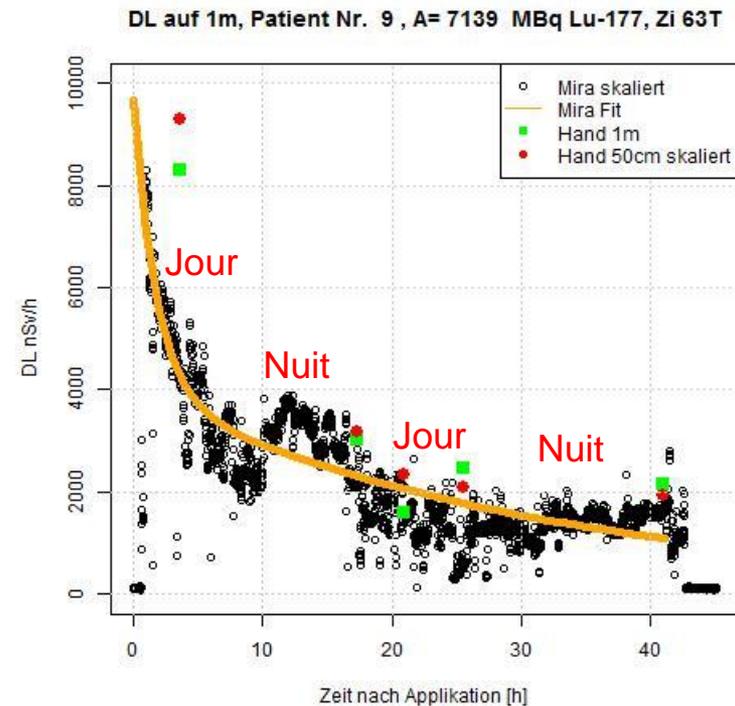
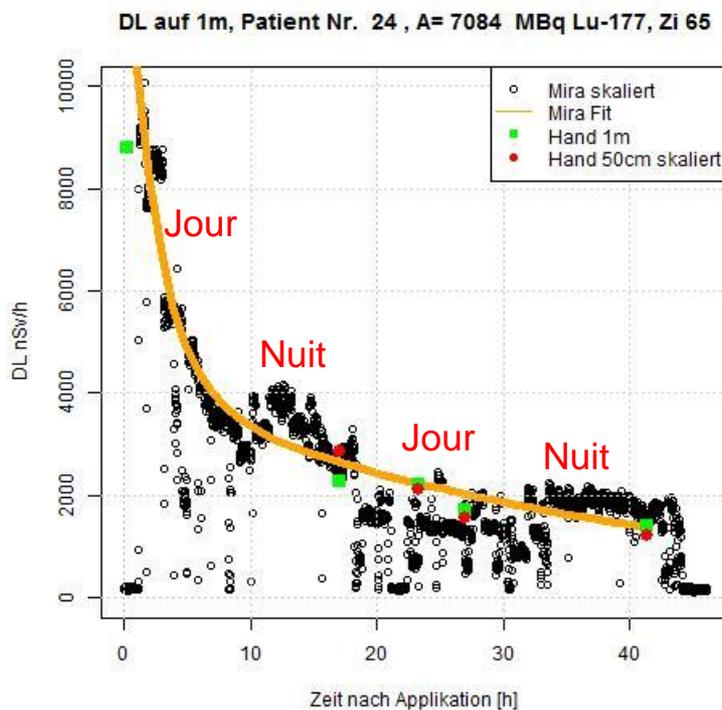
Mesures réalisées par le personnel avec un Automess 6150 AD6

## Evolution de l'élimination

Temps	Activité restante $A_0=6800$ MBq		Elimination en cette période de 8 heures		DD à 1 m $\mu\text{Sv/h}$
	%	MBq	MBq	% dû à $T_{1/2\text{phys}}$	
Après 8 h	38	2583	4217	5	5.7
Après 16 h	25	1671	911	9	3.8
Après 24 h	21	1405	266	23	3.2
Après 32 h	19	1271	134	34	2.9
Après 40 h	17	1169	102	40	2.6
Après 48 h	16	1078	90	40	2.4

Valeurs moyennes, variance des mesures ~ 30 %

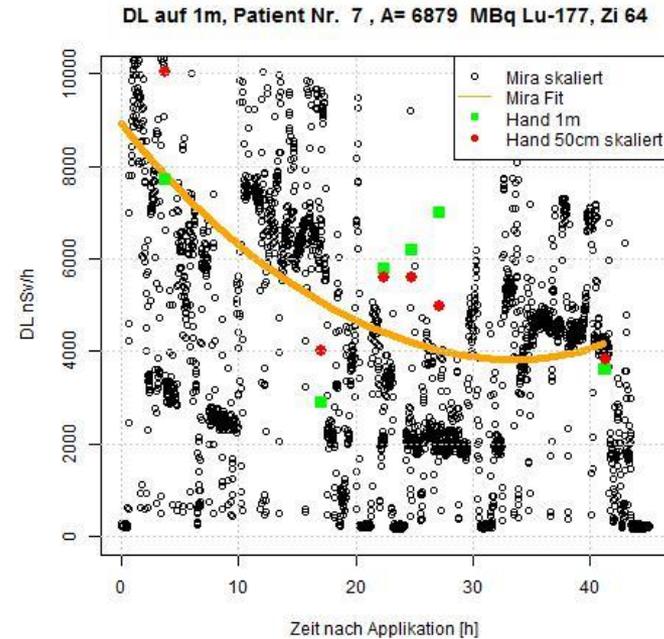
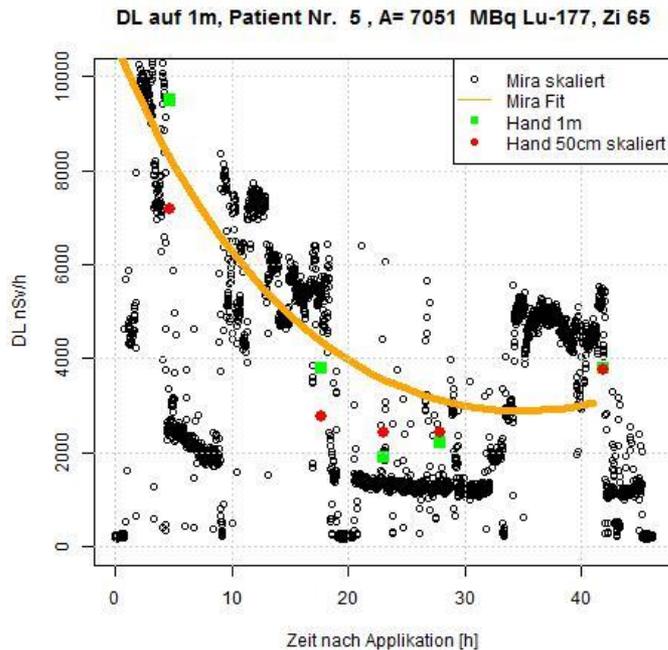
## 2. Mesures du débit de dose avec les sondes MIRA



Sondes placées en dessus du lit du patient



## 2. Mesures du débit de dose avec les sondes MIRA

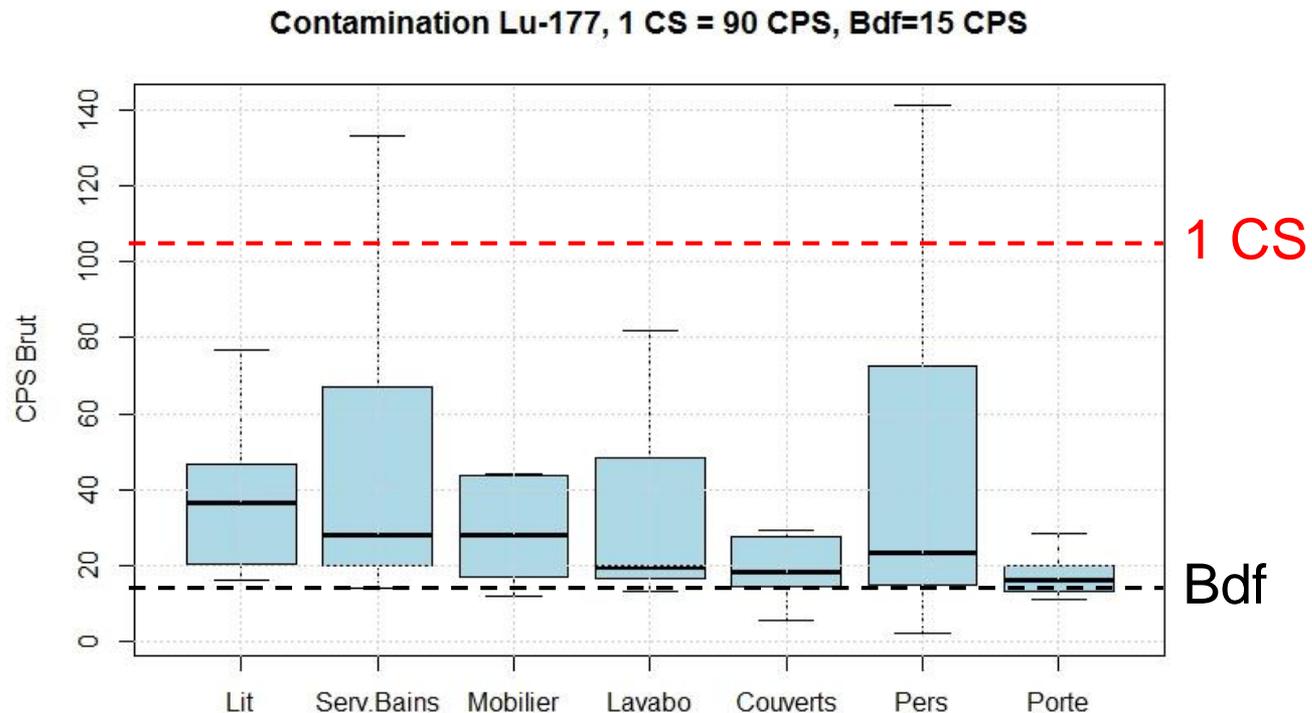


Problème: déplacement du patient. Analyses encore en cours.





### 3. Mesures de la contamination

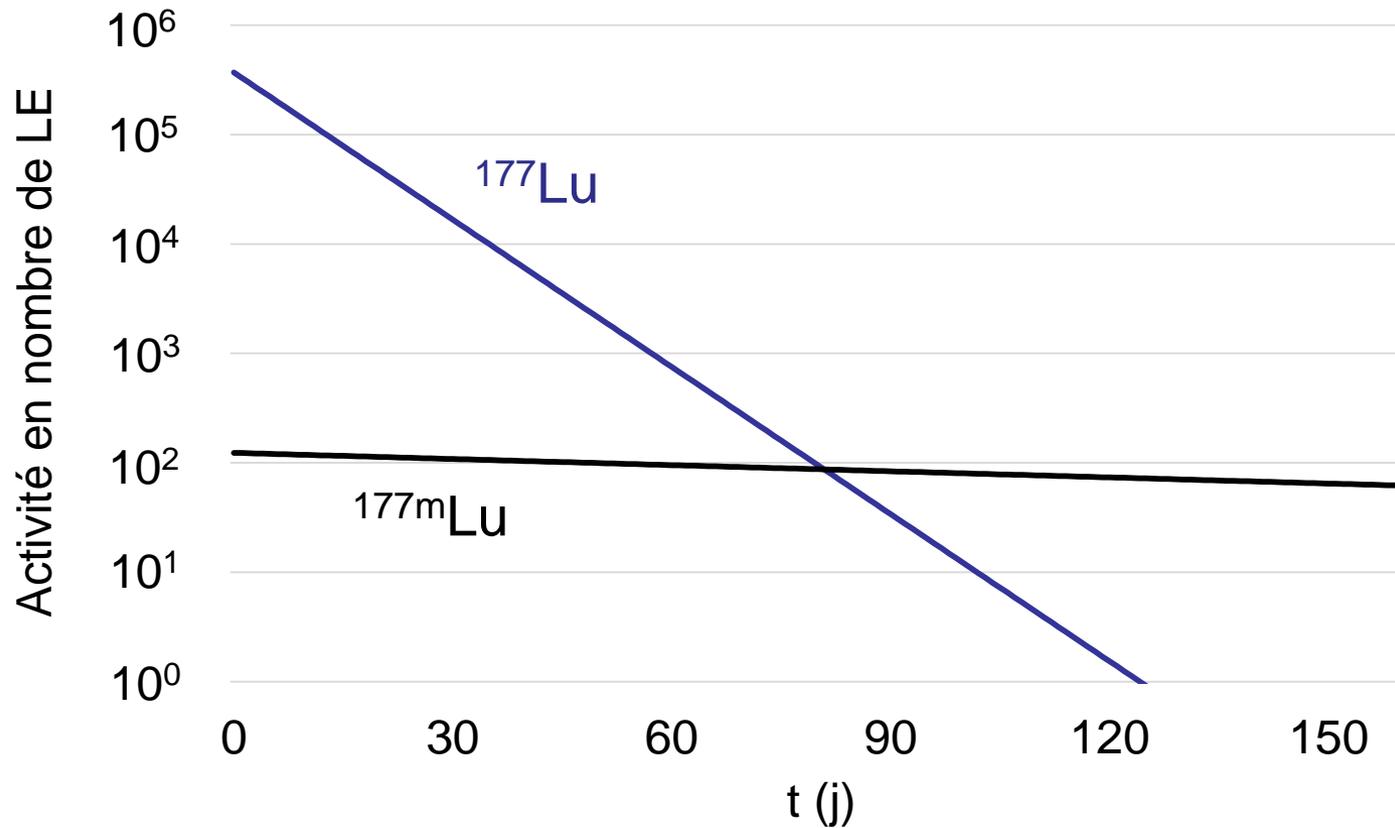


Peu de contaminations présentes sur le mobilier et objets personnels

~ 20 CS trouvées au WC : contamination ou mesure de l'eau contenant un reste d'activité? -> mesures complémentaires en cours



## Décroissance du $^{177}\text{Lu}$ vs $^{177\text{m}}\text{Lu}$



## Limite d'immission du $^{177}\text{Lu}$ et $^{177\text{m}}\text{Lu}$

- Hypothèses:
  - ✓ 2 patients le lundi, 2 patients le jeudi, application de 8 GBq de  $^{177}\text{Lu}$
  - ✓ L'impureté de  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  s'élève à 0.01% de l'activité du  $^{177}\text{Lu}$
  - ✓ 100 % de l'activité se retrouve dans les cuves de décroissance
  - ✓ Chaque patient utilise 150L/jour
  - ✓ L'hôpital dispose de 4 cuves de 12 m<sup>3</sup>, la première cuve est vidée lorsque les 4 sont pleines, soit **15 semaines après qu'elle soit pleine**
  - ✓ L'hôpital rejette 2'000 m<sup>3</sup> d'eaux usées par semaine
- Immissions:
  - ✓ 749 kBq de  $^{177}\text{Lu}$  (0.37 Bq/L), soit 0.12 % de la limite d'immission dans l'eau (308 Bq/L)
  - ✓ 9.41 MBq de  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  (4.7 Bq/L), soit **4.31 %** de la limite d'immission dans l'eau (109 Bq/L)



## Résumé

- La production de  $^{177}\text{Lu}$  par voie indirecte permet la réduction du taux de  $^{177\text{m}}\text{Lu}$
- Le débit de dose à 1 m du patient après 24 h est inférieur à  $10 \mu\text{Sv/h}$
- Peu de contamination sur le mobilier et les effets personnels, mesures complémentaires nécessaires concernant l'activité mesurée dans les WC
- Le  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  peut avoir une contribution importante aux limites d'immissions dans l'eau
  
- En tenant compte de la variabilité, le critère de sortie a été fixé à 48 h et  $5 \mu\text{Sv/h}$  pour le  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE et le  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATOC.
- Le patient sort avec une activité d'environ 1 GBq, ce qui permet d'assurer que les limites d'immission sont respectées.
  
- Une étude similaire devra être conduite pour le  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA si l'utilisation en routine devait se développer, la physiologie étant différente.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'intérieur DFI  
**Office Fédéral de la Santé Publique OFSP**  
Division Radioprotection

## Merci pour votre attention Questions





# Détection de Ru-106 dans l'air en Suisse et en Europe

P. Steinmann, S. Estier OFSP

Réunion annuelle d'information en radioprotection 06.12.2017



# Le Ruthénium-106

- Le Ru-106 est un produit de fission d'une demi-vie de 371.5 jours.
- Le Ru-106 est un émetteur  $\beta^-$  (100%)  $\rightarrow$  Rh-106 ( $T_{1/2} = 30\text{s}$ )
- Il se mesure via les émissions  $\gamma$  (511.85, 621.9 keV) du Rh-106
- Il est utilisé en médecine pour le traitement par irradiation des tumeurs de l'œil
- Une autre application, plus rare, du Ruthénium-106 est son utilisation dans des générateurs thermoélectriques à radioisotope qui servent par exemple à l'alimentation en électricité des satellites
- Valeur limite d'immission Ru-106 /Rh-106  $L_{\text{air}} = 0.66 \text{ Bq/m}^3$   
(5x moins élevée que pour le Cs-137)



# Exercise 😊

- Quelle est la valeur limite d'immission Ru-106 /Rh-106 selon la nouvelle ORaP?

*Annexe 7*  
(art. 24, al. 1 et 2)

## 1 Limites d'immission dans l'air ( $LI_{\text{air}}$ ):

- 1.1 Les limites d'immission dans l'air sont déterminées de sorte que le séjour en continu (8766 heures par an =  $NH$ ) à un endroit où la concentration radioactive de l'air correspond à la limite d'immission du nucléide en question conduirait, par inhalation et immersion, à une dose annuelle de 0,3 mSv pour la personne critique (enfant en bas âge, enfant de 10 ans ou adulte).

$$LI_{\text{air}}[\text{Bq/m}^3] = \min\left(\frac{0.3 \text{ mSv/a}}{DR_{\text{eb}} \cdot e_{\text{inh,eb}} + F_{\text{abs}} \cdot e_{\text{imm}} \cdot NH}; \frac{0.3 \text{ mSv/a}}{DR_{\text{e10}} \cdot e_{\text{inh,e10}} + F_{\text{abs}} \cdot e_{\text{imm}} \cdot NH}; \frac{0.3 \text{ mSv/a}}{DR_{\text{ad}} \cdot e_{\text{inh,ad}} + F_{\text{abs}} \cdot e_{\text{imm}} \cdot NH}\right)$$



# Ru-106 phase I: « détection et mesures » (02-08.10.2017)

02.10.2017 :

- Détection de Ru-106 ( $3 \text{ mBq/m}^3$ ) dans l'air (HVS) à Milan entre le 29.09 et le 02.10.17 annoncée aux membres du Ring of Five (Ro5)
- Laboratoires tchèques et autrichiens confirment ( $12$  à  $15 \text{ mBq/m}^3$  à Vienne et Prague)
- **En CH** : Changement du filtre HVS de Liebefeld et mesure immédiate – pas de trace de Ru-106, contact avec Cadenazzo/TI pour envoi du filtre





# Ring of Five

- 110 collecteurs d'aérosols en Europe
- 90 experts





# Phase I « détection et mesures » (02-08.10.2017)

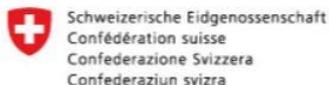
## 03.10.2017 en CH

- Détection de Ru-106 dans les filtres HVS de Cadenazzo/TI exposés du 25.09 au 02.10.17 : Activité : 50 micro-Bq/m<sup>3</sup>
- Chimiste cantonal du Tessin averti
- Premières informations publiées sous [www.radenviro.ch](http://www.radenviro.ch)





# Phase I « détection et mesures » (02-08.10.2017) [www.radenviro.ch](http://www.radenviro.ch)



Administration fédérale Département fédéral de l'intérieur DFI

Office fédéral de la santé publique OFSP

Division Radioprotection



Radioactivité de l'environnement  
[www.radenviro.ch](http://www.radenviro.ch)

Actualités

Accès aux données

Réseaux automatiques

Informations

Deutsch | Français | Italiano | English

> News

Archive

Denrées alimentaires

Echantillons spéciaux

Informations & utilisation

Milieu terrestre

Milieux aquatiques

News

Radioactivité de l'air

Rejets de radioactivité

Réseaux automatiques

search by keyword



## Détection de Ruthénium-106 dans l'air en Suisse et dans plusieurs pays européens : Etat de la situation au 22.11.2017



Du ruthénium-106 a été détecté dès fin septembre 2017 par plusieurs laboratoires européens de mesure de la radioactivité dans l'atmosphère, dont l'OFSP. Le ruthénium 106 n'étant pas détecté dans l'air en temps normal, sa présence ne peut être liée qu'à...

[Read more >](#)

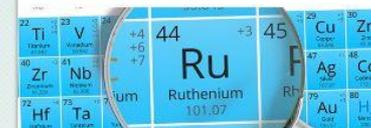
## Traces de Ruthénium-106 dans l'air au Tessin et en Europe (mise à jour du 9.10.17)



La surveillance de la radioactivité dans l'air effectuée par l'OFSP a révélé la présence de traces de Ruthénium-106 à Cadenazzo, au Tessin. Dans les filtres aérosols exposés entre le 25.09 et 02.10.2017 la concentration de Ruthénium-106 s'élevait à 50 micro-Bq/m3...

[Read more >](#)

## 4.10.17 – Traces de Ruthénium-106 mesurées dans l'air au Tessin



Les résultats des mesures de bas niveau de la radioactivité dans l'air effectuées par l'OFSP ont révélé la présence de traces de Ruthénium-106 dans les aérosols prélevés à Cadenazzo, au Tessin, entre le 25.09 et 02.10.2017. La concentration de Ruthénium-106,...

[Read more >](#)



# Phase I « détection et mesures » (02-08.10.2017) [www.radenviro.ch](http://www.radenviro.ch)

Résultat de votre recherche

Milieux analysés: Air (filtres aérosols à haut débit)

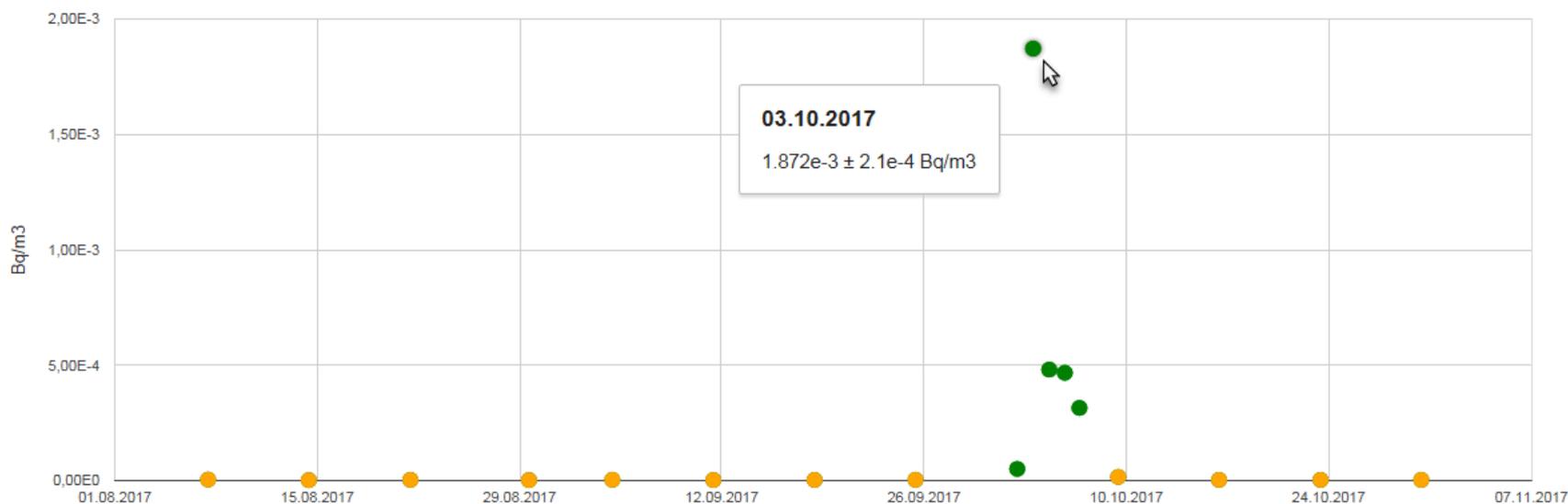
Station: Cadenazzo - Air (filtres aérosols à haut débit) (HV-CAD) ▼

Isotope: Ruthénium 106 ▼

Zooms: 1m 1a 5a 10a

● Valeurs mesurées  
● Limite de détection

De: 01.08.2017 à: 30.10.2017



01.2012

01.2013

01.2014

01.2015

01.2016

01.2017



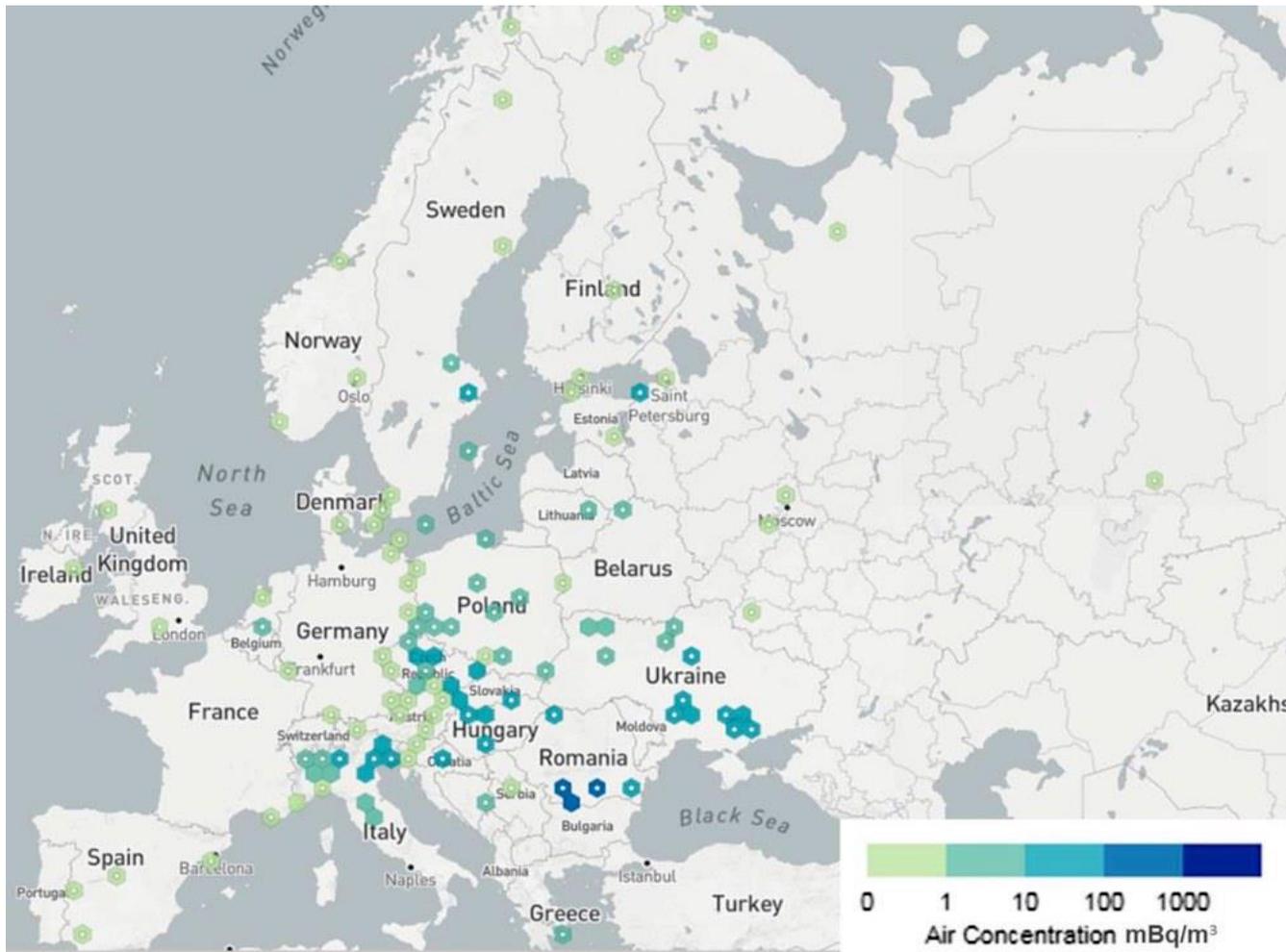


# Phase II « résultats officiels et communication » (dès le 7/8.10.2017)

- 13.10: l'IAEA publie son 1er rapport sur la situation concernant le Ru-106 dans l'air en Europe à l'intention des autorités.
- La valeur la plus élevée rapportée par l'AIEA, parmi environ 400 résultats collectés, s'élève à 0.15 Bq/m<sup>3</sup> et a été mesurée en Roumanie le 30 septembre 2017.
- Les résultats fournis par la Russie (10.10.17) sont lacunaires



# Phase II « résultats officiels et communication »



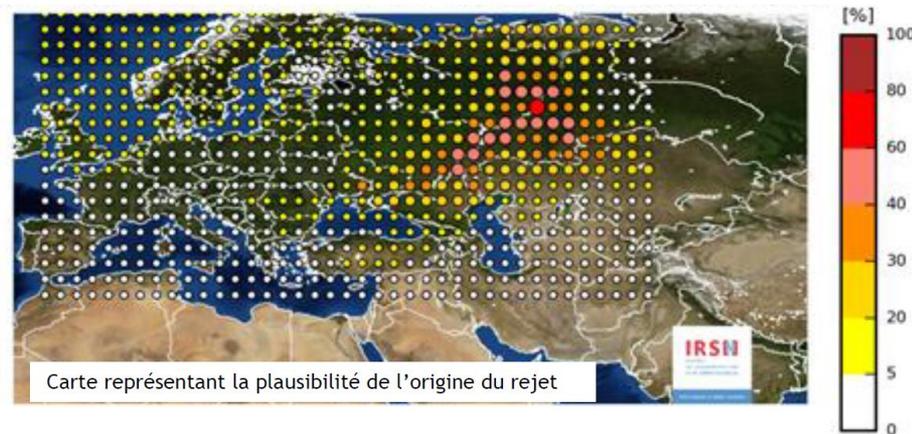
Réunion annu  
Philipp Steinr

**Figure 1 - Locations where concentrations of Ru-106 in the air have been reported to the IAEA<sup>2</sup>**



# Phase II « résultats officiels et communication » (dès le 7/8.10.2017)

- Les calculs effectués indépendamment par l'IRSN et le BfS allemand arrivent aux mêmes conclusions quant à l'origine la plus probable du rejet.



Carte identifiant, sur la base de la comparaison modèle-mesures, la zone de rejet la plus plausible. Pour un rejet simulé en chaque point du maillage, la comparaison consiste à estimer le pourcentage de données modélisées qui sont dans un facteur 2 par rapport aux mesures réelles. La zone avec le pourcentage le plus élevé est identifiée comme la zone de rejet la plus plausible.

IRSN, 9.11.2017: terme source 100 – 300 TBq



## Radioactive releases compared (TBq)

Material	Half life	Windscale 1957	Chernobyl	Fukushima Daiichi (atmospheric)
Iodine-131	8.0197 days	740	1,760,000	130,000
Caesium-137	30.17 years	22	79,500	35,000
Xenon-133	5.243 days	12,000	6,500,000	17,000,000
Xenon-135	9.2 hours			
Strontium-90	28.79 years		80,000	
Plutonium			6,100	
Ruthenium-106	371 days			
Zirconium-95	64 days			
Niobium-95	35 days			



Tomsk-7 1993	? 2017
11.1	100-300
7.8	
17.4	

↑  
IAEA

↑  
IRSN

[https://en.wikipedia.org/wiki/Windscale\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Windscale_fire)



# Bilan pour la Suisse (1)

- Concentration maximale de Ru-106 dans l'air au Tessin de **1'900  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$**  (02.10 au 03.10.17) → 350 fois < limite d'immissions dans l'air selon ORaP
- Concentrations de Ru-106 dans les échantillons d'herbe prélevés en différents endroits au Tessin par le KL-TI < à la limite de détection : il n'y a donc pas eu de contamination des denrées alimentaires.
- Pas de risque pour la santé de la population suisse
- La surveillance de la radioactivité dans l'air mise en place par l'OFSP est efficace et les outils pour informer la population sont en place



## Bilan pour la Suisse (2)

- Exercice a démontré la faisabilité de mettre en place rapidement des contrôles des camions aux frontières
- La collaboration entre les différentes institutions cantonales et fédérales (BABS, OSAV, douanes, EDA, etc) a bien fonctionné
- Importance des réseaux de contacts informels entre experts/spécialistes; aucune information n'ayant circulée par les canaux officiels au cours de la première semaine (phase I)
- CH-statement lors du dernier «IAEA Board of Governors»



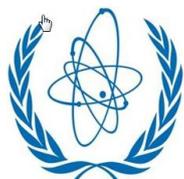
# Origine ?

- Le Ru-106 n'est pas détecté dans l'air en temps normal : sa présence ne peut être liée qu'à un rejet non maîtrisé.
- L'absence de tout autre radionucléide artificiel conduit à écarter l'hypothèse d'un rejet issu d'un réacteur nucléaire.
- L'hypothèse de la chute d'un satellite a été écartée; par ailleurs l'AIEA reconnaît que l'incinération accidentelle d'une source médicale ne peut en aucun cas conduire aux contaminations observées.
- Un tel rejet pourrait résulter d'une activité de retraitement de combustibles nucléaires usés (autres exemples par le passé) ou d'une activité de production de sources radioactives.
- De telles installations ne sont pas très nombreuses....
- Cependant, aucun pays n'a, à l'heure actuelle, déclaré à l'AIEA être à l'origine de ce rejet et celle-ci reste toujours inconnue.
- Applications médicale: la production annuel du Ru-106 en Russie est 3.7 GBq (Rosatom)



# Origine ?

5.12.2017



**IAEA**

International Atomic Energy Agency

[Press Centre](#) [Employment](#) [Contact](#)

## News

Year

Type

Topics

Search

Search

Sorry, no matching results found.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
**Bundesamt für Gesundheit BAG**  
Direktionsbereich Verbraucherschutz

# Origine ?

24.11.2017



**POCATOM**

[FOR JOURNALISTS](#) [FOR SUPPLIERS](#) [FOR INVESTORS](#)

EN



[MAIN](#) > [PRESS CENTRE](#) > [NEWS](#) >

## Nuclear scientists are setting up a commission to find out ruthenium-106 source of origin

To remind, at first, the European environmental monitoring serviced detected traces of radioactive ruthenium-106 in the air. Then, similar results were obtained in the territory of Russia.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
**Bundesamt für Gesundheit BAG**  
Direktionsbereich Verbraucherschutz

# Merci pour votre attention

[Sybille.estier@bag.admin.ch](mailto:Sybille.estier@bag.admin.ch)



Réunion d'information en radioprotection  
2017

# Méthodes de calculs de blindage

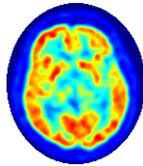
N. Cherbuin / L. Desorgher - IRA



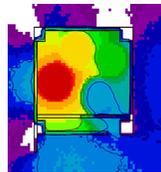
# Plan de la présentation



- Ecrans et blindages



- Application pratique



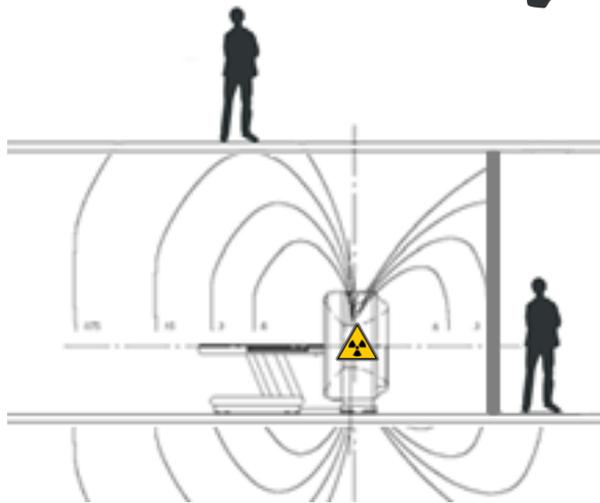
- Simulations numériques

# Les écrans



Radioprotection liée à la  
source

Contrainte de dose



Principe de base de la  
radioprotection  
opérationnelle

Temps – Distance - **Ecrans**

# Législation suisse

## Bases légales pour la radioprotection architecturale

Ordonnance sur les rayons X

Ordonnance sur les accélérateurs

Ordonnance sur l'utilisation des matières radioactives

### Directives dans le domaine des rayons X

R-03-04 Taches et devoirs de l'expert en matière d'utilisation des rayonnements ionisants

R-04-07 Calcul de l'épaisseur de blindage nécessaire pour les locaux avec un tomодensitomètre multi-barettes (MDCT)

### Directives dans le domaine des substances radioactives

L-07-01 Calcul de l'épaisseur du blindage pour les locaux avec TEП

L-07-03 Blindage des chambres de patient en thérapie I-131

L-07-04 Valeurs directrices pour les débits de dose ambiante



Blindages : pose de revêtement de sol en plomb dans une chambre de radiothérapie métabolique

 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

RO 2017  
www.droch.ch/ro1.admin.ch  
La version électronique  
signifie 100 %



**Ordonnance du DFI  
sur l'utilisation des matières radioactives  
(OUMR)**

du 26 avril 2017

Le Département fédéral de l'intérieur (DFI), en accord avec l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN),  
vu les art. 79, al. 5, 81, al. 7, 88, 91 et 99, al. 2, de l'ordonnance du 26 avril 2017 sur la radioprotection (ORaP)<sup>1</sup>  
arrête:

**Chapitre 1 Dispositions générales**

**Art. 1** Objet et champ d'application

<sup>1</sup> La présente ordonnance régle la manipulation, soumise à autorisation, des matières radioactives.

<sup>2</sup> Elle ne s'applique pas à la manipulation de sources radioactives scellées à des fins diagnostiques et thérapeutiques en médecine humaine et vétérinaire.

**Art. 2** Définitions

Les définitions figurant à l'art. 2, aux annexes 1 et 4 ORaP et à l'annexe 1 de la présente ordonnance s'appliquent.

**Art. 3** Sécurité des matières radioactives

<sup>1</sup> Les sources radioactives scellées de haute activité visées à l'art. 96 ORaP doivent être protégées contre le vol et les actes non autorisés par des mesures architecturales et opérationnelles adéquates.

<sup>2</sup> Les informations sensibles concernant la sécurité des sources radioactives scellées de haute activité doivent être protégées contre l'accès non autorisé à l'aide de moyens administratifs et techniques.

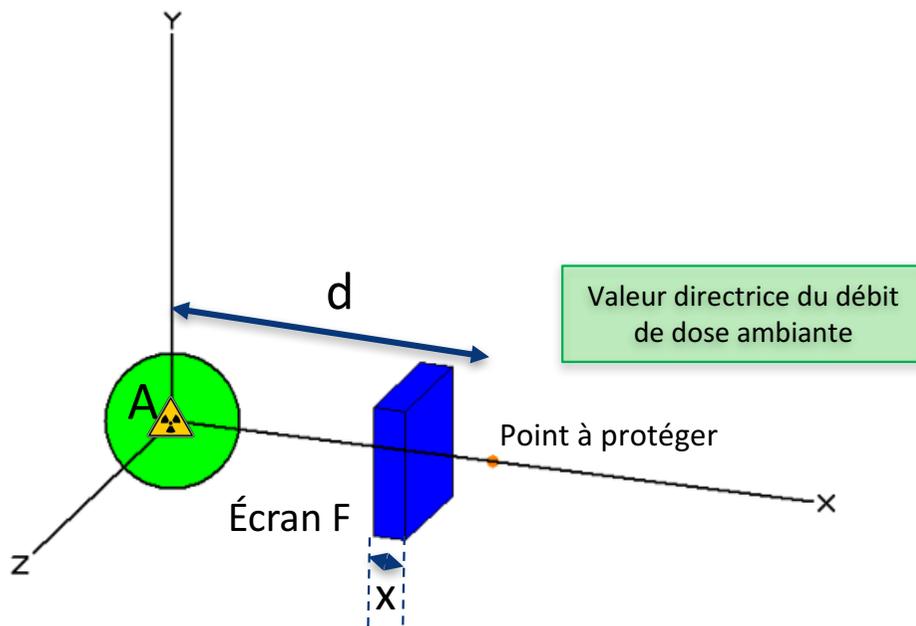
<sup>3</sup> Les mesures de sécurité ont notamment pour but d'empêcher, de repérer ou de retarder le vol ou les actes non autorisés afin de rendre possible une intervention.

RS 814.554  
1 RS 814.501

2016-3024 4753

# Principe

$$I_{VD} = I_d * F$$



$I_{VD}$ : Intensité maximum admise du rayonnement au point à protéger (Valeur directrice du débit de dose ambiante)

$I_d$ : Intensité du rayonnement à au point à protéger situé à une distance  $d$  d'une source  $A$

$F$ : Facteur d'atténuation nécessaire obtenu par l'écran

Source Microshield v9

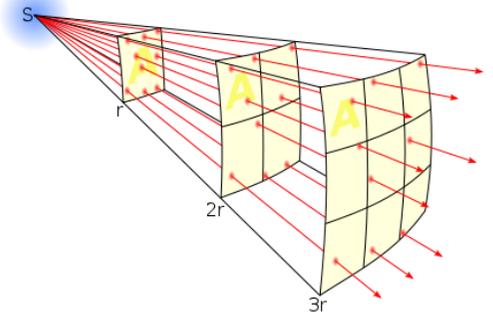
# Intensité de la source $I_d$



**Source radioactive**  
Activité de la source  
/ type d'émission

- Grandeurs d'appréciation

**Distance  $d$  entre la source et le point à protéger**



Source [www3.gehealthcare.fr](http://www3.gehealthcare.fr)



Source [www accuray.com](http://www accuray.com)

**Scanner / Installation RX / LINAC...**  
Nombre de patient ou fractions, indicateur dosimétrique (mA\*min/semaine, Gy\*fraction/semaine)

- Fréquence d'exploitation

Source [fr.wikipedia.org/wiki/loi\\_en\\_carré\\_inverse#](http://fr.wikipedia.org/wiki/loi_en_carré_inverse#)

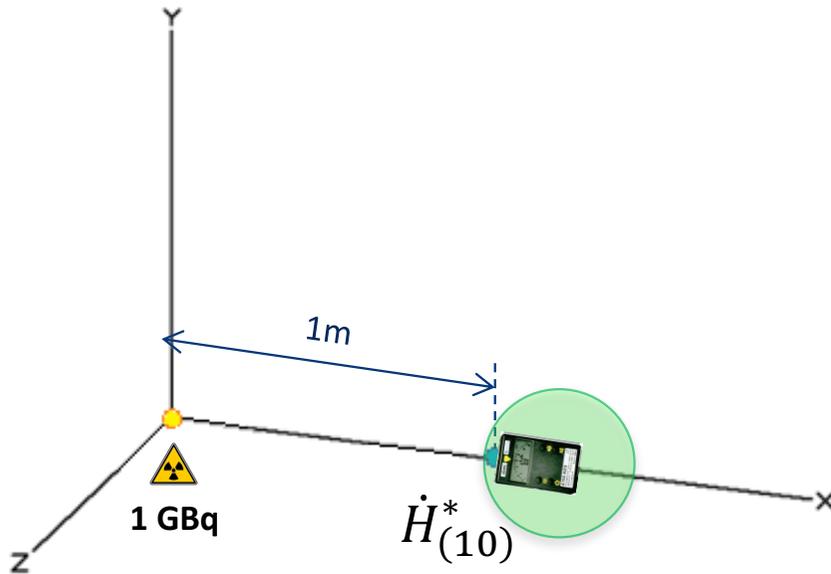
# Grandeur d'appréciation $h_{10}$

Les grandeurs d'appréciation  $h_{10}$  sont obtenues pour chaque isotope par simulation Monte-Carlo et publiées dans l'annexe 3 de l'ORaP.

Elles représentent le débit de dose à une profondeur de 10mm de tissu dans la sphère ICRU ( $\dot{H}_{(10)}^*$ ) dont la surface se trouve à 1m d'une source de 1 GBq.

Elles permettent d'estimer le débit d'équivalent de dose ambiante  $\dot{H}_{(10)}^*$  à une distance  $d$  connue d'une source ponctuelle d'activité  $A$  connue:

$$\dot{H}_{(10)}^* = h_{10} \left( \frac{A}{d^2} \right)$$



Grandeurs d'appréciation

Nucléide	Période	Mode de désintégration / rayonnement	$e_{inh}$ Sv/Bq	$e_{ing}$ Sv/Bq	$h_{10}$ (mSv/h)/GBq à 1 m de distance	$h_{0,07}$ (mSv/h)/GBq à 10 cm de distance	$h_{c,0,07}$ (mSv/h)/(kBq/cm <sup>2</sup> )
1	2	3	4	5	6	7	8
Co-60	5.2713 a	$\beta^- / \gamma$	1.70E-08	3.40E-09	0.366	1000	1.1

Source ORaP, annexe 3

# Valeur directrice $I_{VD}$

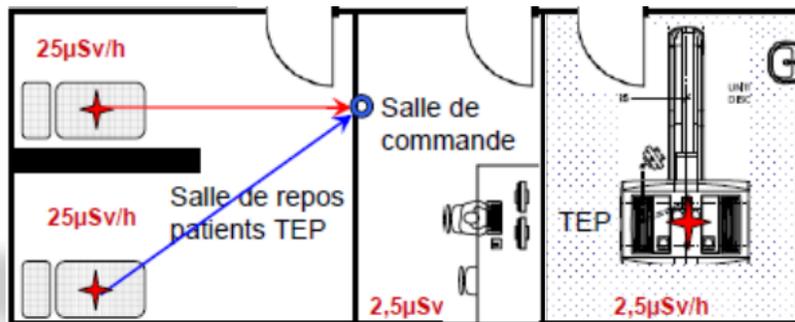
## Valeurs directrices du débit de dose ambiante

Zone à protéger des rayonnements ionisants	Débit de dose ambiante maximal [microSv/h]
<b>à l'intérieur de la zone contrôlée</b>	
<b>Secteur de travail</b> (local de scanner, salle d'application, laboratoire B/C)	2,5
<b>Local de séjour</b> (bureau, salle de repos, salle de contrôle, local d'examen)	2,5
<b>Locaux pour séjours brefs</b> (couloir, WC, local de stockage, salle de repos pour les patients, vestiaire pour les patients)	25
<b>à l'extérieur de la zone contrôlée</b>	
<b>Locaux pour séjours prolongés</b> (chambres de patients, salles d'examen, bureau)	0,5
<b>Locaux pour séjours brefs</b> (couloir, WC, zone d'attente pour les patients, salle d'archivage et local de stockage) zones extérieures, espaces verts et zones de passage	2,5

~ limites de dose individuelle (public ou professionnels)

~ durée de séjour au point à protéger

~ contrainte de dose



Source Directive OFSP L-07-01

Exprimées en doses hebdomadaires (0.1 ou 0.02 mSv/semaine) ou, dans le cas de la médecine nucléaire, horaires (entre 0.1 et 25  $\mu$ Sv/h)

# Facteur d'atténuation F

Intensité de la source au point à protéger

$$F = \frac{I_d}{I_{VD}}$$

Valeur directrice

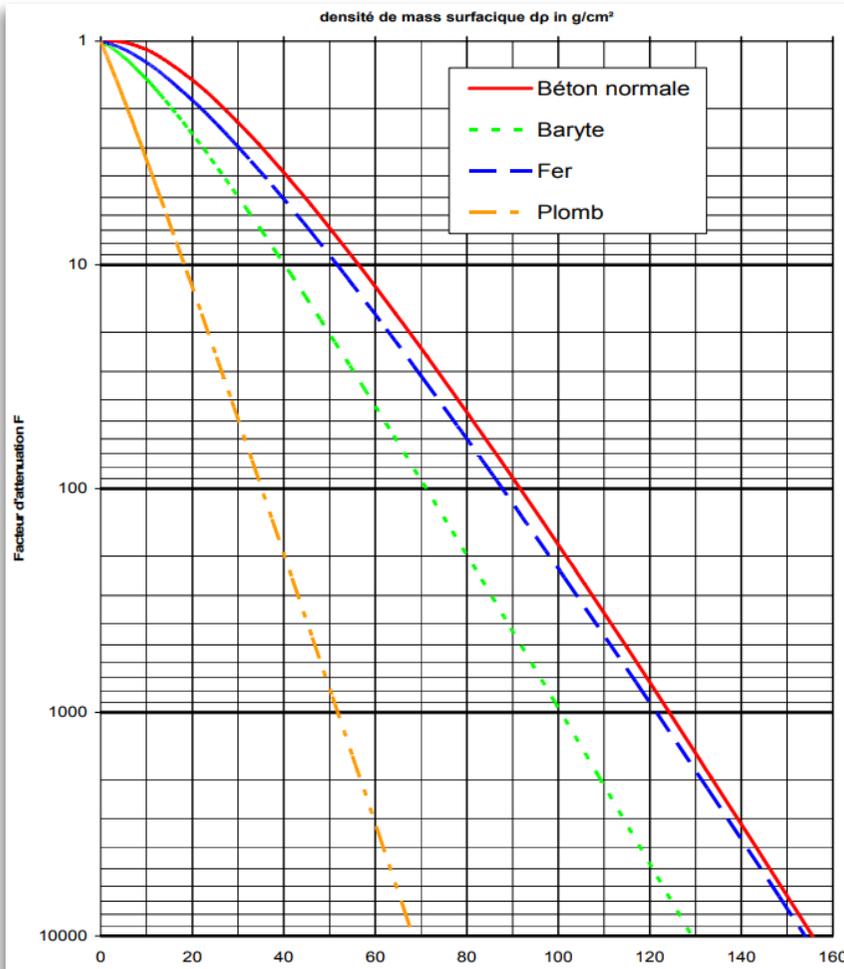
Le facteur d'atténuation F d'un écran est le rapport entre le débit de dose en un point sans écran et le débit de dose au même point avec écran.

Dans le cas d'un calcul de blindage, F est donc le rapport entre le débit de dose au point à protéger et la valeur directrice du débit de dose qui s'applique en ce même point.

# Epaisseur du matériau de blindage

OFSP, directive L-07-01

Courbes d'atténuation dans différents matériaux pour le fluor-18, tirées de la norme DIN-6844-3:2006-12 «Nuclear medicine departement – Part 3: Radiation protection calculations»



Matériau de construction	Densité [ $g/cm^3$ ]
Plomb	11,3
Fer	7,8
Béton baryté	3,2
Béton	2,3

$$x = \frac{d\rho}{\rho}$$

— Densité de masse surfacique correspondant à F pour le matériau choisi  
— Densité du matériau choisi

# Epaisseur du matériau de blindage

Utilisation de l'épaisseur d'atténuation au dixième (EAD) pour déterminer x

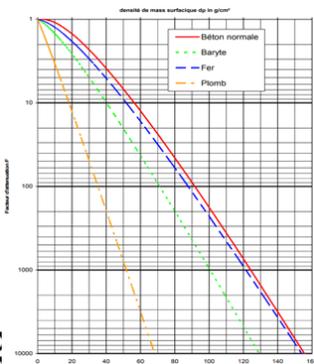
$$x = \text{Log}(F) * EAD$$

Pour F=10 sur le tableau précédent, on a densité de masse surfacique = 18 g/cm<sup>2</sup>

Densité du plomb :  $\rho = 11.3 \text{ g/cm}^3$   
 $18/11.3 = 1.59 \text{ cm} = EAD$

L'écran lui-même est source de rayonnements secondaires. Cela contribue à augmenter le débit de dose.

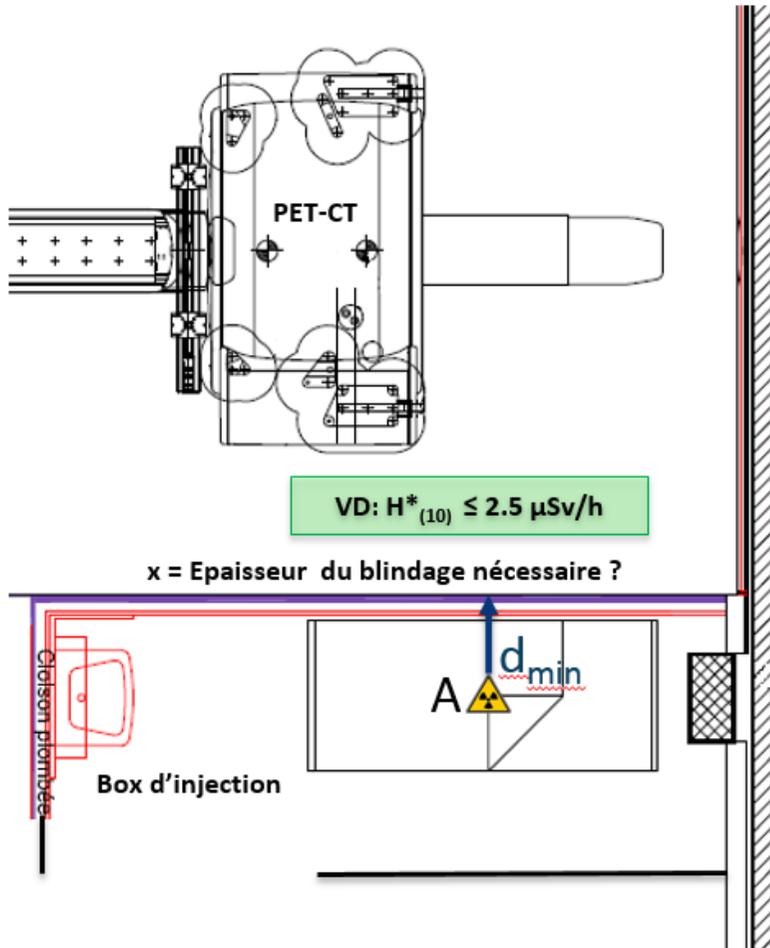
La formule de l'atténuation devrait donc être corrigée par un facteur appelé facteur d'accumulation en dose (*f<sub>build-up</sub>*), dépendant de l'énergie des photons, du matériau et de son épaisseur.



$$\triangle! F = e^{-\mu x} * f_{\text{build-up}}$$

fluor-18	Béton ( $\rho=2.3 \text{ g/cm}^3$ )	
F	L-07-01	EAD
10	24.3 cm	
100	40 cm	48.3 cm
1000	54 cm	72.9 cm

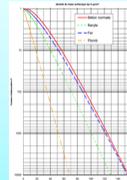
# Exemple pratique – PET-CT



## Détermination du blindage

Source A = 350 MBq de F-18 @  $d_{\min} = 50$  cm  
 $h_{10}$  (F-18) = 160  $\mu\text{Sv/h}$  / GBq @ 1m

$$\left. \begin{array}{l} H^*(10) = 224 \mu\text{Sv/h} \\ \text{VD} = 2.5 \mu\text{Sv/h} \end{array} \right\} F = 90$$



Densité de masse surfacique = 34  $\text{g/cm}^2$   
 Densité du plomb = 11.3  $\text{g/cm}^3$   
 $34/11.3 = 3.01$  cm de plomb

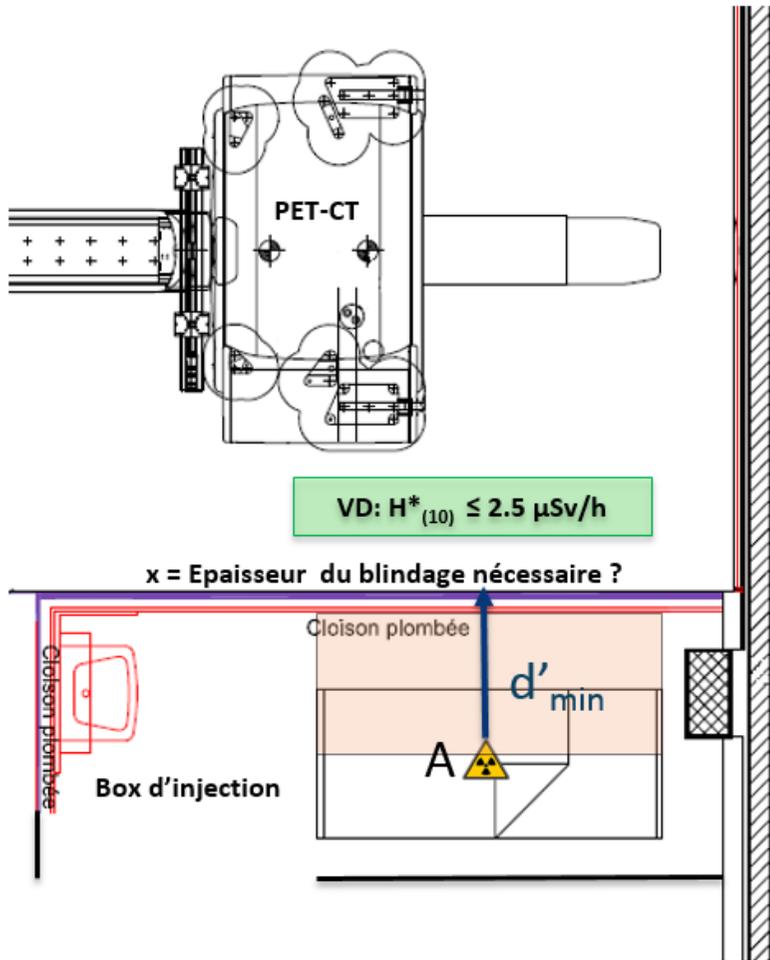
EAD

$$x = \text{Log}(90) * 1.59$$

$$x = 3.11 \text{ cm de plomb}$$

➡ Environ 4 tonnes de plomb...

# Exemple pratique – PET-CT

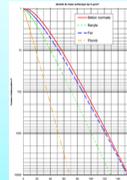


## Optimisation par la distance

Source A = 350 MBq de F-18 @  $d'_{\min} = 110 \text{ cm}$

$h_{10}(\text{F-18}) = 160 \mu\text{Sv/h} / \text{GBq} @ 1\text{m}$

$$\left. \begin{array}{l} H^*(10) = 46 \mu\text{Sv/h} \\ \text{VD} = 2.5 \mu\text{Sv/h} \end{array} \right\} F = 19$$



Densité de masse surfacique =  $23 \text{ g/cm}^2$

Densité du plomb =  $11.3 \text{ g/cm}^3$

$23/11.3 = 2.04 \text{ cm de plomb}$

EAD

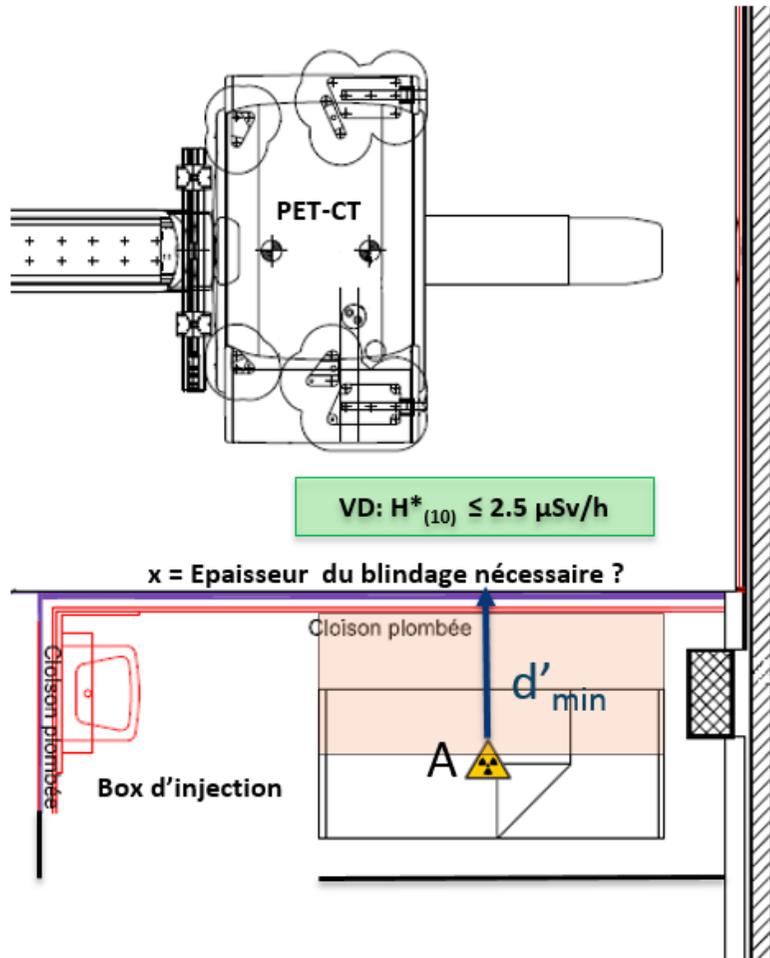
$$x = \text{Log}(19) * 1.59$$

$$x = 2.03 \text{ cm de plomb}$$



Gain d'environ 1400 kg de plomb...

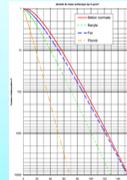
# Exemple pratique – PET-CT



## Optimisation par la réduction de la source (cf. NRD)

Source A = **250 MBq** de F-18 @  $d'_{\min} = 110 \text{ cm}$   
 $h_{10}(\text{F-18}) = 160 \mu\text{Sv/h} / \text{GBq} @ 1\text{m}$

$$\left. \begin{array}{l} H^*(10) = 33 \mu\text{Sv/h} \\ \text{VD} = 2.5 \mu\text{Sv/h} \end{array} \right\} F = 13$$



Densité de masse surfacique =  $21 \text{ g/cm}^2$   
 Densité du plomb =  $11.3 \text{ g/cm}^3$   
 $21/11.3 = 1.86 \text{ cm de plomb}$

EAD

$$x = \text{Log}(13) * 1.59$$

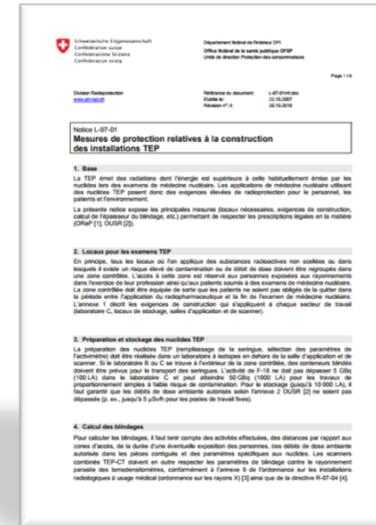
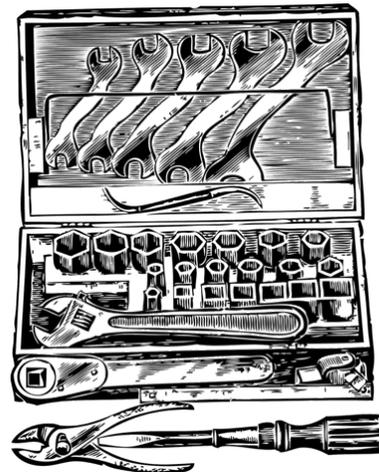
$$x = 1.77 \text{ cm de plomb}$$

➡ Gain (théorique) supplémentaire d'environ 140 kg de plomb...

# Conclusion (intermédiaire...)

Les ordonnances et directives de l'OFSP sont des outils à la portée de tous pour estimer par des méthodes analytiques les besoins de blindage liés, par exemple, à l'installation d'un PET-CT.

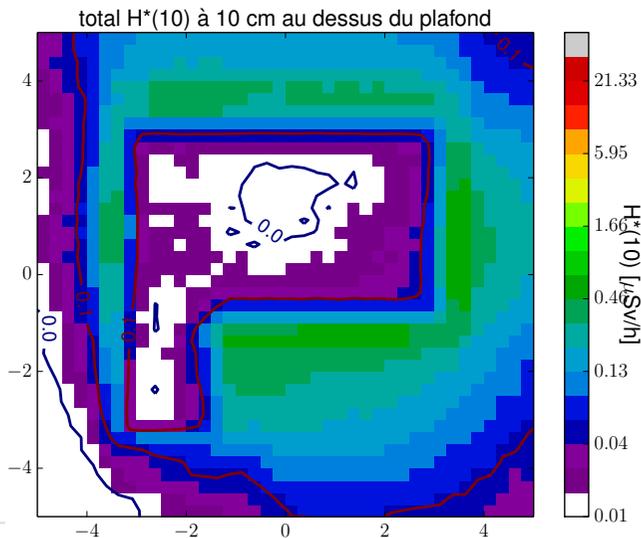
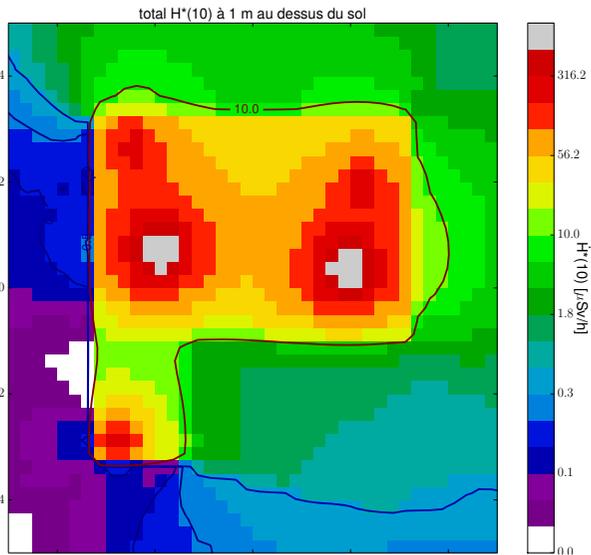
- La charge associée au blindage peut être importante,
- Des optimisations sont possibles,
- Facteur déterminant : distances !



# Pourtant...

- Dans certaines situations, notamment en cas de discontinuité des blindages, l'effet du rayonnement diffusé (*skyshine*) doit aussi être pris en compte...
- La géométrie des sources peut être trop éloignée d'une source ponctuelle pour que l'utilisation de  $h_{10}$  soit pertinente (autoprotection)...
- Des sources multiples peuvent être difficiles à appréhender avec la méthode proposée plus haut...

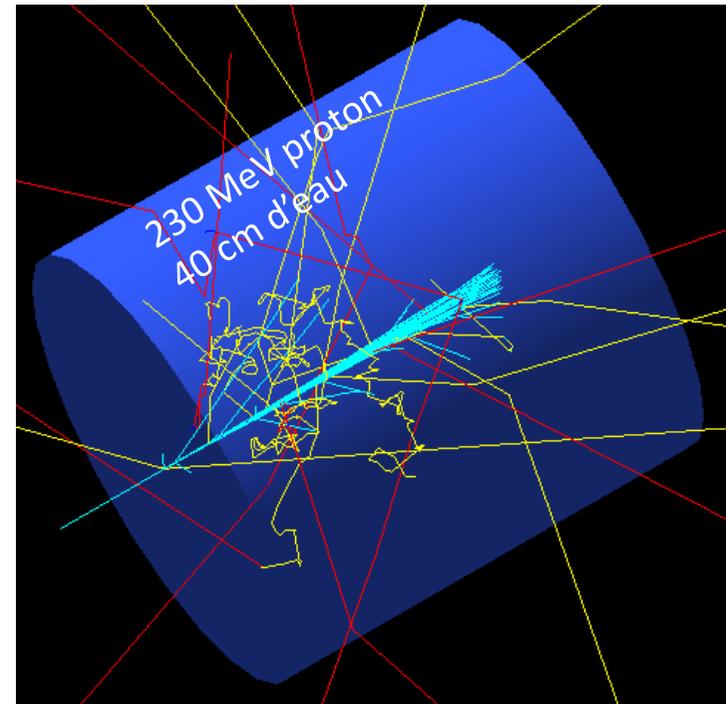
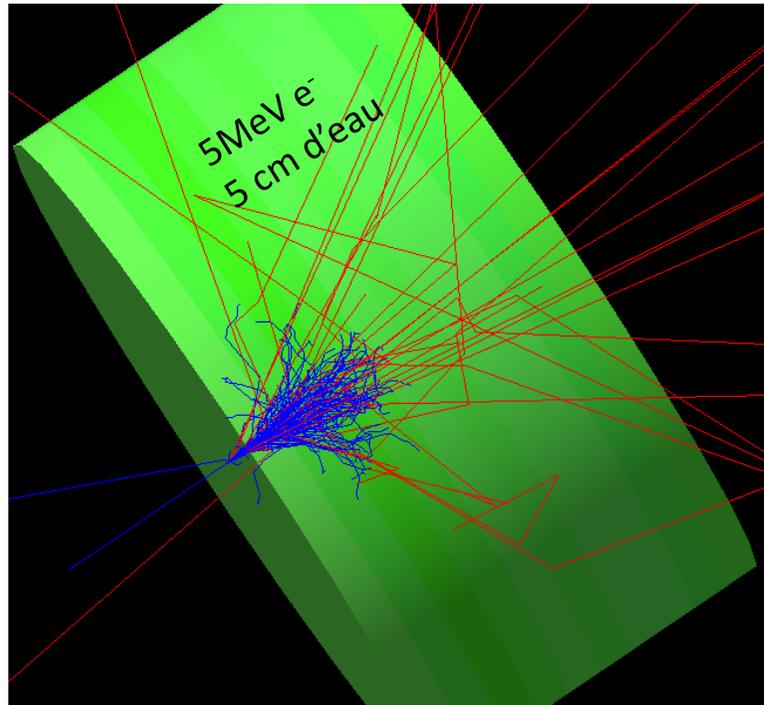
Dans ces situations, les simulations Monte Carlo permettent une meilleure évaluation des blindages



# Simulations Monte Carlo- Plan

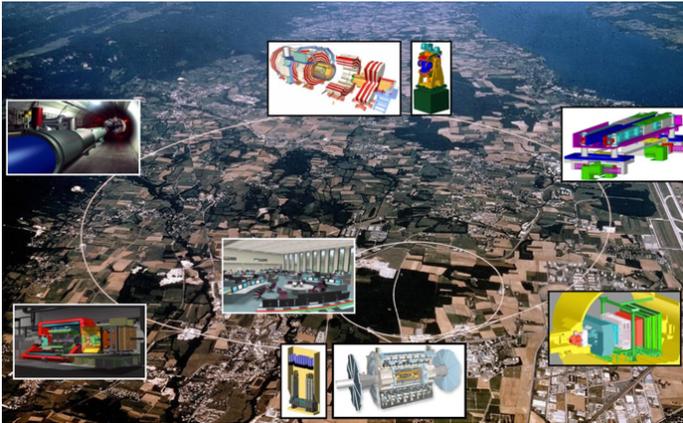
- Présentation du calcul Monte Carlo (MC) dans le domaine des radiations ionisantes
- Utilisation de la méthode Monte Carlo pour le calcul de  $H^*(10)$  en radioprotection
- Exemple de calcul de  $H^*(10)$  pour le blindage des cuves de rétention de  $I^{131}$  au CHUV

## Calcul Monte Carlo dans le domaine des radiations ionisantes



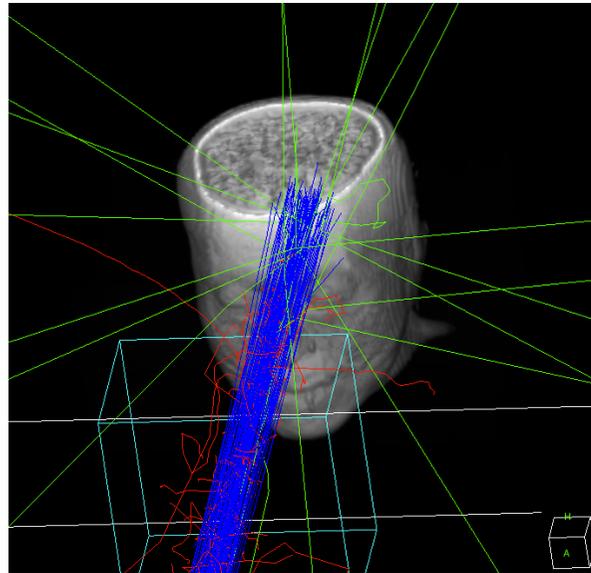
# Quelques exemples d'application des simulations MC dans le domaine des radiations ionisantes

Modélisation des détecteurs du LHC

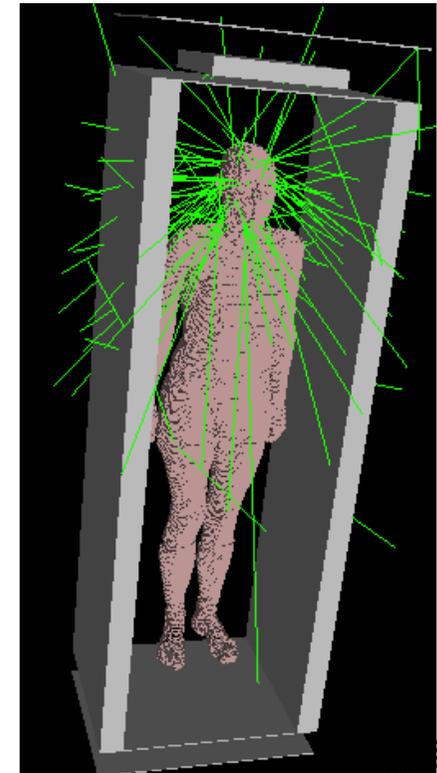


Applications médicales

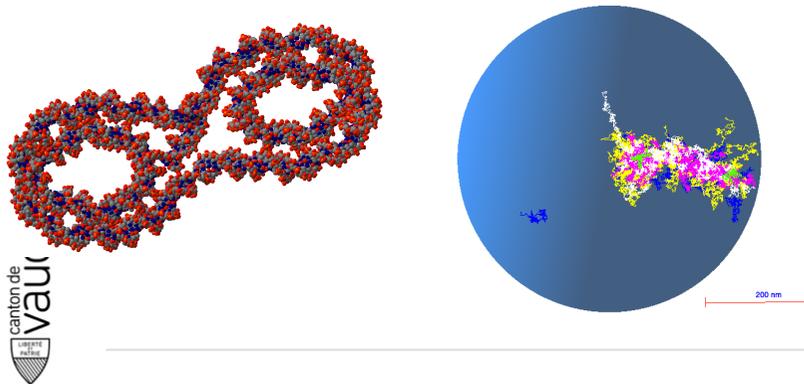
- Radiothérapie
- Imagerie médicale



Modélisation d'incorporation de substance radioactive

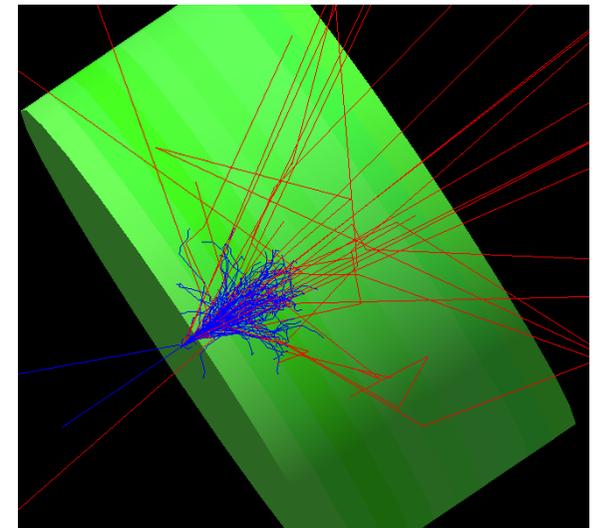


Radiobiologie



# Principaux codes Monte Carlo utilisés en physique des particules ionisantes

- MCNP – *Monte-Carlo N-Particle transport*
- FLUKA - ***FLU**ktuierende **K**askade*
- GEANT4 – *Geometry and Tracking*
- Autres: Penelope, EGS, PHITS, .....



# *GEANT4 – Geometry and Tracking*

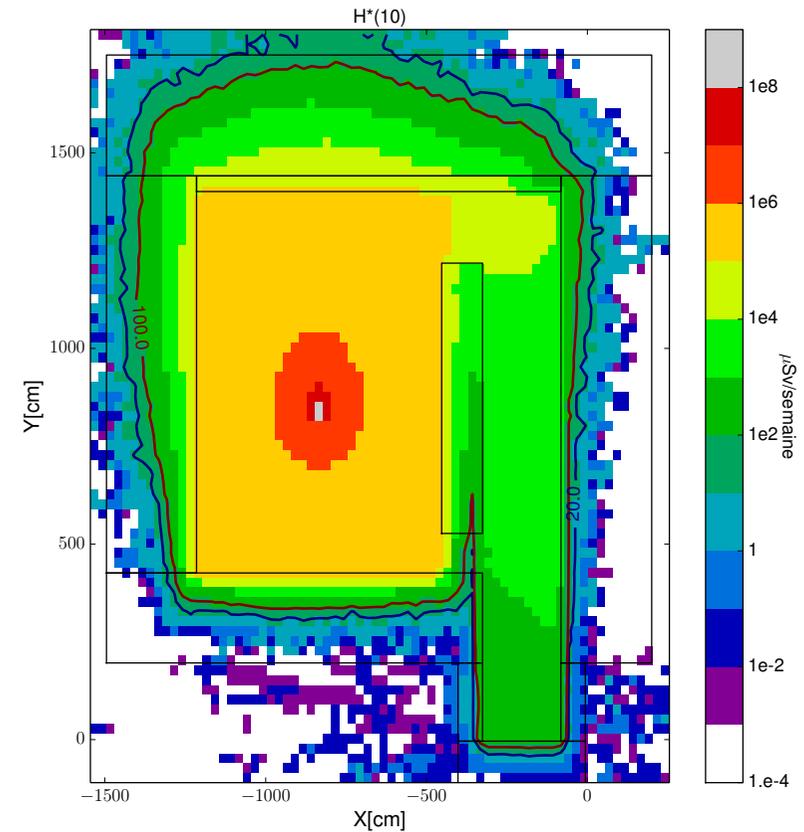
- Développé par une collaboration internationale: CERN, SLAC,ESA, ...
- Langage C++ avec accès libre au code source
- Traite le transport d' e-, e+, protons, gammas, neutrons, ions lourds, muons, pions,...
- Simulation des interactions électromagnétiques, nucléaires, désintégration radioactive, ...
- Module spécifique Geant4DNA pour la radiobiologie

# Calcul Monte Carlo de $H^*(10)$ pour la radioprotection

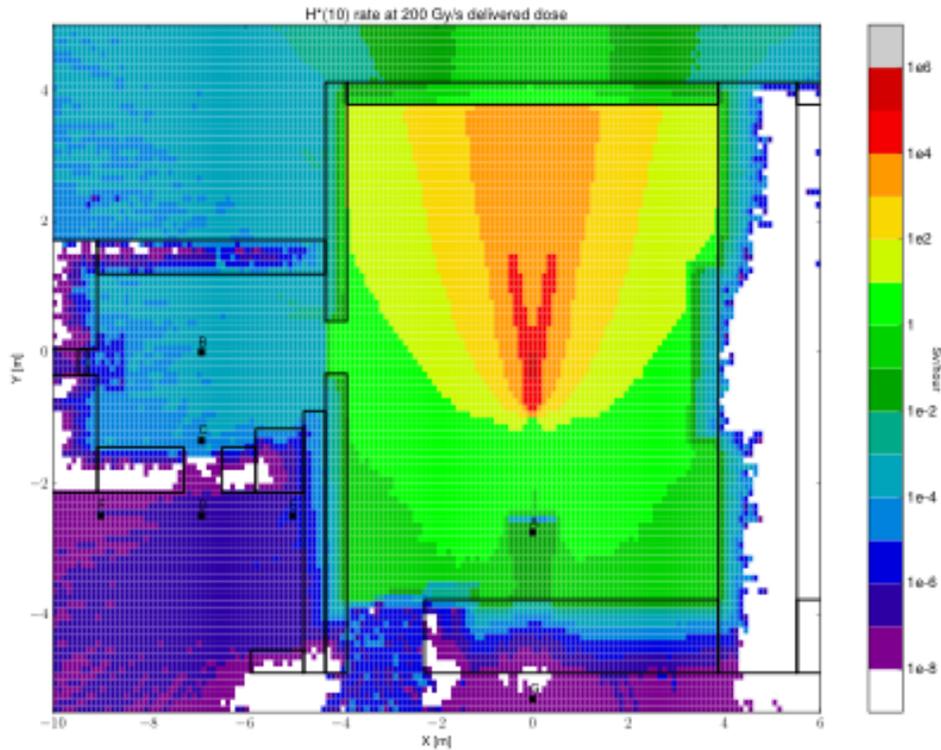
- Calcul des flux de gammas, électrons, neutrons, protons sur une grille 3D
- Conversion des fluences en  $H^*(10)$

$$H^*(10) = \sum_i \int C_i(E) \phi_i(E) dE$$

coefficients de conversion ICRP74

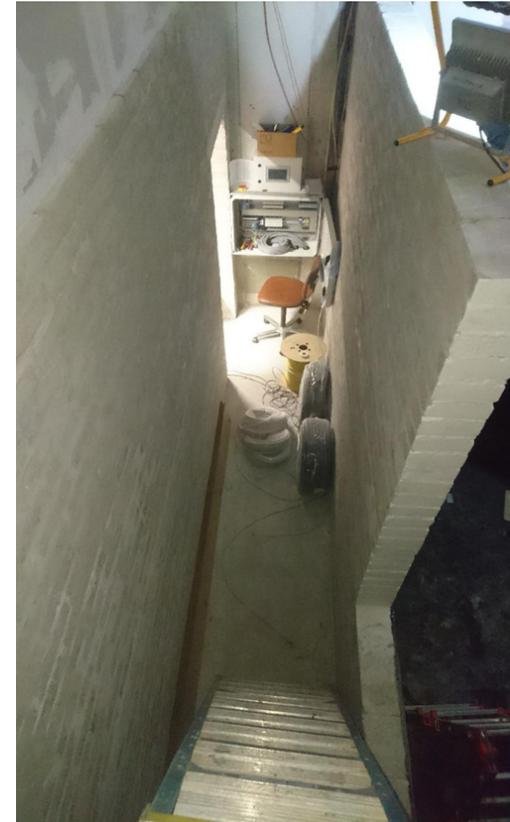
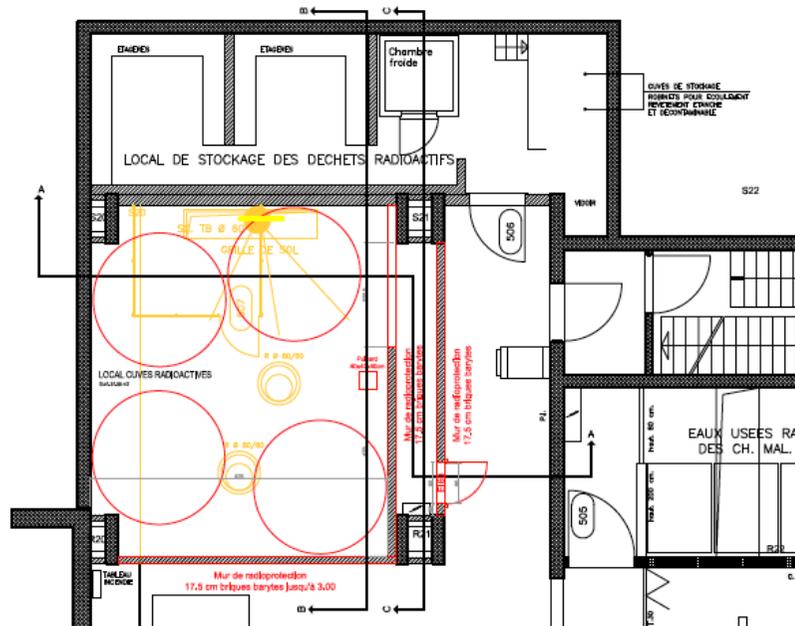


# Apport des simulations MC en radioprotection



- Calculer l'atténuation précise de la dose directe dans les blindages et les murs
- Tenir compte de la complexité de la géométrie et de la source
- Simuler la contribution à la dose de la diffusion du flux des particules (composante secondaire et tertiaire)

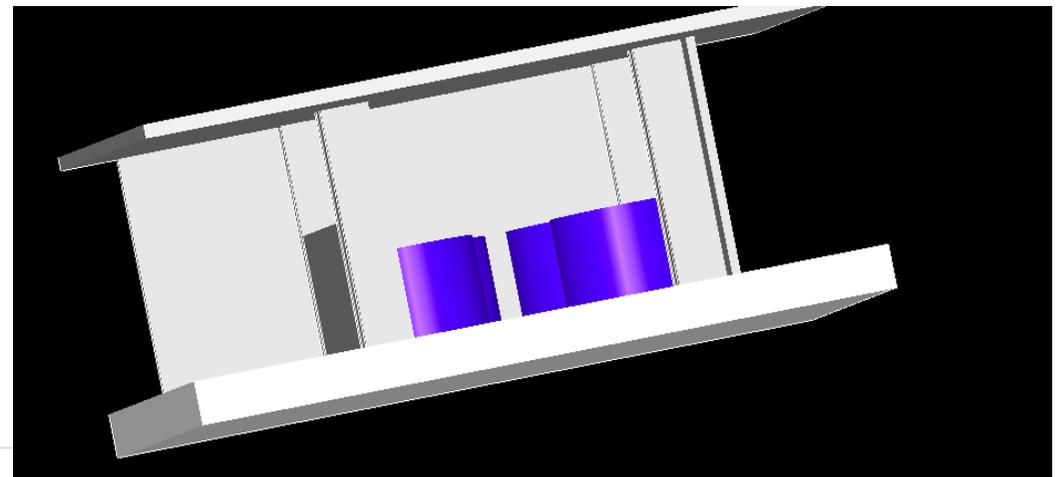
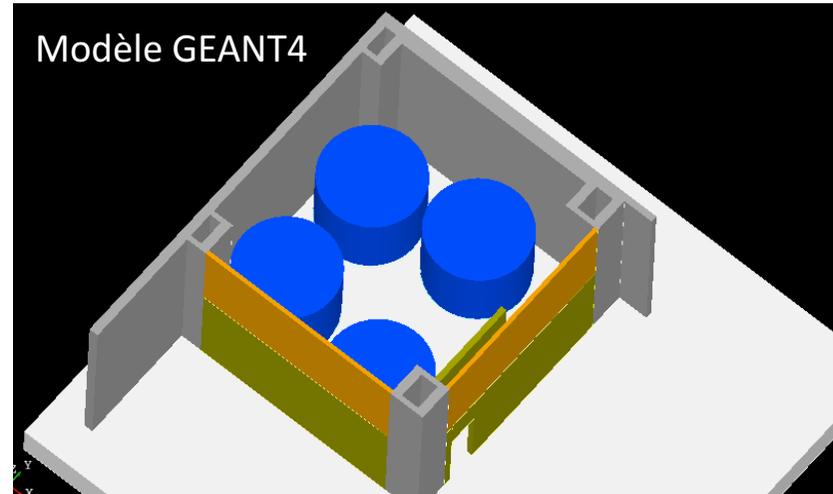
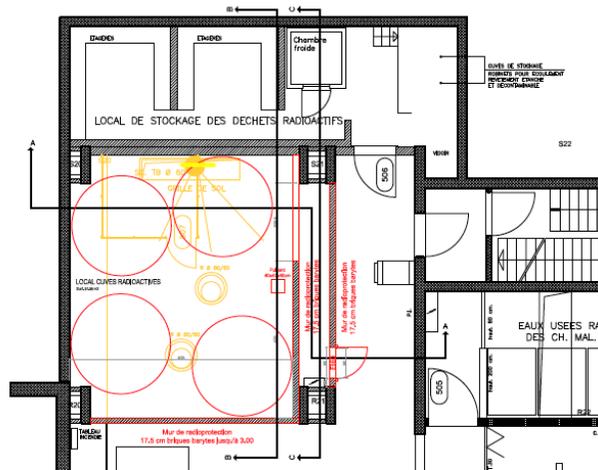
# Nouvelles cuves de rétention I<sup>131</sup> au CHUV



- 4 cuves de rétention des eaux usées radioactives (h 2.2 m, diamètre 3 m)
- Blindage avec murs de brique de béton barité 17.5 cm épaisseur, 3.2 g/cm<sup>2</sup>
- Calcul du niveau de débit de dose H\*(10) autour du local

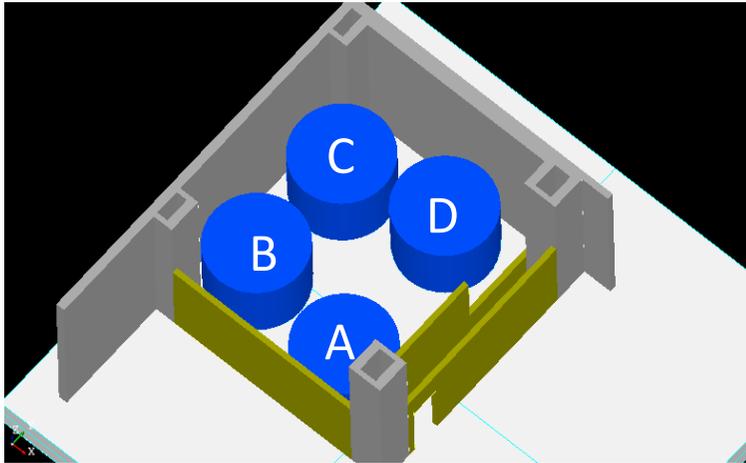
# Transfert de la géométrie en format GEANT4

Plan architecte



- Dimensions des murs et blindage prises sur les plans
- Codage de la géométrie dans GEANT4 en C++ ou en format XML
- Possibilité d'importer des fichiers CAD 3D en format step dans GEANT4

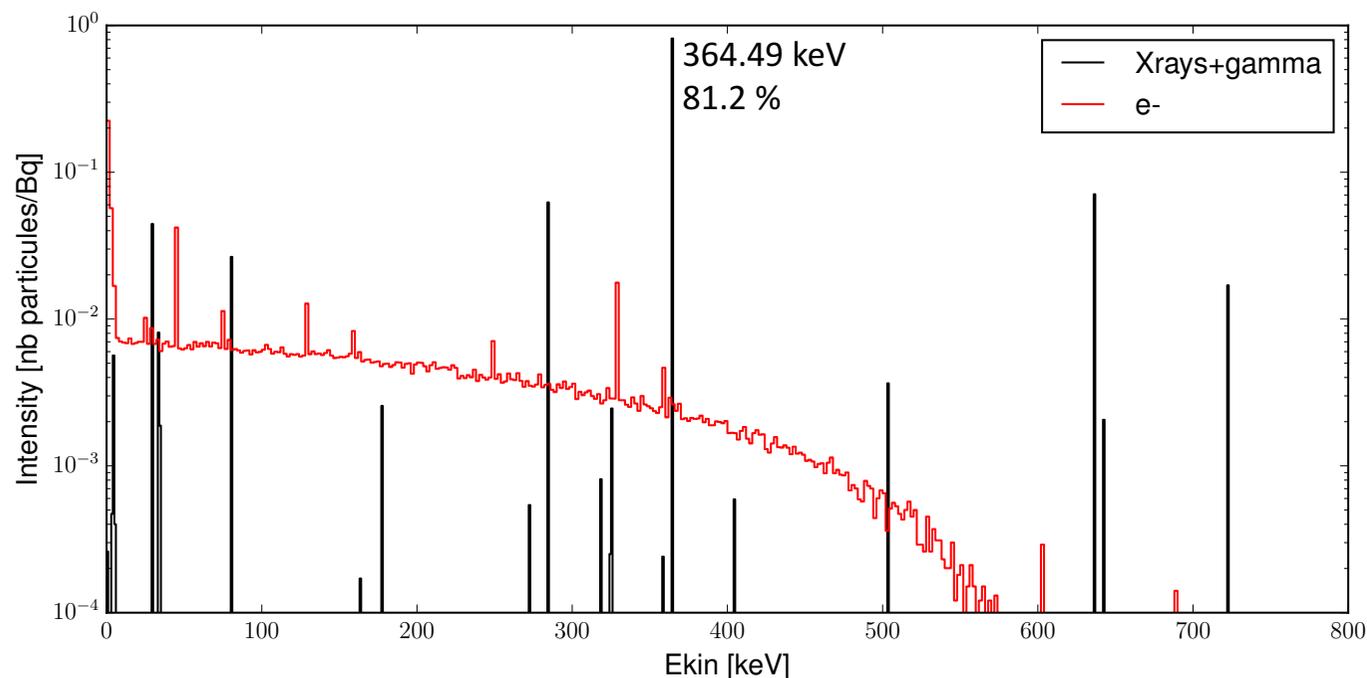
# Modélisation des sources d'eau usées radioactives



- Cuves remplies d'eau
- Source d'  $^{131}\text{I}$  mélangé d'une manière homogène dans l'eau

	Activité des cuves [GBq]			
Scenario	Cuve A	Cuve B	Cuve C	Cuve D
ABCD	20.63	1.88	0.17	0.02
ADCB	20.63	0.02	0.17	1.88
BCDA	0.02	20.63	1.88	0.17
CDAB	0.17	0.02	20.63	1.88

# Modélisation de la désintégration radioactive de $^{131}\text{I}$



Seul les rayons gamma contribuent à la dose

Tous les processus de désintégration sont modélisés dans GEANT4

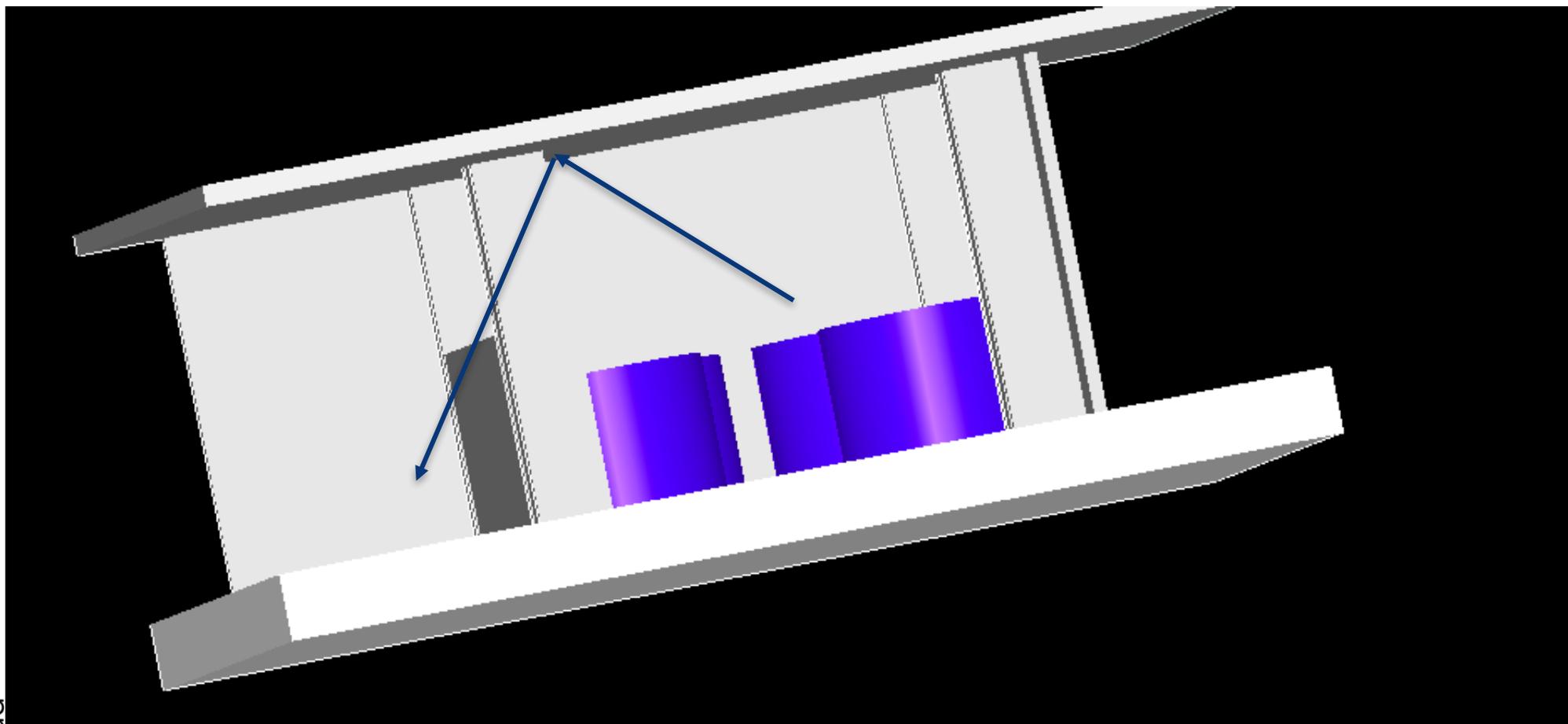
Désintégration  $\beta^-$

Déexcitation nucléaire  
émission gamma et d'électron  
de conversion

Déexcitation atomique  
Emission Rayons X et Auger e-

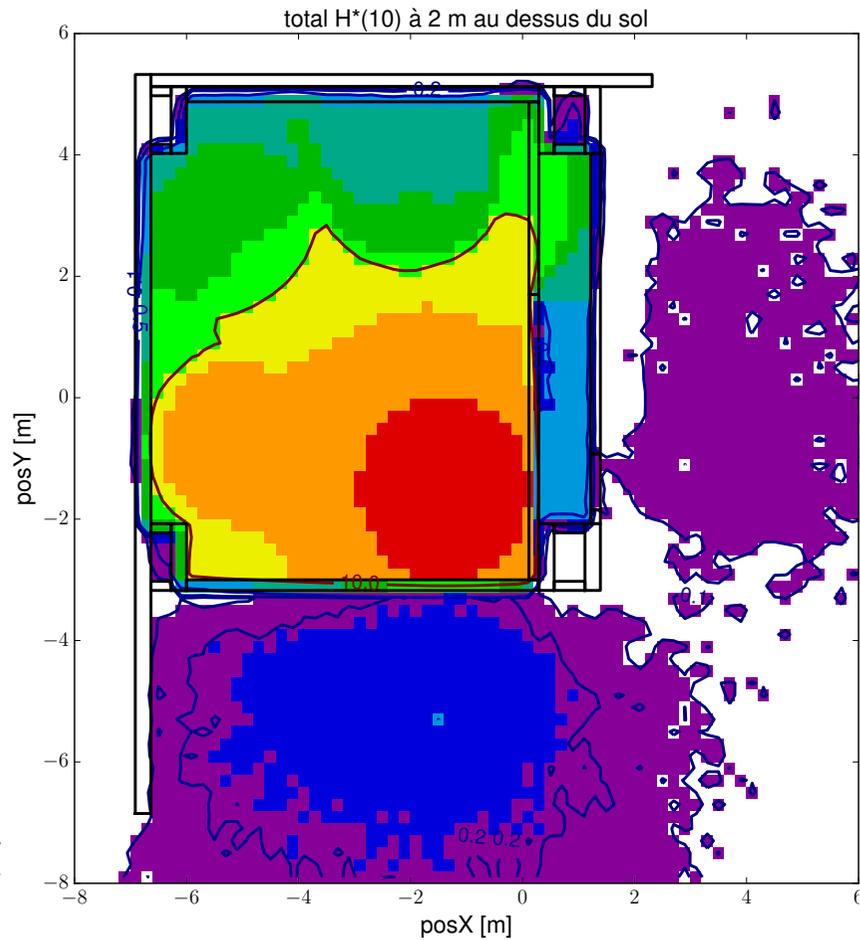


# Contribution du sky-shine

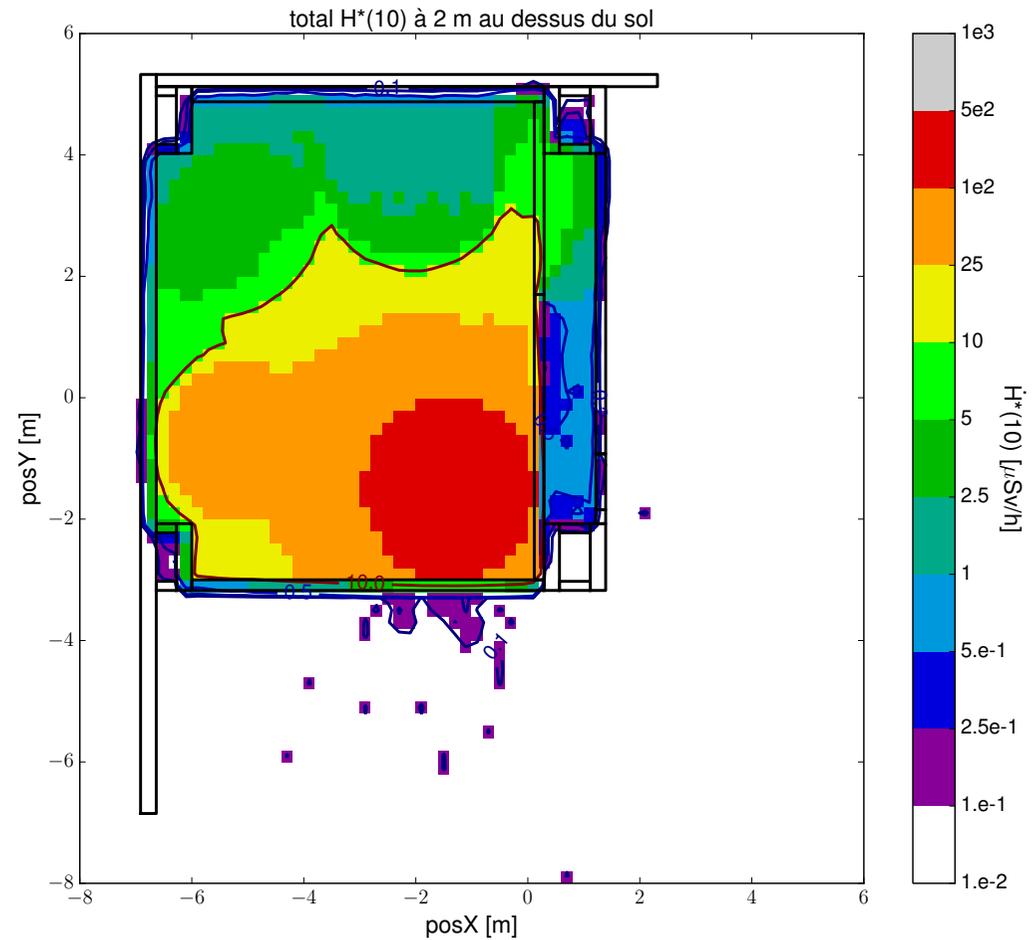


# Contribution du sky-shine domine en dehors du local

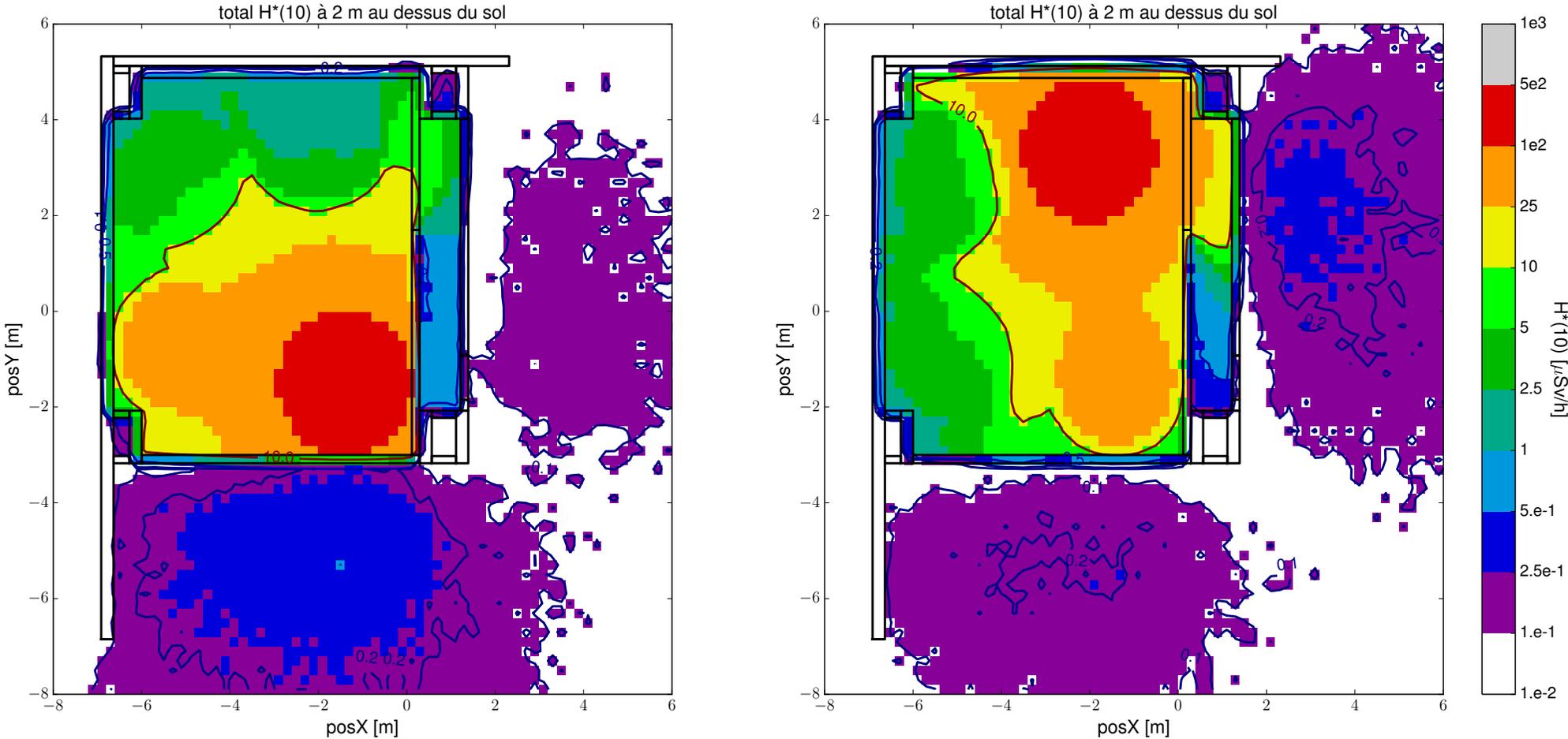
Mur barité jusqu'à 3 m



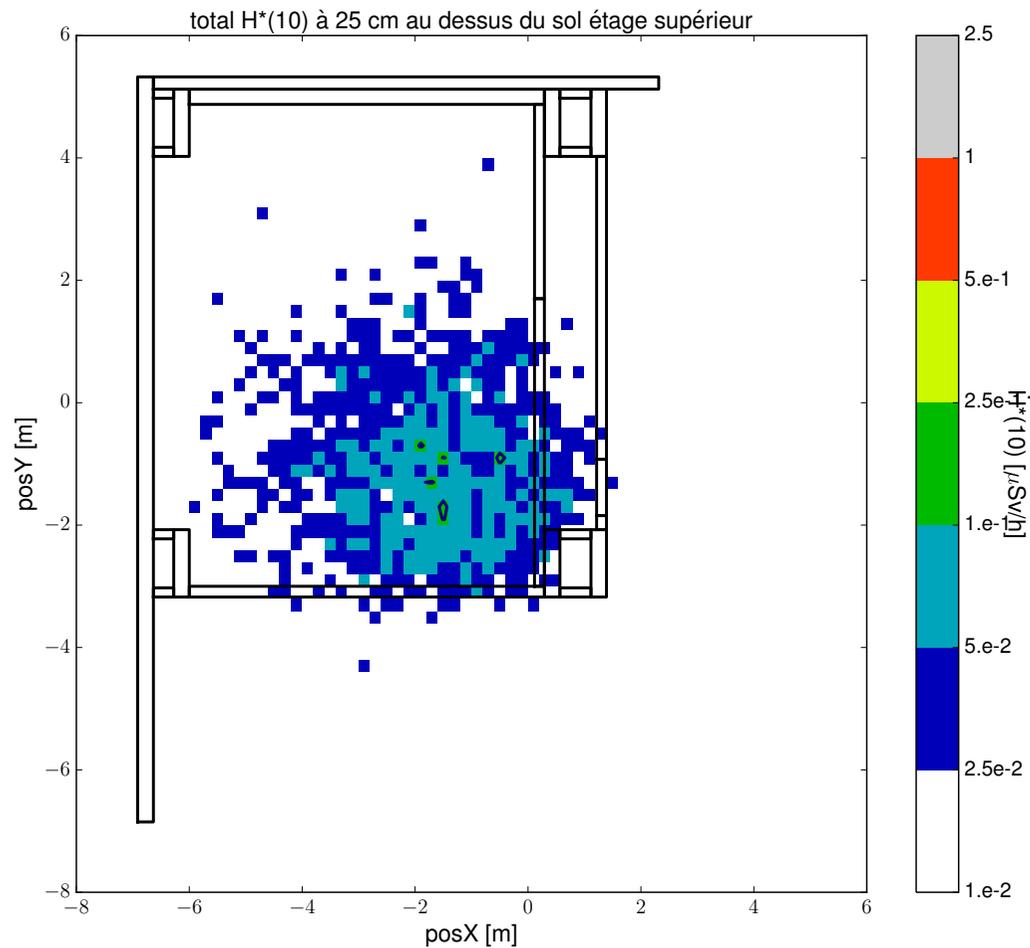
Mur barité jusqu'à 5 m



# Débit de dose < 1 $\mu\text{Sv/h}$ pour tous les scénarios



# Débit de dose à l'étage supérieur- Espace public



- Protection par la dalle de béton de 32 cm
- Débit de dose  $< 0.25 \mu\text{Sv/h}$

# Conclusions

- Besoin des simulations Monte Carlo pour les calculs de  $H^*(10)$  dans le cas de géométrie et de source complexes
- Nos calculs GEANT4 du débit de  $H^*(10)$  pour le nouveau local de cuve de rétention des eaux radioactives du CHUV montrent que:
  - Le sky-shine contribue majoritairement à la dose extérieure
  - Le blindage en béton barité de 3m de haut permet de limiter la dose en dessous des limites de dose légales

