



Andreas PITZSCHKE, PhD  
Institut de radiophysique

# Bases de la radioprotection et irradiation de la population

Cours RP B/C – Février 2018



# Objectifs du cours

- **Inventorier les différentes sources d'irradiation** de la population suisse et les doses correspondantes
- Discuter les **ordres de grandeur des doses** reçues par la population par rapport aux limites légales

# Plan du cours

1. Sources d'irradiation
2. Radon
3. Incorporation
4. Radiation cosmique
5. Radiation terrestre
6. Applications médicales

Quel est le niveau d'exposition moyen en Suisse ?

Quelles en sont les origines?

Les doses moyennes d'irradiation de la population suisse sont indiquées régulièrement depuis des années dans les rapports de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) « **Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse** »



# « Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse »



## 2 Strahlendosen - Doses de rayonnements

<b>Strahlendosen</b>	<b>32</b>
Einführung	32
Strahlendosen der Bevölkerung	32
Strahlenbelastung durch Radon	32
Bestrahlung durch medizinische Diagnostik	33
Terrestrische und kosmische Strahlung	33
Radionuklide in der Nahrung	33
Übrige (künstliche) Strahlenquellen	33
Berufliche Strahlenexposition	33
<b>Doses de rayonnements</b>	<b>34</b>
Introduction	34
Doses de rayonnement reçues par la population	34
Doses de rayonnement dues au radon	34
Doses de rayonnement dues au diagnostic médical	35
Rayonnement terrestre et cosmique	35
Radionucléides dans les aliments	35
Autres sources de rayonnement (artificielles)	35
Exposition aux rayonnements dans le cadre professionnel	35

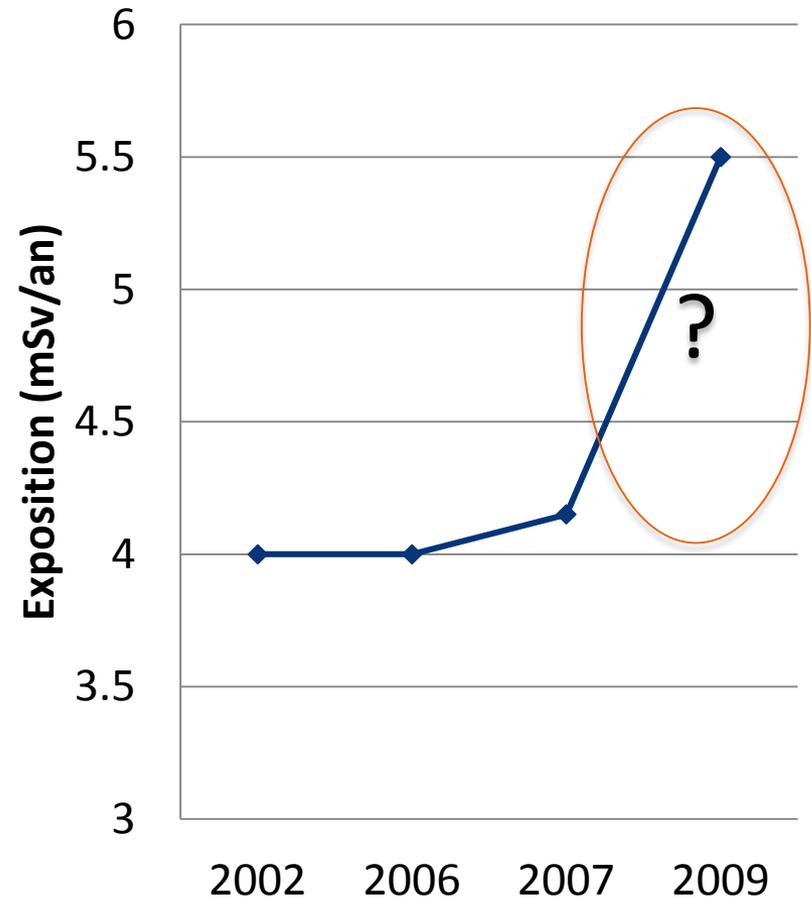
# Evolution des doses en Suisse

2002 : « La dose annuelle de la population suisse, estimée en moyenne à **4 mSv** (milli-Sievert), provient essentiellement des sources d'origine naturelle »

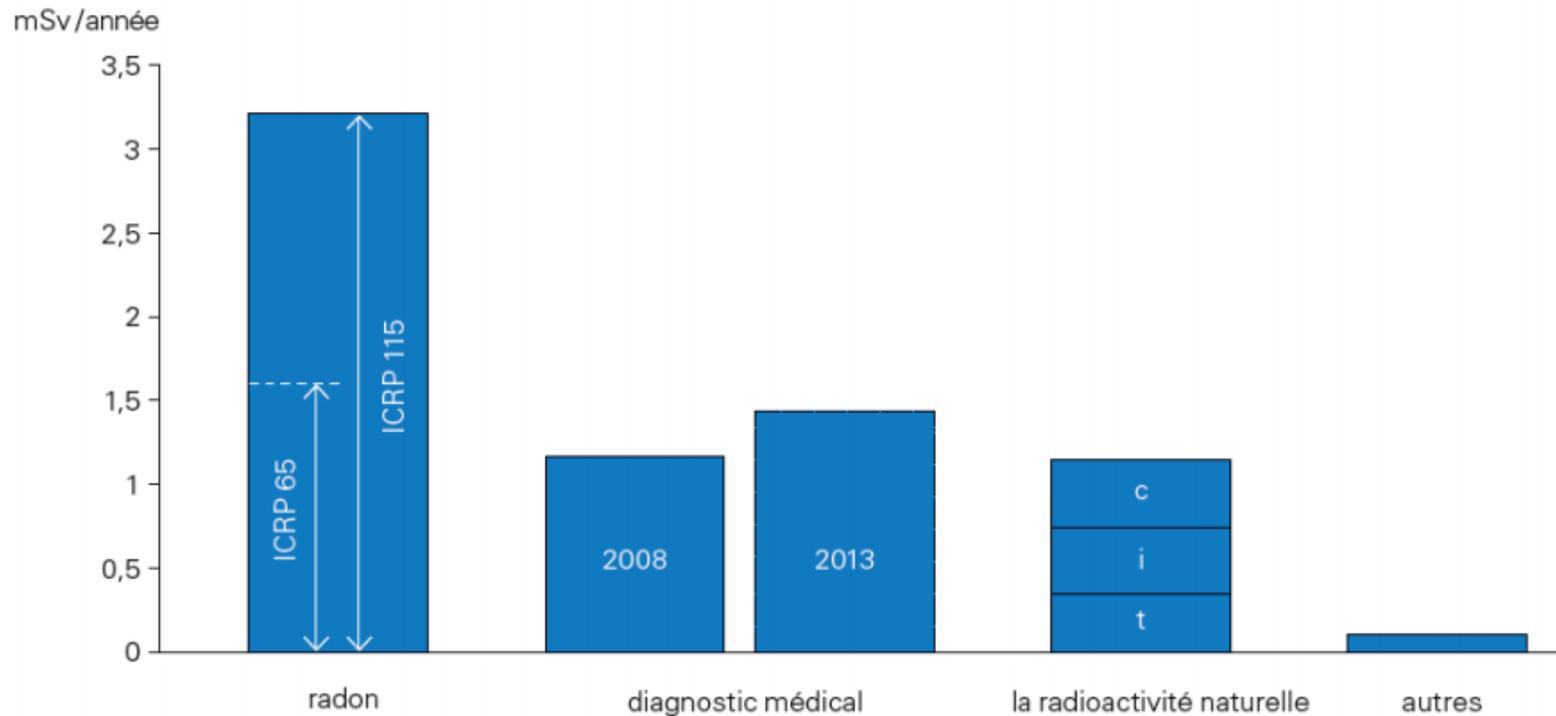
2006 : « Die durchschnittliche Jahresdosis der Bevölkerung von insgesamt **4 mSv** (die Strahlendosen werden in der Einheit milli-Sievert: mSv angegeben) stammt weitgehend aus natürlichen »

2007 : « La dose annuelle reçue par la population suisse en 2007 a pu être estimée à **4.15 mSv** (milli-Sievert) en moyenne »

2009: « La dose de rayonnements totale reçue en moyenne par la population suisse s'élève à **5.5 mSv/an**.



# Exposition de la population suisse (2014)



**Figure 1:**

Doses moyennes de rayonnement reçues par la population suisse [en mSv/an/ personne]. La dose inhérente au radon est, selon la nouvelle évaluation de la CIPR (115, 2010), sensiblement revue à la hausse par rapport à l'estimation de la CIPR 65. La dose induite par le radiodiagnostic médical se base sur l'enquête de 2008 et sur l'enquête intermédiaire de 2013. La dose provenant de la radioactivité naturelle résulte du rayonnement terrestre (t), de l'incorporation (i) et du rayonnement cosmique (c). La rubrique « autres » englobe les centrales nucléaires, les instituts de recherche ainsi que les radio-isotopes artificiels présents dans l'environnement

# Evolution des doses en Suisse

La **dose moyenne** n'est pas représentative des conditions de vie individuelles.

La **variabilité** des doses dues aux différentes composantes est importante:

- Exposition variable
  - Exposition au radon (l'ensemble de la population en permanence, taux d'exposition inhomogène)
  - Exposition en médecine (occasionnelle et individuelle)
- Exposition « invariable »
  - Incorporation
  - Rayonnement cosmique
  - Rayonnement terrestre

# Expositions moyennes des populations

**Table 1**  
**Average radiation dose from natural sources**

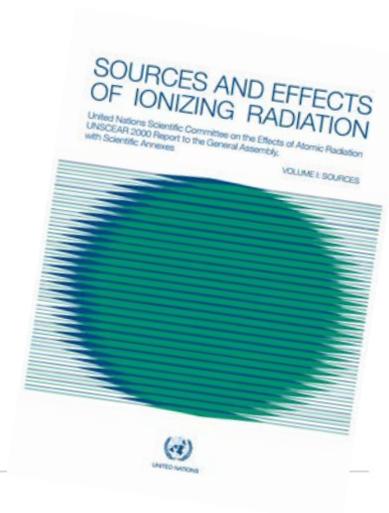
<i>Source</i>	<i>Worldwide average annual effective dose (mSv)</i>	<i>Typical range (mSv)</i>
<b>External exposure</b>		
Cosmic rays	0.4	0.3-1.0 <sup>a</sup>
Terrestrial gamma rays	0.5	0.3-0.6 <sup>b</sup>
<b>Internal exposure</b>		
Inhalation (mainly radon)	1.2	0.2-10 <sup>c</sup>
Ingestion	0.3	0.2-0.8 <sup>d</sup>
Total	2.4	1-10

*a* Range from sea level to high ground elevation.

*b* Depending on radionuclide composition of soil and building materials.

*c* Depending on indoor accumulation of radon gas.

*d* Depending on radionuclide composition of foods and drinking water.



Source and effects of ionizing radiation – Vol 1. UNSCEAR 2000

<http://www.unscear.org/unscear/en/faq.html>

# Expositions moyennes des populations



Doses moyennes délivrées à des fins médicales

**Plus notre société est développée, plus la dose moyenne augmente.**

**Table 1. Estimated annual per caput dose and annual effective dose to the world population from diagnostic medical and dental radiological examinations (1997–2007)**

<i>Health-care level</i>	<i>Population (millions)</i>	<i>Annual per caput dose (mSv)</i>		<i>Annual collective effective dose (man Sv)</i>	
		<i>Medical</i>	<i>Dental</i>	<i>Medical</i>	<i>Dental</i>
I	1 540	1.91	0.006 4	2 900 000	9 900
II	3 153	0.32	0.000 4	1 000 000	1 300
III	1 009	0.03	0.000 051	33 000	51
IV	744	0.03	0.000 051	24 000	38
Global	6 446	0.62	0.002	4 000 000	11 000

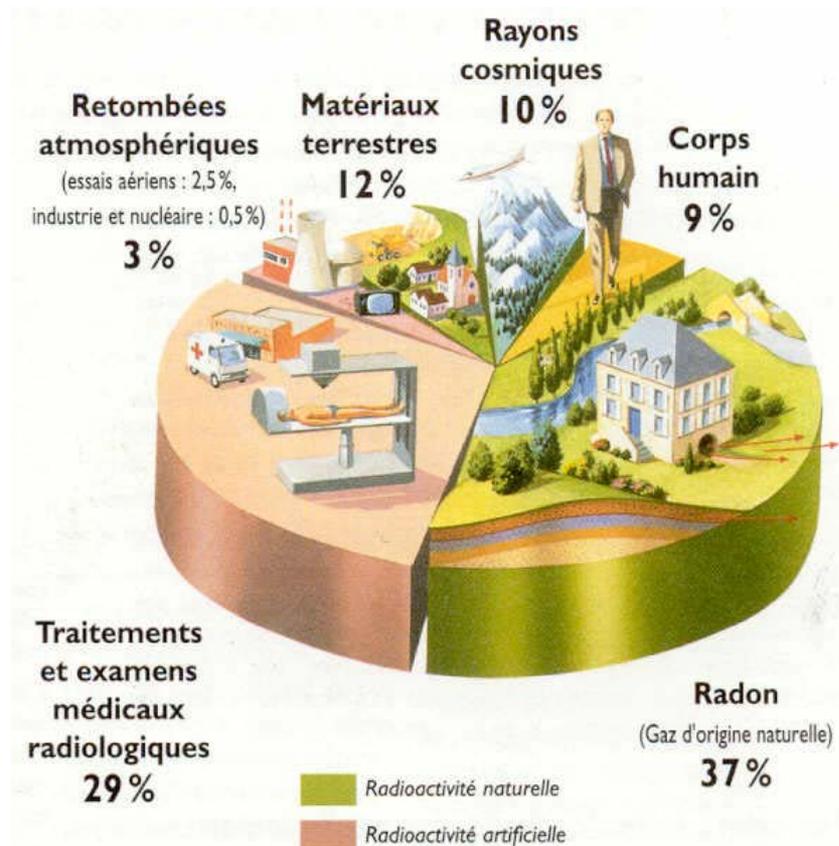
Source and effects of ionizing radiation – Vol 1. UNSCEAR 2008

[http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_Annex\\_A.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_A.pdf)

# Source d'exposition en Suisse

## Sommaire :

- Radon
- Incorporation
- Rayonnement cosmique
- Composante terrestre
- Retombées atmosphériques
- Composante médicale

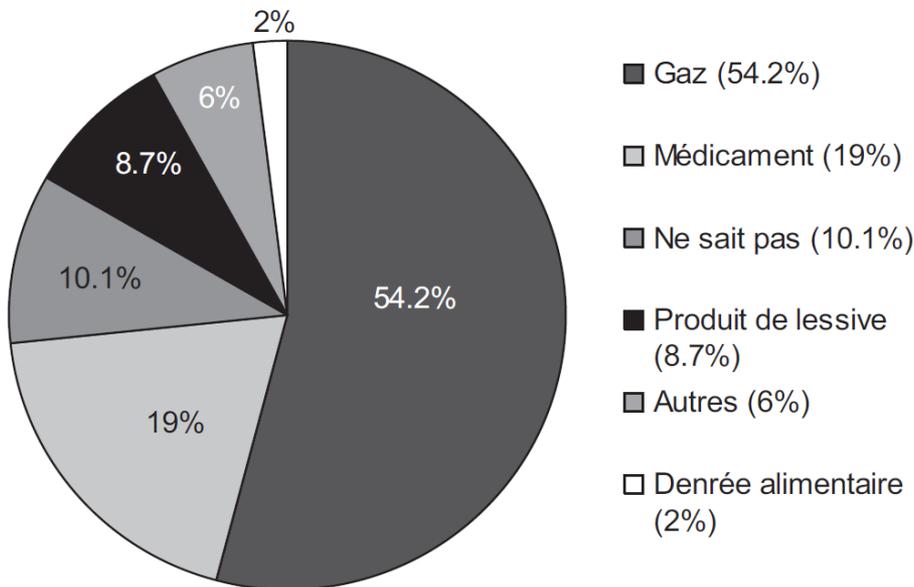


# Radon

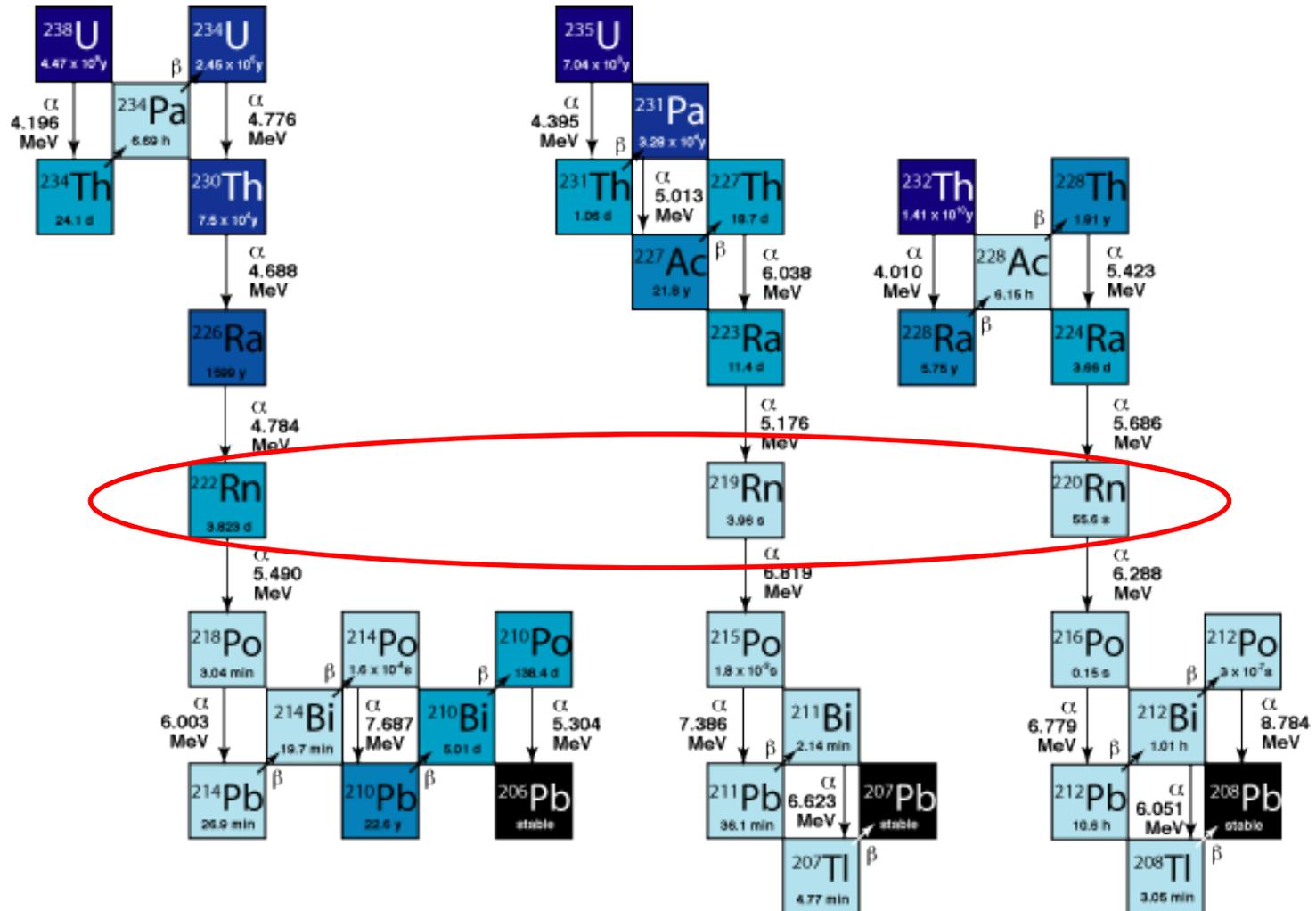
Enquête sur la connaissance des Suisses au sujet du radon

**40% de la population suisse a déjà entendu parler du radon  
(+8% par rapport à 1995)**

**« Qu'est-ce que le radon à votre avis ? »**



# Source du radon : séries de $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ et $^{232}\text{Th}$



# Le radon et ses descendants

Élément	Période	Énergie $\alpha$	Énergie $\beta$	Énergie $\gamma$
Rn-222	3.83 j	5.0 – 5.5 MeV	-	-
Po-218	3.05 min	6.0 MeV	-	-
Pb-214	26.8 min	-	~ 2.1 MeV	0.05 – 0.9 MeV
Bi-214	19.9 min	-	~ 0.6 MeV	0.05 – 2.5 MeV
Po-214	$1.65 \cdot 10^{-4}$ s	7.7 MeV	-	-
Pb-210	22.3 a	-	~ 0.06 MeV	0.047 MeV
Bi-210	5.01 j	-	~ 1.2 MeV	-
Po-210	138 j	5.3 MeV	-	-

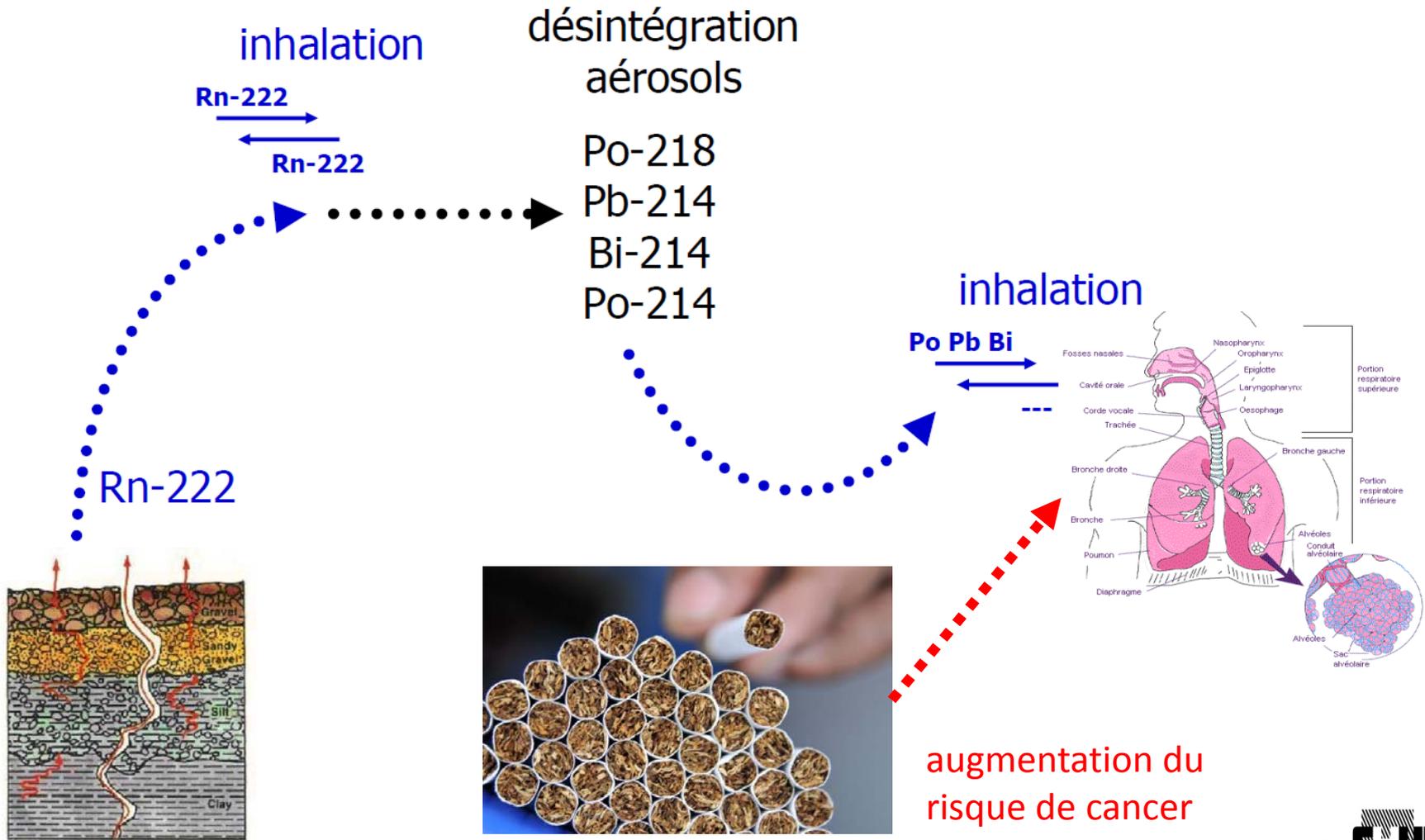
présents dans les  
poumons suite à  
**inhalation**

présents dans  
l'environnement



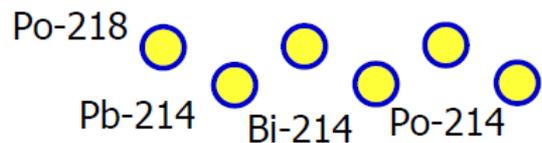
alimentation,  
tabac

# Inhalation du radon

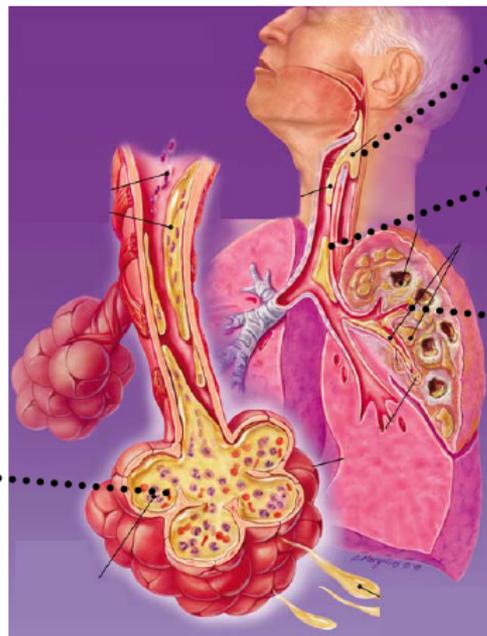


# L'effet du radon sur l'organisme

## Radioéléments sur les aérosols



alvéoles  
0.1 – 1.0  $\mu\text{m}$



extra-thoracique  
5.5 – 9.2  $\mu\text{m}$

bronches  
3.3 – 5.5  $\mu\text{m}$

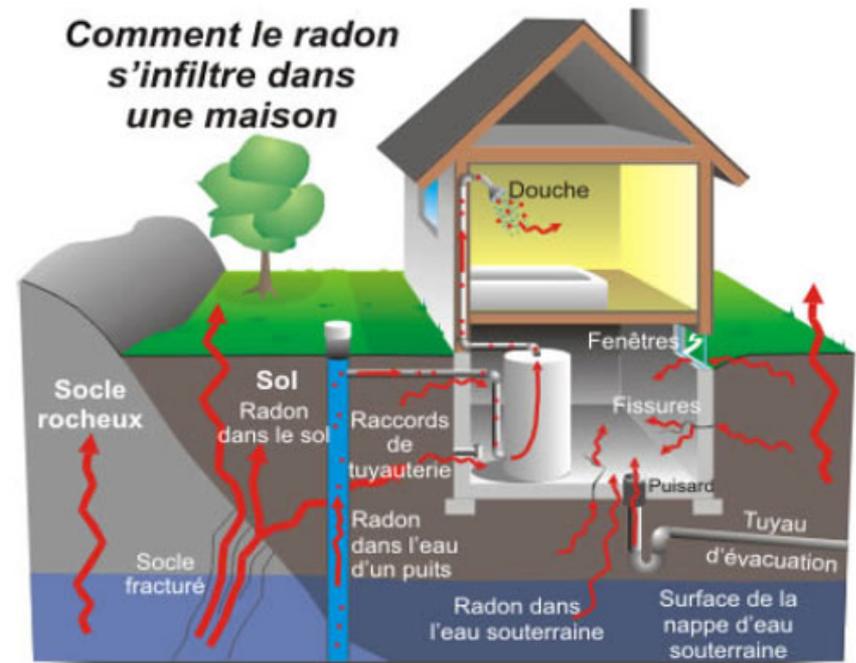
bronchioles  
1.0 – 3.3  $\mu\text{m}$

**Désintégrations** dans les poumons  
Exposition des **cellules basales** de la muqueuse

Induction de **cancers**  
des poumons

# Infiltration du radon dans la maison

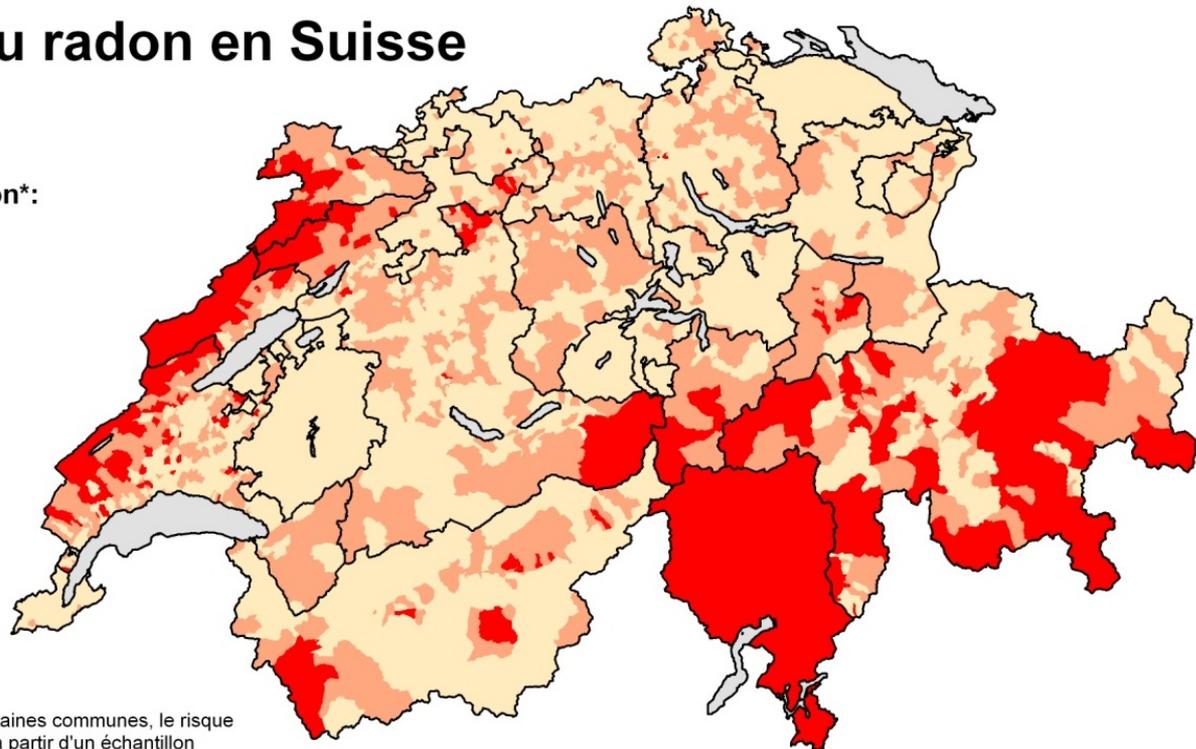
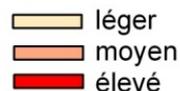
- **Infiltration du radon dans le bâtiment**
  - **Directement du terrain (effet cheminé)**
  - Par les conduites d'électricité, canalisations, conduites d'eau
  - Par approvisionnement en eau potable (dégazage)
- **Production du radon à l'intérieur du bâtiment**
  - Matériaux de construction



# Radon dans les bâtiments en Suisse

## Carte du radon en Suisse

Risque en radon\*:



Etat: février 2010

\* Remarque: dans certaines communes, le risque en radon est estimé à partir d'un échantillon insuffisant de mesures (à voir dans le "moteur recherche par commune", sous [www.ch-radon.ch](http://www.ch-radon.ch)).

Source: GG25 ©Swisstopo

**Radon en Suisse → 200 à 300 cas de décès par an des suites d'un cancer du poumon**

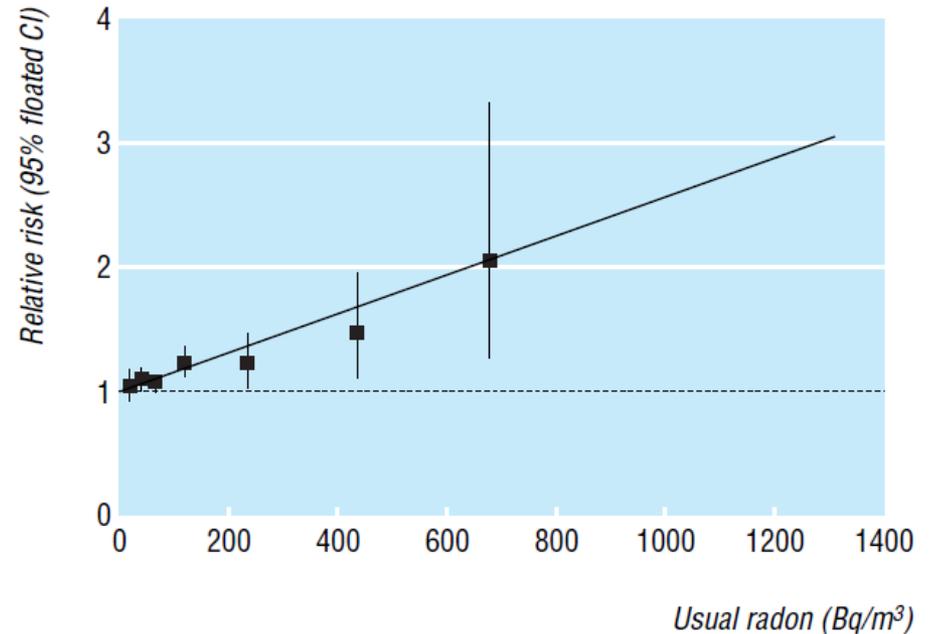
# Etudes de risque dû au radon

13 études / 9 pays : Allemagne, Belgique, Espagne, Finlande, France, Grande Bretagne, Italie, République Tchèque, Suède

**Augmentation du risque de cancer du poumon avec la concentration de radon**

Relation significative pour les expositions  $< 200 \text{ Bq/m}^3$

Relation linéaire **sans seuil**

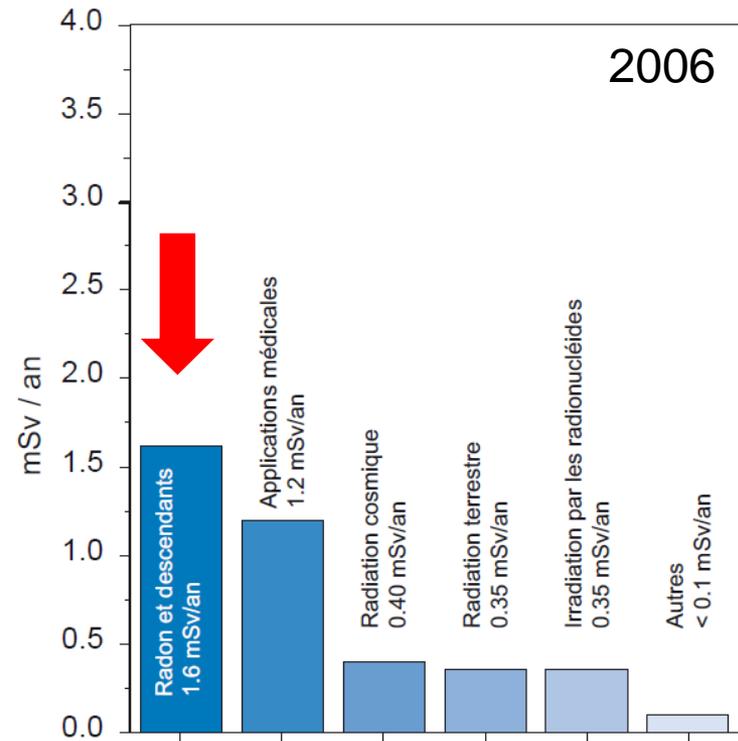
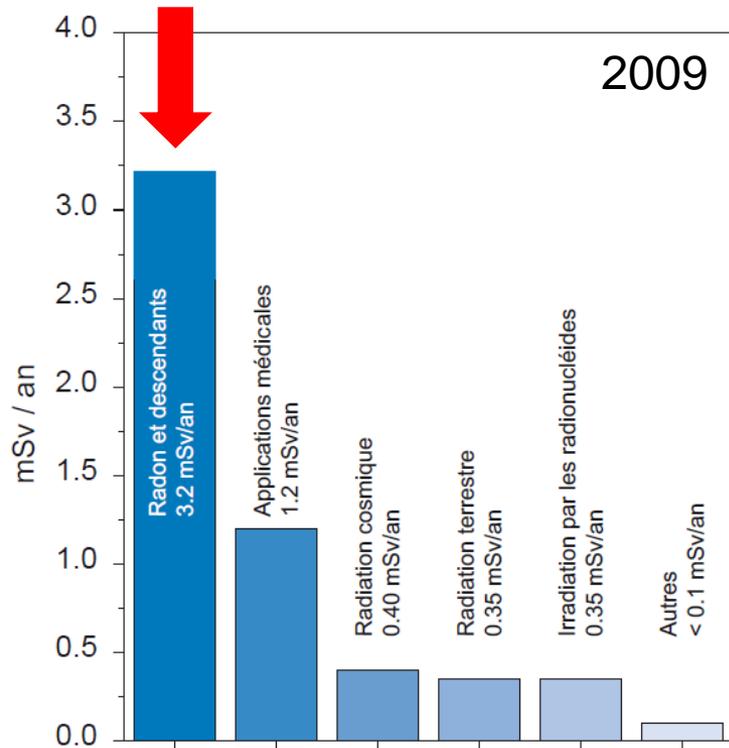


[Darby et al, BMJ 2005]

# Risque attribué au radon

Mesures en Suisse dans près de 110 000 bâtiments indiquent une moyenne arithmétique pondérée de **75 Bq/m<sup>3</sup> pour le radon-222**

Si l'on admet **un doublement du risque**, la dose d'irradiation annuelle moyenne de la population suisse due au radon double pour passer de 1.6 mSv/an à près de **3.2 mSv/an**



# Mesure du radon



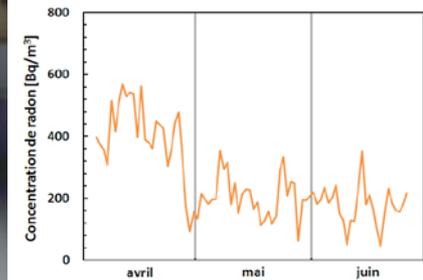
## Dosimètre

Une valeur intégrée pour toute la période de mesure (3 mois)



## Appareil de mesure du radon

Une valeur par intervalle de mesure (10 minutes) sur plusieurs jours



# Incorporation – par quelle voie ?

## Dans notre verre et notre assiette...

- **Il est impossible d'échapper à la radioactivité**, en respirant, en nous déplaçant et en mangeant.
- Tous nos aliments sont un peu radioactifs, car ils contiennent
  - des éléments comme du **carbone-14** et du **potassium-40**
  - des radionucléides naturels.
- **L'eau de source que nous buvons est radioactive** :
  - Elle a dissous des sels minéraux venant des roches rencontrées sur son chemin dont certaines contiennent des radioéléments
  - **Les eaux les plus radioactives proviennent des régions granitiques ou volcaniques** dont les roches renferment un peu d'uranium et de thorium accompagnés des éléments radioactifs de leur descendance
  - La radioactivité de l'eau est très variable.

# Approximation de la dose due à l'incorporation

Le « **panier de la ménagère** » varie énormément d'une région à une autre et d'autant plus d'un pays à un autre.

Il est donc **difficile de déterminer une dose moyenne** par incorporation de radionucléides.

Les calculs se basent donc sur les publications de l'UNSCEAR – et ne s'appliquent pas directement à une population donnée mais donne toute de même **un ordre de grandeur de la dose reçue via l'alimentation**.



# Radionucléides dans les aliments

## Repas mixte

– Nucléides observés :

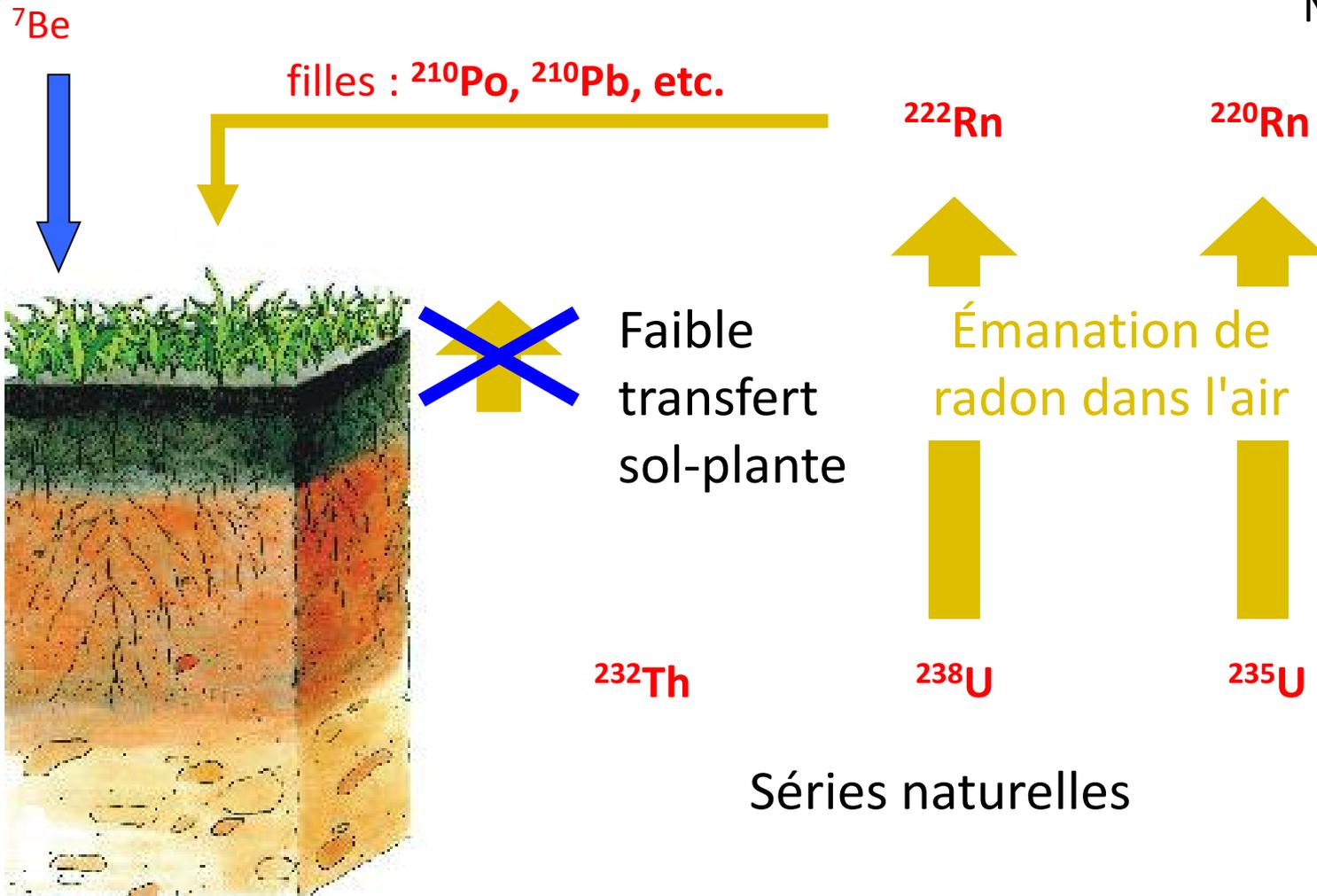
- $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$
- Grandes dépendances régionales

– Dose typique : **0.15 mSv/an**



# Contamination des aliments

NORM



# Radionucléides dans l'environnement

## Potassium $^{40}\text{K}$

- $T = 1.2 \times 10^9$  a
- présent à la formation de la Terre
- présent à 0.012% dans le potassium naturel

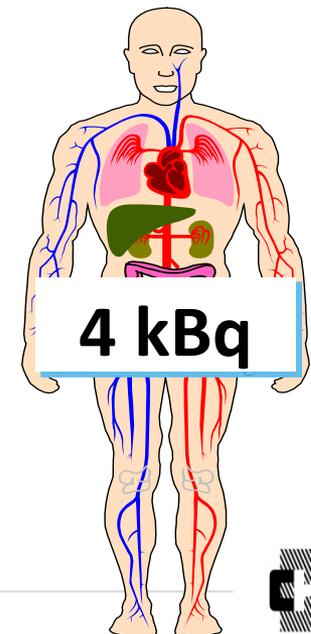


## Estimation de l'incorporation $^{40}\text{K}$ :

- L'apport journalier moyen de calcium est  $\sim 3.3\text{g}$   $\rightarrow 0.4\text{ mg } ^{40}\text{K} / \text{jour}$
- L'activité spécifique du  $^{40}\text{K} = 2.6 \times 10^5\text{ Bq/g}$   $\rightarrow \sim 100\text{ Bq} / \text{jour}$
- Se fixe principalement sur les tissus musculaires
- **Dose dû au  $^{40}\text{K}$  :  $\sim 0.2\text{ mSv} / \text{an}$**

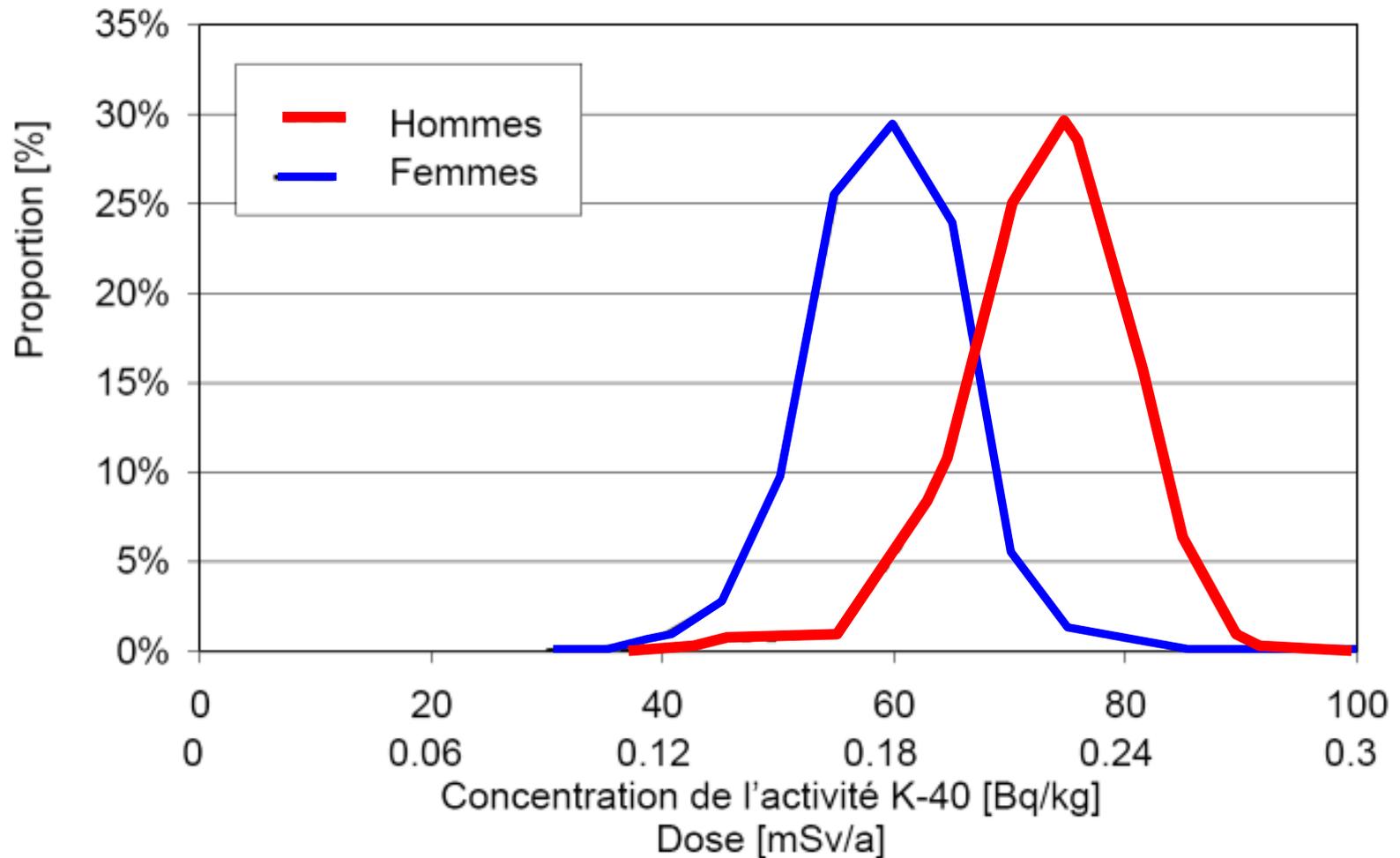


sol : 250-1000 Bq/kg



# Incorporation du potassium $^{40}\text{K}$

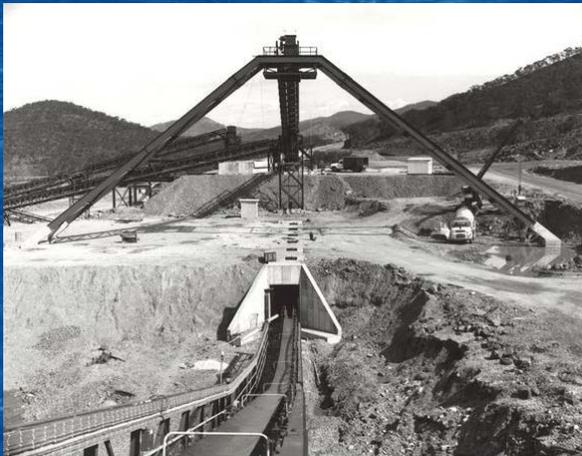
Mesures d'anthropogammamétrie entre 1973 et 2003 à Genève (étudiants)



# Radionucléides dans l'environnement

TENORM : Technologically enhanced NORM

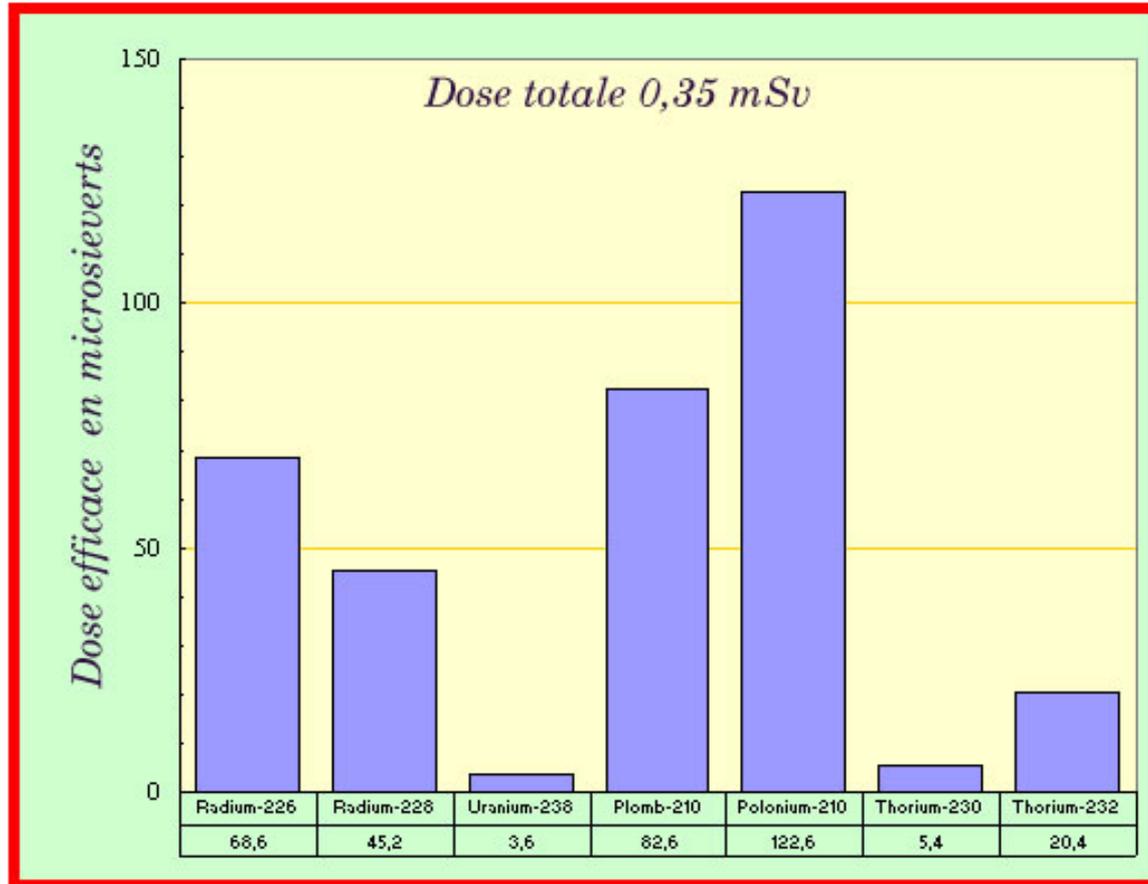
- Mines
- Traitement de l'uranium
- Industrie des phosphates
- Plateformes pétrolières



- $^{226}\text{Ra}$
- $^{210}\text{Pb}$
- $^{210}\text{Po}$

# Radionucléides dans l'eau

## Analyse d'une eau de source



Les eaux sont légèrement radioactives du fait d'éléments minéraux radioactifs des roches traversées dissous à l'état de traces. On a évalué ici, pour une eau de source, la dose d'exposition à la radioactivité, en supposant que cette eau était bue à raison d'un litre par jour et pendant un an. Comme cette analyse a été effectuée dans le cadre de la surveillance de l'alimentation et de l'eau de boisson, on a considéré la dose maximale, celle des nourrissons qui sont beaucoup plus sensibles que les adultes. Les contributions des radioéléments à la dose annuelle sont évaluées en millièmes de sieverts. (Source H. Vanmarcke)

©IN2P3

# Retombées des essais et accidents

## Essais nucléaires

Hémisphère nord

Max: années 60

- $^{90}\text{Sr}$  : xxx Bq/m<sup>2</sup>
- $^{137}\text{Cs}$  : 2500 Bq/m<sup>2</sup>
- Pu : 75 Bq/m<sup>2</sup>

## Tchernobyl

Forte dépendance météo

Avril 1986

- $^{131}\text{I}$  : phase nuage
- $^{137}\text{Cs}$  : 4500 Bq/m<sup>2</sup>  
(Tessin)
- Pu : 75 Bq/m<sup>2</sup>

# Retombées des essais et accidents

## Les principales sources de contamination radioactive

### L'IODE 131

Contamination à court terme lors de rejets dans l'atmosphère. **Élément très volatil et donc très mobile :**

Ingestion par l'animal et puis consommation éventuelle par l'homme.



Les éléments radioactifs dans l'atmosphère **retombent naturellement** ou sont **concentrés par la pluie** : contamination des cours d'eau puis des nappes phréatiques à plus long terme.

### LE CÉSIUM 137

Principale source de contamination de la chaîne alimentaire. **Peu mobile, il s'enfonce lentement dans le sol, où il est fixé par les minéraux.**

Dépôt au sol ou sur les feuilles de végétaux.

Forte concentration dans la chair des poissons.

Champignons et gibier très contaminés.

Captation par les racines.

Contamination par les feuilles, puis les racines.

### Les mesures au Japon, à proximité de la centrale de Fukushima :

Taux relevés par rapport aux normes fixées par le gouvernement japonais :

Contamination de l'océan :	Iode 131	Césium 137	Césium 134
	<b>126,7</b>	<b>16,5</b>	<b>24,8</b>
	fois plus élevé	fois plus élevé	fois plus élevé

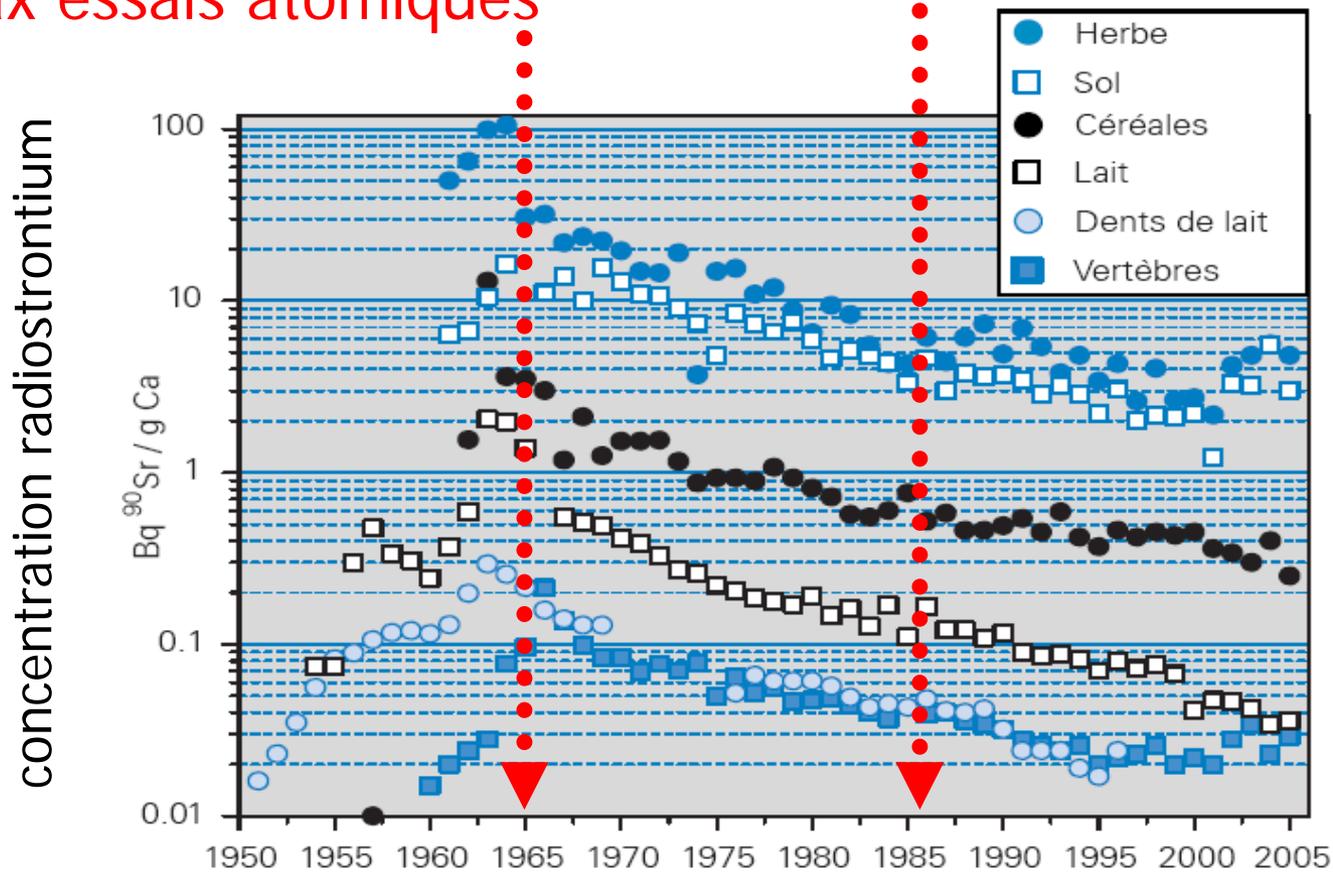
● Interdiction de la vente de lait, d'épinards et de kakina (légume japonais à feuilles vertes).

● Contamination à l'Iode 131 dans l'eau du robinet de nombreuses communes jusqu'à Tokyo.

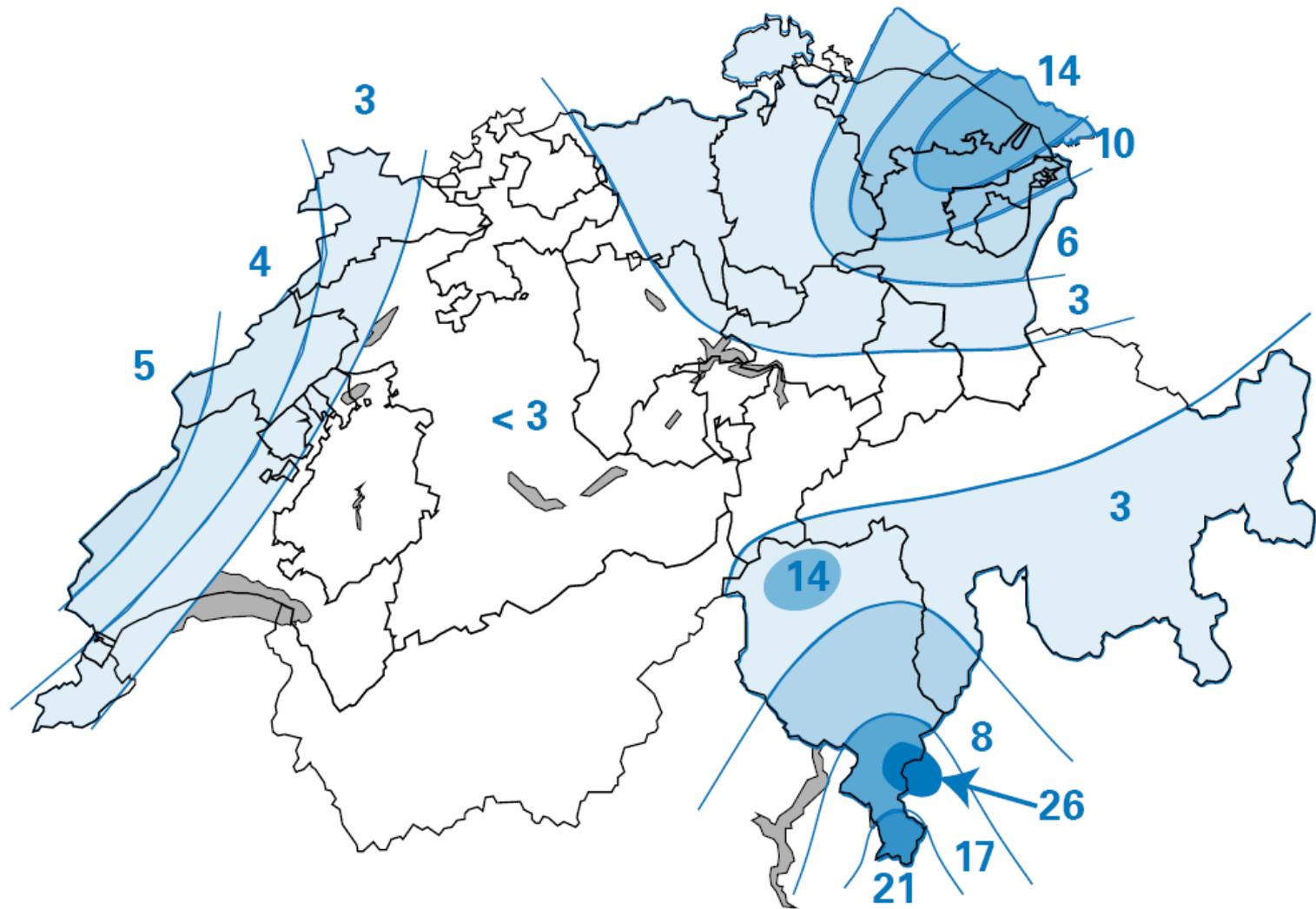
# Retombées des essais et accidents

max essais atomiques

Tchernobyl

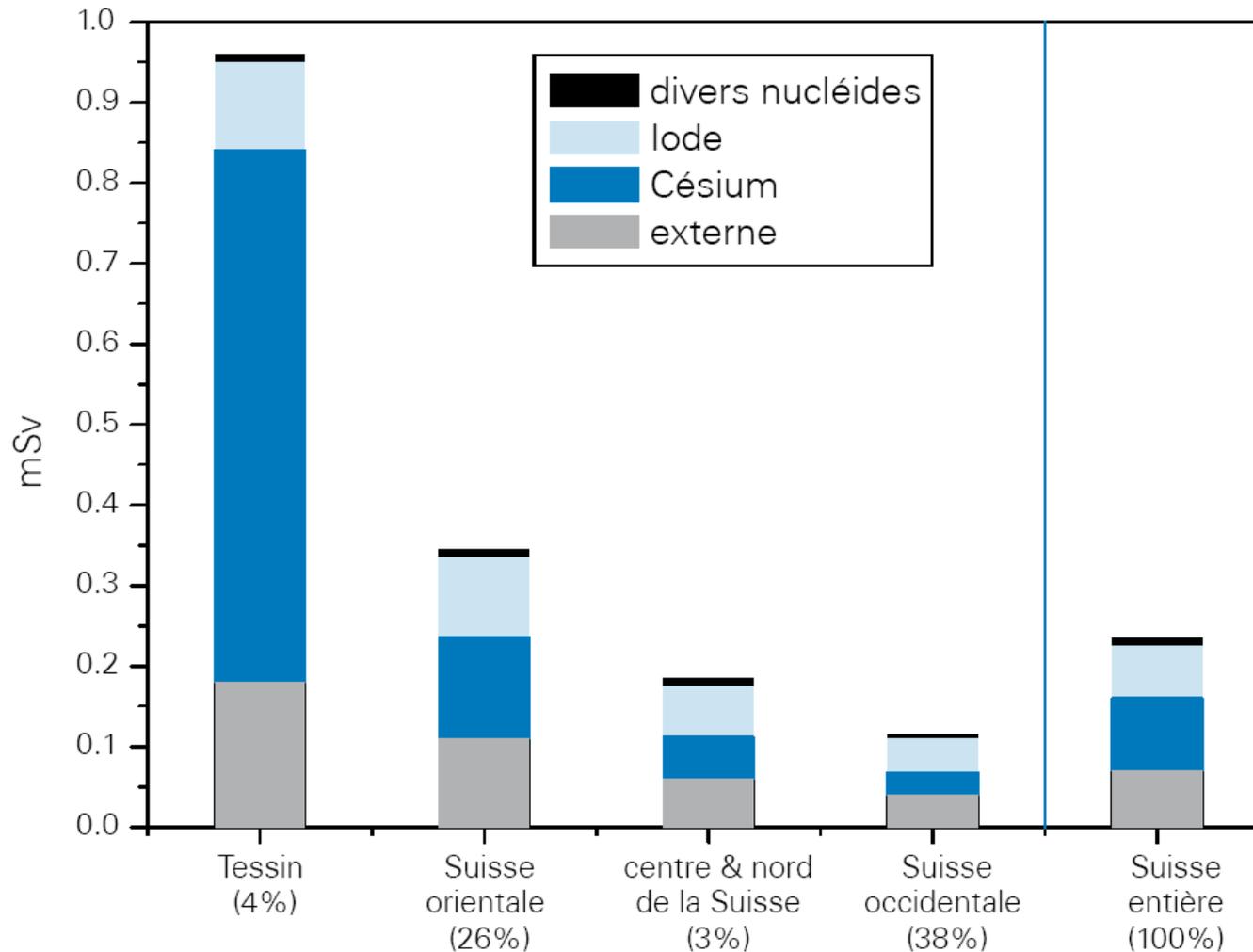


# Retombées des essais et accidents en Suisse



Tchernobyl: Déposition du  $^{137}\text{Cs}$  (kBq/m<sup>2</sup>)

# Retombées des essais et accidents : distribution des radionucléides en Suisse



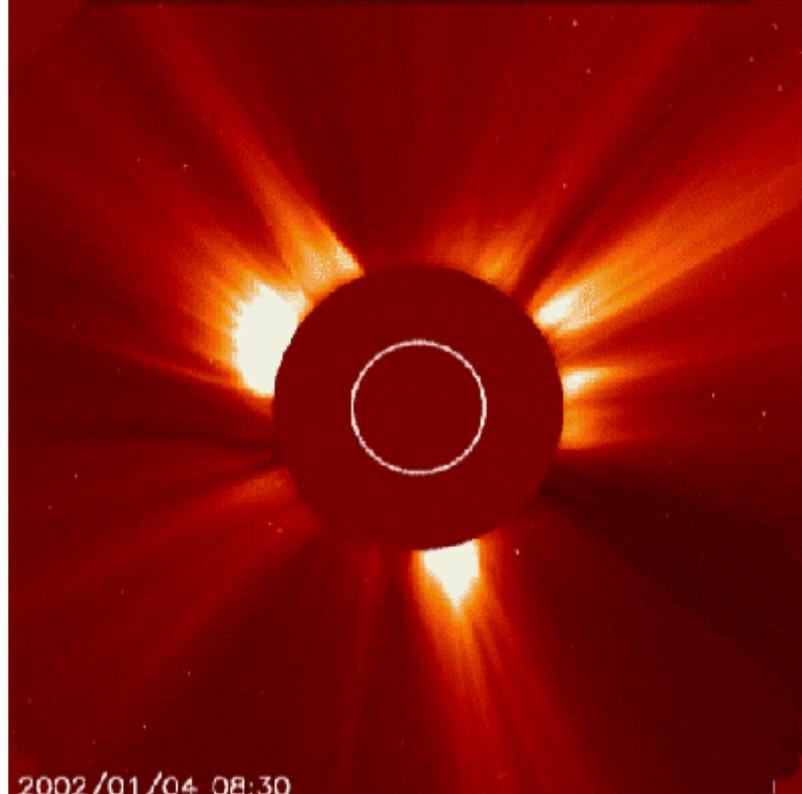
Au cours de la 1<sup>ère</sup> année qui a suivi l'accident

# Irradiation interne

Radionucléides	Dose moyenne [mSv par an]	Domaine de valeurs [mSv par an]
$^{40}\text{K}$	0.19	0.1 – 0.3
Chaînes de désintégration Uranium et Thorium	0.14	< 1
$^3\text{H}$ , $^7\text{Be}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{22}\text{Na}$ (cosmogènes)	0.01	< 0.2
$^{14}\text{C}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ (essais nucléaires et Tchernobyl)	0.002	0 – 0.01
Rejets radioactifs des entreprises	< 0.01	0 – 0.006
Total	0.34	0.1 – 0.5

Table 3.1 : Synthèse des doses effectives par incorporation sans le radon et les applications médicales

# Rayonnement cosmique une autre source de radiation



Spectacular Coronal Mass Ejection (CME) took off from the Sun in the early hours of January 4, starting off as a filament eruption seen by the Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) in the 195 E images. The complexity and structure of the CME as it passed through the Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) C2 and C3 fields of view amazed even experienced solar physicists at the SOHO operations center.

Credits: SOHO/LASCO (ESA & NASA)

# Rayonnement cosmique – l'origine

## Origine galactique

Provenance: Supernovae, pulsars, sursaut gamma, ...

Rayonnement est permanent et isotrope

noyau d'hydrogène (protons)	85%
noyau d'hélium (particules alpha)	12,5%
noyau d'atomes plus lourds	1%
électrons	1,5%

## Origine solaire

Provenance: activité du soleil (cycle + éruptions)

Solar Energetic particle SEP,  
Coronal Mass Ejection CME

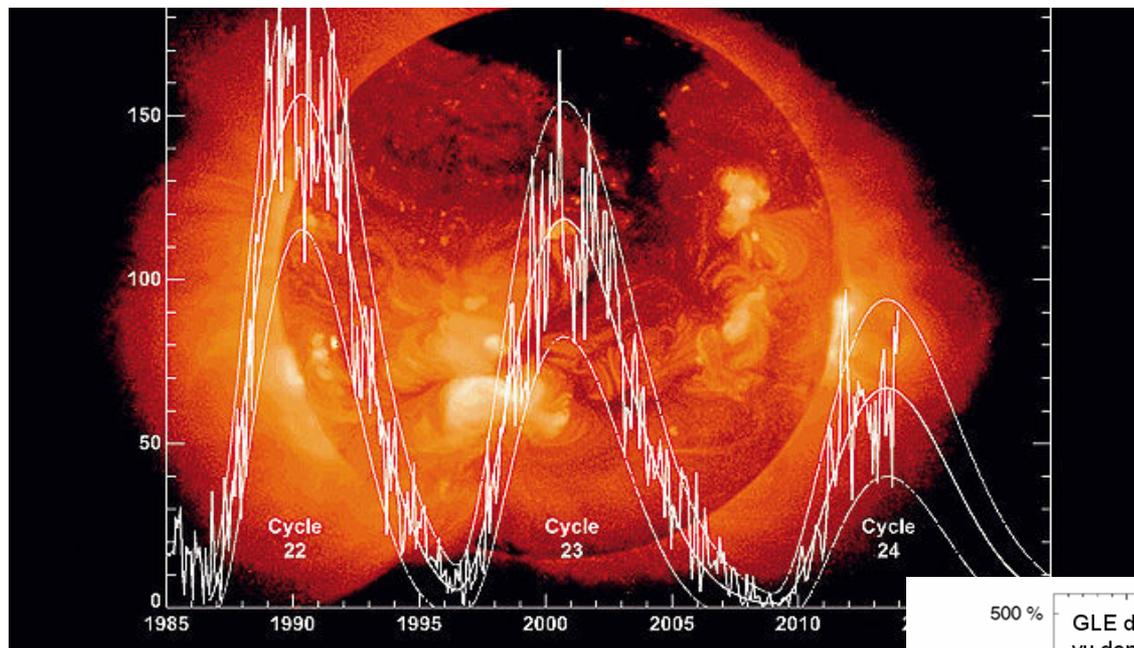
Rayonnement aléatoire et anisotrope

p, a, e... mais de plus faibles énergies (~GeV) que la  
composante galactique

Tab. : Caractéristiques des rayonnements extra-terrestres

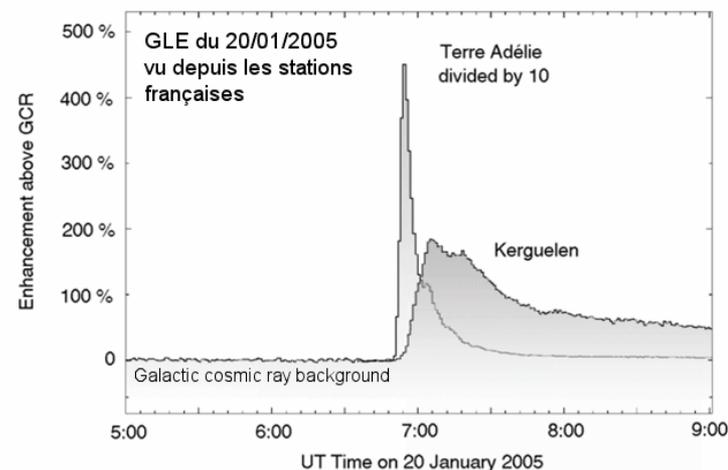
Rayons cosmiques	Particules solaires
Permanents	Sporadiques
Particules très énergétiques	Particules d'énergie moyenne
Isotrope	Anisotrope

# Rayonnement cosmique – origine solaire

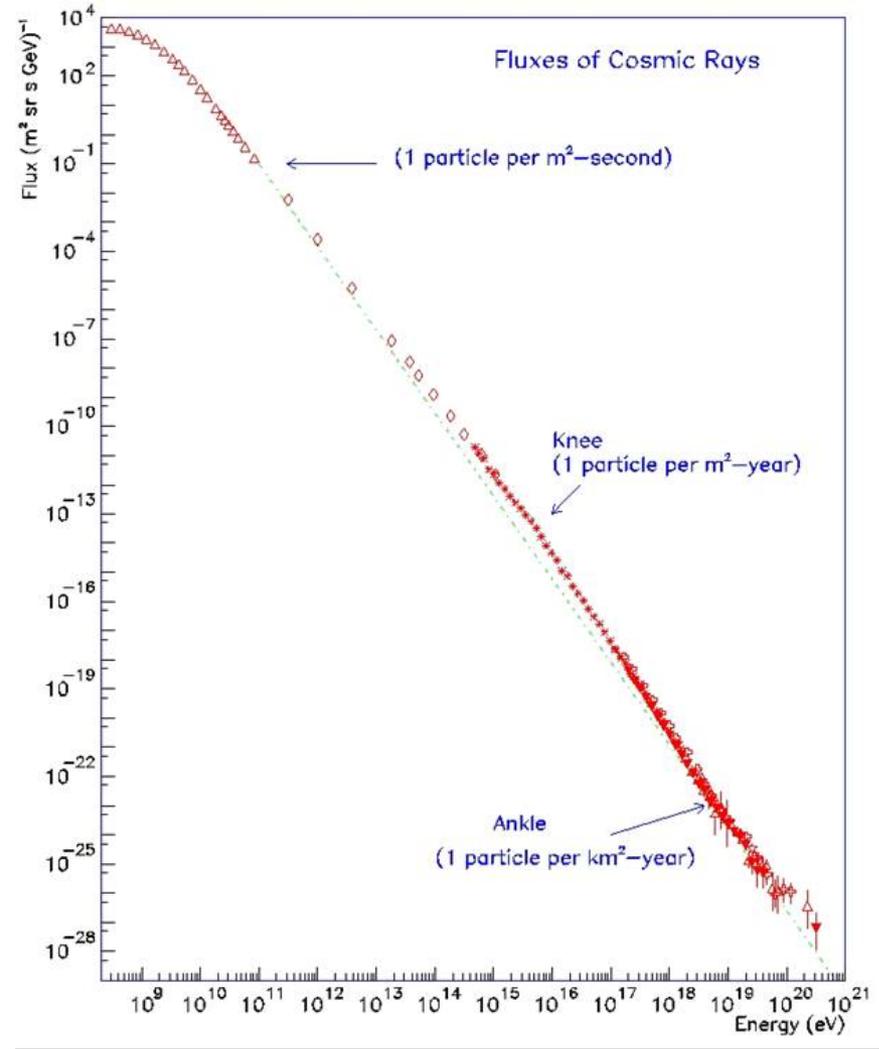
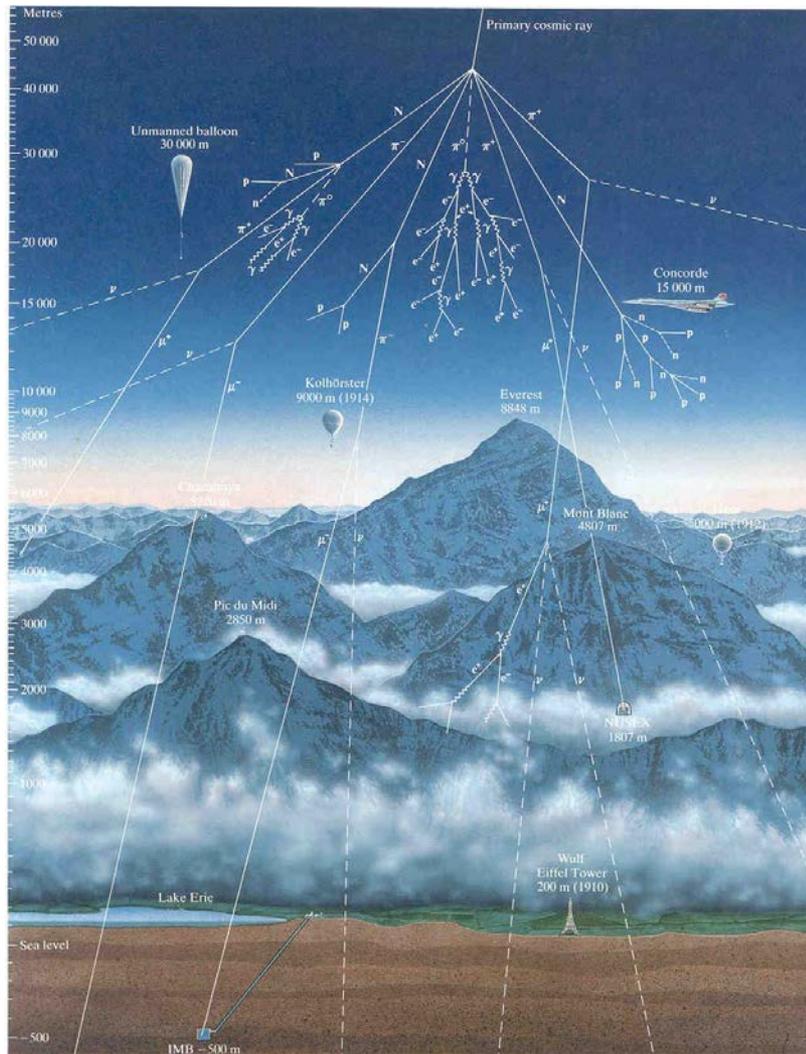


une augmentation du nombre de particules détectées : Ground Level Event, GLE (éruptions et éjections coronale de masse)

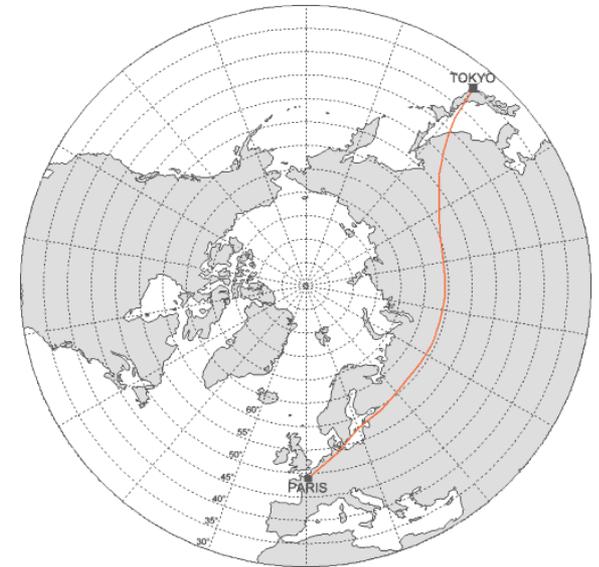
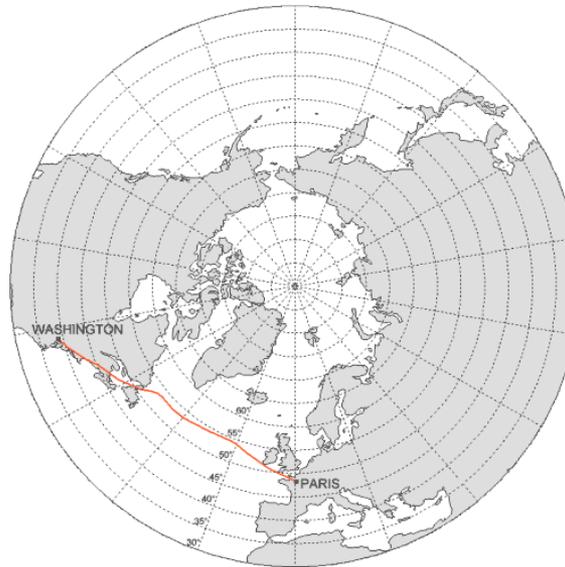
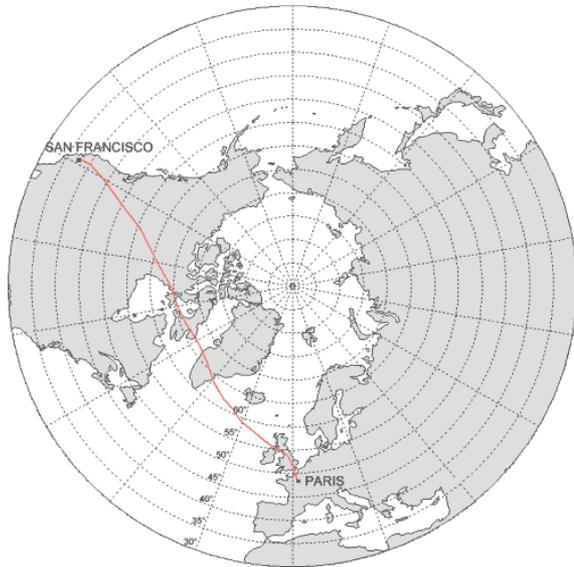
GLE69, du 20.01.2005 est l'un des plus importants impliquant plusieurs mécanismes d'accélération, dont une éjection coronale de masse.



# Rayonnement cosmique – origine galactique



# Rayonnement cosmique – dose pendant un vol



Février 2010 :

74 uSv

11h24

Doses prévues

Long courrier (nord)

43 uSv

7h41

Transatlantique

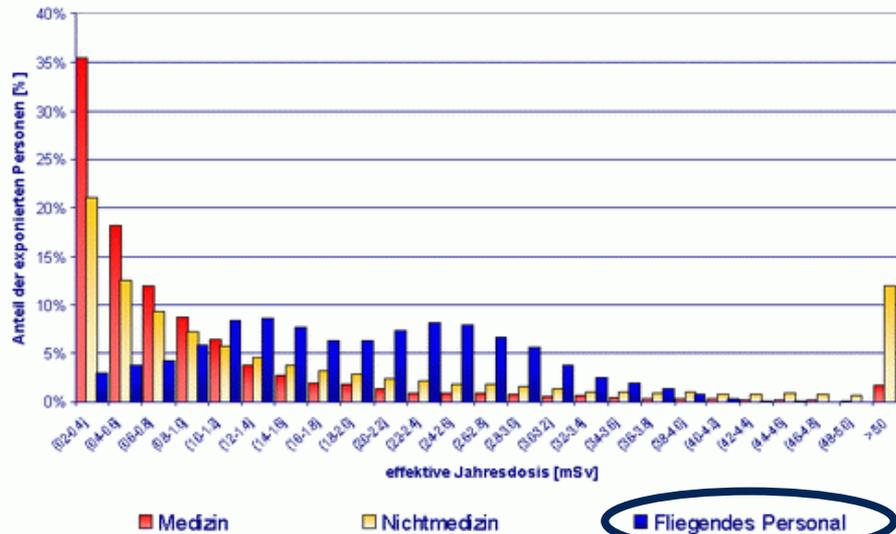
58uSv

11h38

Route

# Rayonnement cosmique – personnel navigant

Répartition de la dose annuelle des personnes professionnellement exposées dans divers domaines

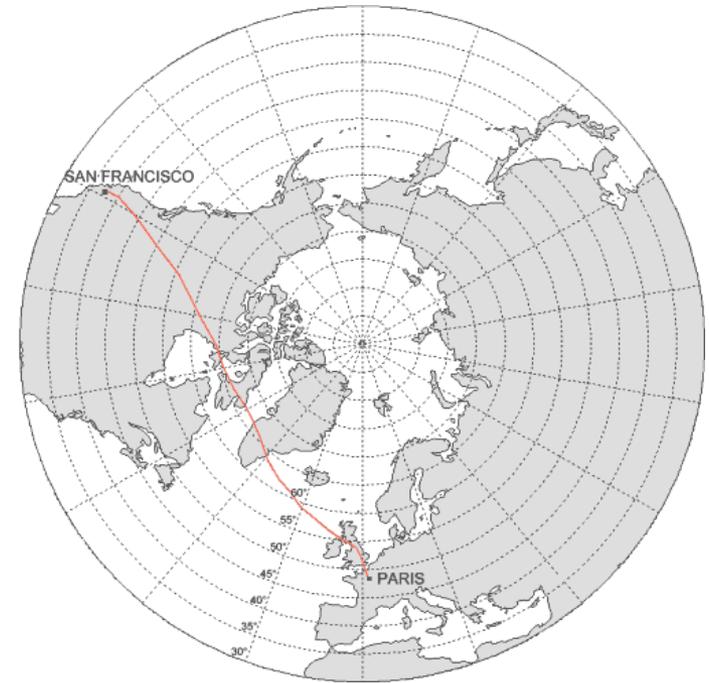


Länder	Personen	Betriebe	Kollektivdosis [Pers.-Sv]	arithm. Mittel [mSv]	Maximum [mSv]
Tschechische Republik	1.480	5	3,3	<b>2,2</b>	3,5
Deutschland	30.204	45	55,2	<b>1,8</b>	5,4
Dänemark	3.782	8	6,0	<b>1,6</b>	k.A.
Finnland	2.540	2	6,4	<b>2,5</b>	k.A.
Niederlande	12.140	2	16,0	<b>1,3</b>	< 6
UK	22.000	2	44,0	<b>2,0</b>	k.A.

\* Daten für das Jahr 2004 aus einer Umfrage bei den Teilnehmerländern am ESOREX-Projekt des BFS

GLE DATA : Public plots from Kerguelen and Terre Adelie

N°	DATE	KERG	TAD	N°	DATE	KERG	TAD
1	1942 Feb. 28			36	12 October 1981	9.4%	7.8%
2	1942 Mar. 07			37	26 November 1982	<5%	<5%
3	1946 Jul. 25			38	07 December 1982	56.2%	14.7%
4	1949 Nov. 19			39	16 February 1984	11%	6.5%
5	1956 Feb. 23			40	25 July 1989	<5%	<5%
6	1956 Aug. 31			41	16 August 1989	11.6%	15.5%
7	1959 Jul. 17	14.7%		42	29 September 1989	270.2%	272.8%
8	1960 May. 04	5.2%		43	19 October 1989	38%	50.5%
9	1960 Sep. 03	<5%		44	22 October 1989	17.6%	21.3%
10	1960 Nov. 12	102.8%		45	24 October 1989	93.4%	122.7%
11	1960 Nov. 15	57.8%		46	15 November 1989	<5%	12.5%
12	1960 Nov. 20	5.6%		47	21 May 1990	12.7%	8.2%
13	1961 Jul. 18	8.1%		48	24 May 1990	8.8%	17.3
14	1961 Jul. 20	<5%		49	26 May 1990	6.9%	6.1%
15	1966 Jul. 07	<5%		50	28 May 1990	5%	<5%
16	1967 Jan. 28 (1)			51	11 June 1991	9.2%	7.3%
17	1967 Jan. 28 (2)	14.7%		52	15 June 1991	27.6%	26.3%
18	1968 Sep. 29	<5%	<5%	53	25 June 1992	5.5%	5.4%
19	1968 Nov. 18	<5%	6%	54	02 November 1992	<5%	<5%
20	25 February 1969	<5%	<5%	55	06 November 1997	11.2%	10.6%
21	30 March 1969	5.6%	5.5%	56	02 May 1998	<5%	<5%
22	24 January 1971	9.9%	18.8%	57	06 May 1998	<5%	<5%
23	01 September 1971	13.4%	15.9%	58	24 August 1998	<5%	<5%
24	04 August 1972	5.9%	7.9%	59	14 July 2000	28.5%	26.9%
25	07 August 1972	<5%	5.7%	60	15 April 2001	48%	74.3%
26	29 April 1973	<5%	<5%	61	18 April 2001	10.6%	16%
27	30 April 1976	11.2%	6.2%	62	04 November 2001	<5%	<5%
28	19 September 1977	<5%		63	26 December 2001	6%	<5%
29	24 September 1977	6.9%		64	24 August 2002	<5%	<5%
30	22 November 1977	9.2%		65	28 October 2003	6.8%	26.8%
31	07 May 1978	214.2%		66	29 October 2003	8.2%	13.7%
32	23 September 1978	6.7%		67	02 November 2003	8.6%	14.2%
33	21 August 1979	<5%		68	17 January 2005	no increase	
34	10 April 1981	<5%		69	20 January 2005	178.4%	2649%
35	10 May 1981	<5%		70	13 December 2006	44.2%	22.8%



Seulement une fraction (~10%) des 70 GLE observés (en 64 ans), aurait pu conduire à une dose de plus de 1mSv pour un vol Paris-San Francisco (max ~4mSv GLE5, 1956)

← GLE 69 : +265%

# Rayonnement cosmique – les composantes

Le rayonnement cosmique possède une composante **ionisante** et une composante **neutronique**

## La composante ionisante :

- le débit de dose absorbée est égal à 32 nGy/h au niveau de la mer aux latitudes moyennes ou élevées
- essentiellement due aux muons pour lesquels le facteur de pondération de rayonnement est égal à 1
- le débit de dose efficace est égal à **32 nSv/h** au niveau de la mer aux latitudes moyennes ou élevées.

## La composante neutronique :

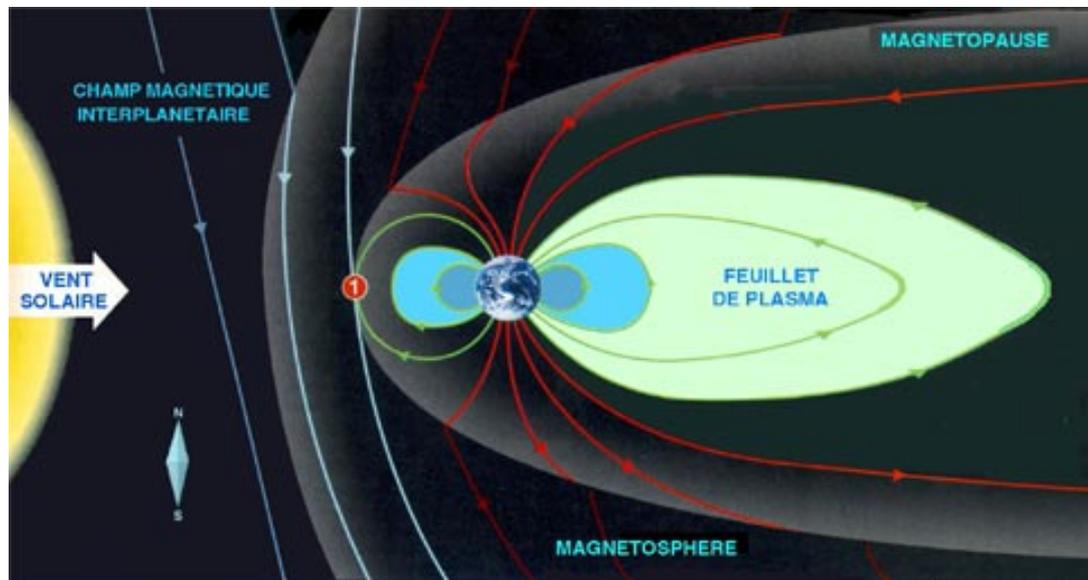
- la densité de flux des neutrons issus du rayonnement cosmique est difficile à mesurer
- large spectre d'énergie des neutrons (fractions d'eV à quelques dizaines de GeV).
- le débit de dose efficace moyen au niveau de la mer à 3.6 nSv/h (pour des pays situés à des latitudes moyennes (50°))
- les facteurs de pondération sont ceux recommandées par la CIPR 60
- le débit de dose efficace moyen est égal à **3.6 nSv/h** au niveau de la mer

# Rayonnement cosmique – les variations

## Variation de la composante cosmique

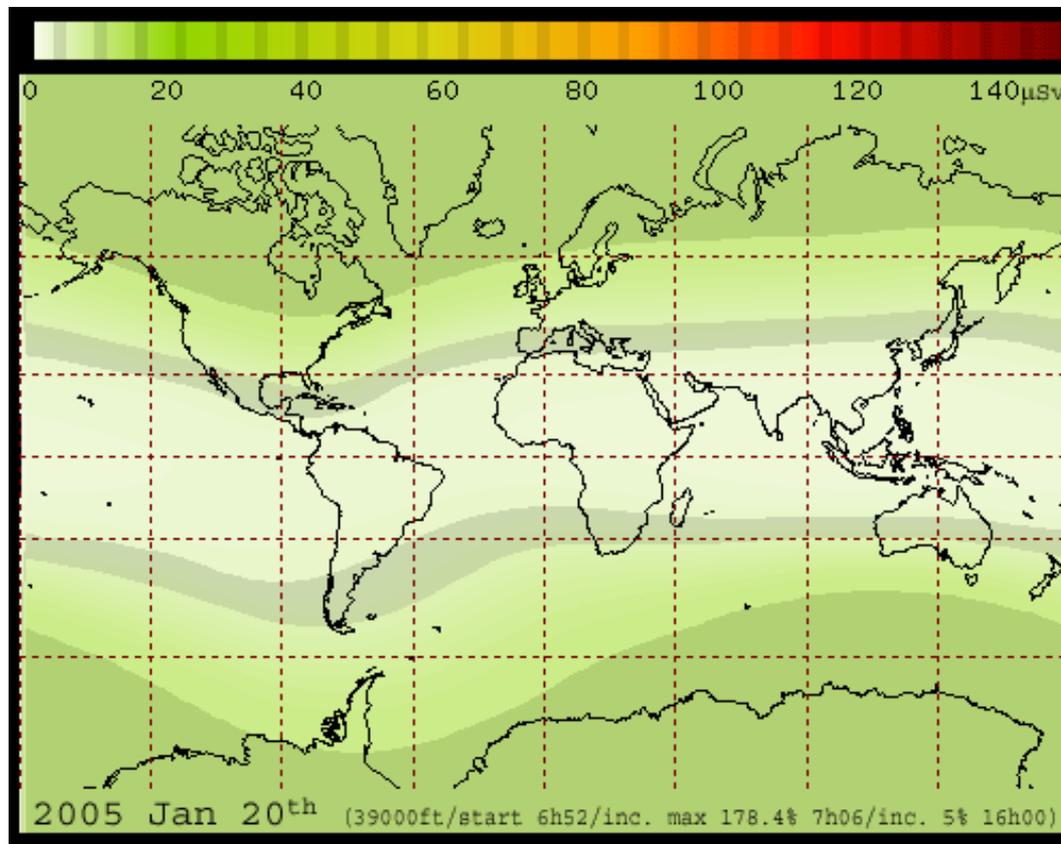
Paramètres à considérer :

- Altitude
- Latitude
- Mode de vie:
  - type d'habitat
  - temps passé à l'intérieur des bâtiments



# Rayonnement cosmique – latitude

Variation de la composante cosmique en fonction de la latitude exemple de l'estimation de la dose maximum de rayonnement reçue à 12 km d'altitude le 20 janvier 2005, lorsque se produisit une violente éruption solaire



# Rayonnement cosmique – en Suisse

La figure 4.1 résume ces contributions du point de vue de la dose effective et de la fraction de la population qui réside en Suisse, en fonction des différentes classes d'altitude.

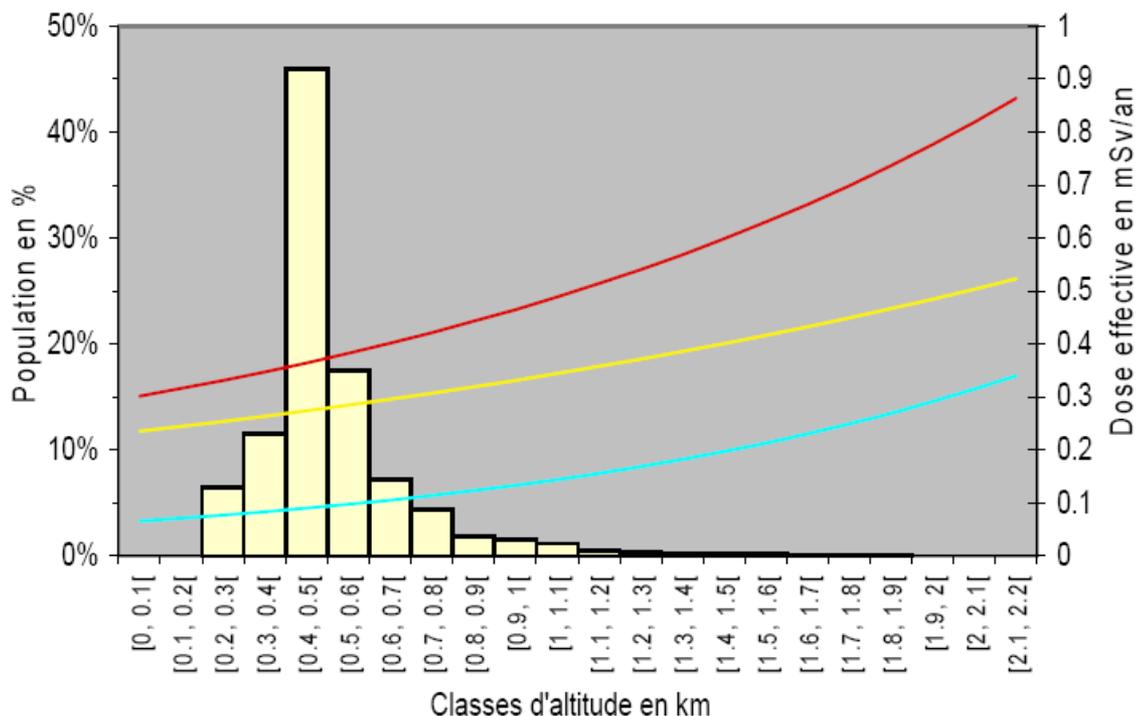


Figure 4.1 : Altitude, population et dose effective

On distingue la dose effective provenant de la part neutronique (courbe inférieure) de la part des particules chargées et des photons (courbe intermédiaire) et de la somme de ces deux contributions (courbe supérieure), en fonction de l'altitude ainsi que de la proportion d'habitants en pour-cent dans les différentes classes d'altitude.

# Rayonnement cosmique particules chargées et photons

Dose provenant des particules chargées et des photons :

- Le **facteur moyen d'atténuation** pour dériver le débit de dose à l'intérieur par rapport à celui en plein air est égal à **0.8** ; réduction de 20 %.
- Le **facteur moyen de temps** de séjour à l'intérieur est égal à **80 %**.
- L'expression analytique suivante a été utilisée pour approximer la **dépendance de la composante des particules chargées et des photons** entre 0 et 2'000 m :

$$E(z) = E(0) \cdot e^{0.38 \cdot z}$$

Z représente l'altitude exprimée en km et **E(0) = 0.24 mSv/an** correspond à la dose effective annuelle due aux particules chargées et aux photons au niveau de la mer pour 20 % du temps passé en plein air et un facteur d'atténuation à l'intérieur de 20 %.

**À 2 km d'altitude :  $E_{p, \gamma} = 0.51 \text{ mSv/an}$**

# Rayonnement cosmique neutrons

Dose provenant des neutrons:

- **varie fortement avec l'altitude mais également avec la latitude** (facteur 2 entre l'équateur (min) et les pôles (max))
- contrairement à la composante des particules chargées et des photons, il existe peu de mesures pour la composante neutronique au niveau du sol en Suisse
- mesures effectuées à Neuherberg, Zugspitze et à Milan.
- l'expression analytique suivante a été utilisée pour approximer **la composante neutronique** entre 0 et 2'000 m :

$$E_n(z) = E_n(0) \cdot e^{0.78 \cdot z}$$

Z représente l'altitude exprimée en km et  **$E_n(0) = 0.066 \text{ mSv/an}$**  correspond à la dose effective due aux neutrons au niveau de la mer pour 20 % du temps passé en plein air et un facteur d'atténuation à l'intérieur de 20 %.

**À 2 km d'altitude :  $E_n = 0.31 \text{ mSv/an}$**

# Rayonnement cosmique – dose moyenne

La distribution qui en résulte pour la population suisse est représentée dans la figure 4.3. Elle indique une valeur moyenne de 0.38 mSv/an (médiane 0.36 mSv/an). On constate que la dose effective annuelle est comprise entre 0.3 et 0.5 mSv/an pour plus de 95 % de la population. L'incertitude sur cette moyenne est estimée à + 20 %.

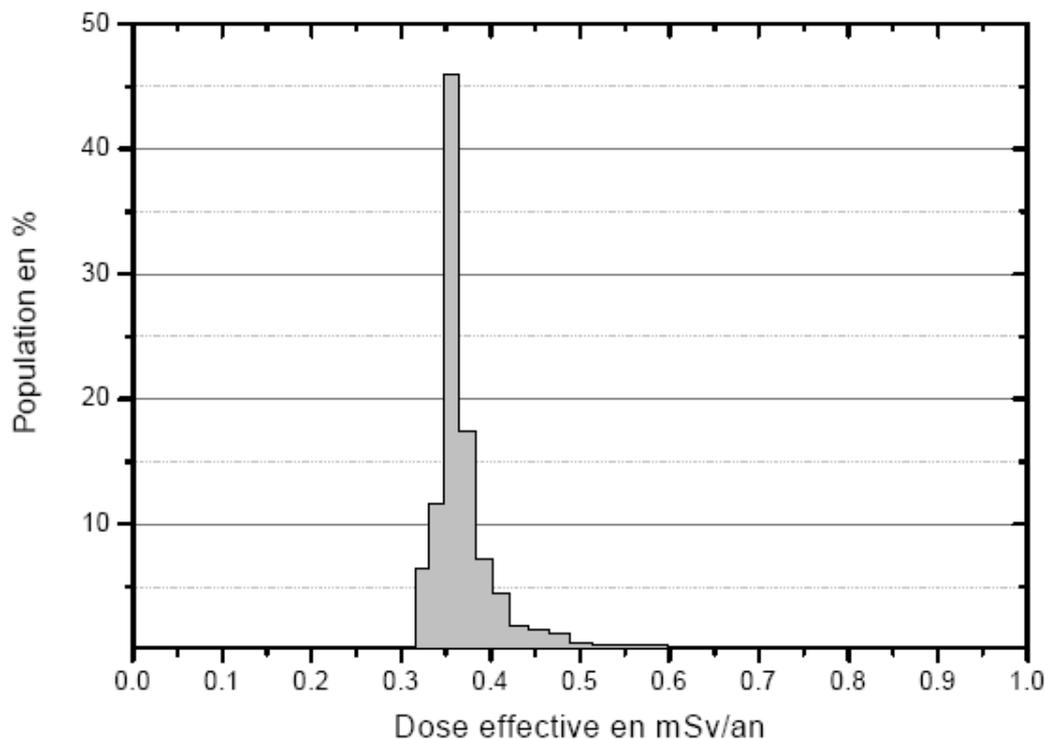
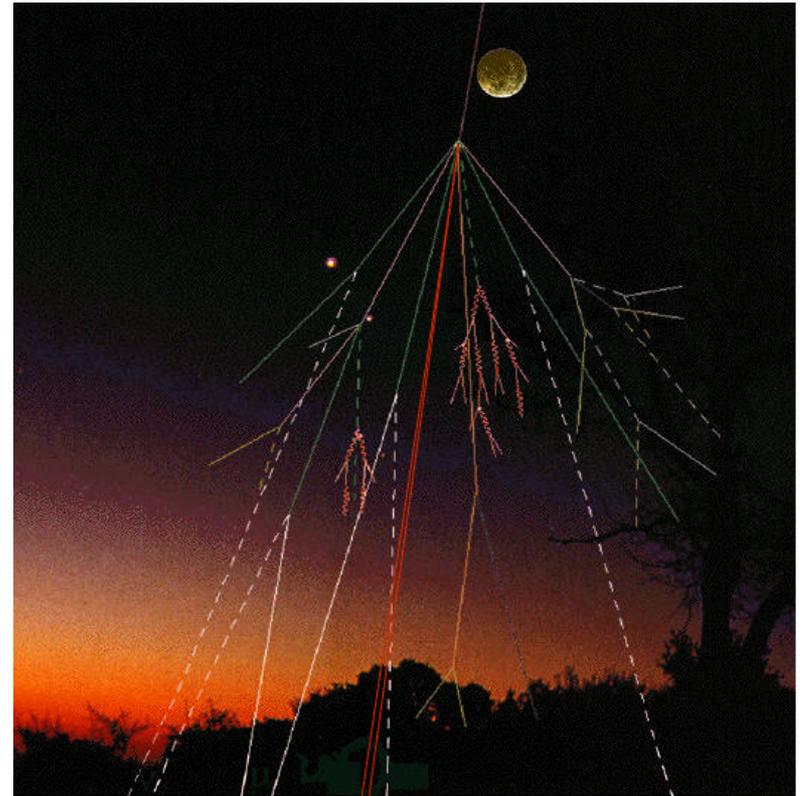
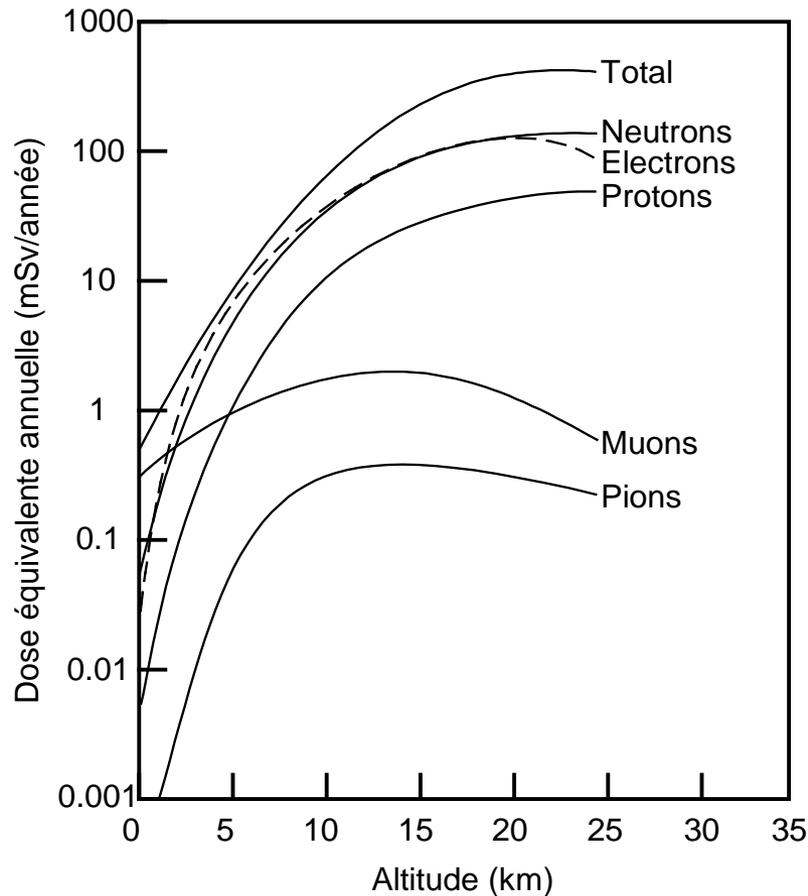


Figure 4.3 : Distribution de la dose effective associée au rayonnement cosmique pour la population suisse.

# Rayonnement cosmique



**vol aller-retour Genève – New-York**  
**+ 0.10 mSv**

(voir <http://www.sievert-system.org>)

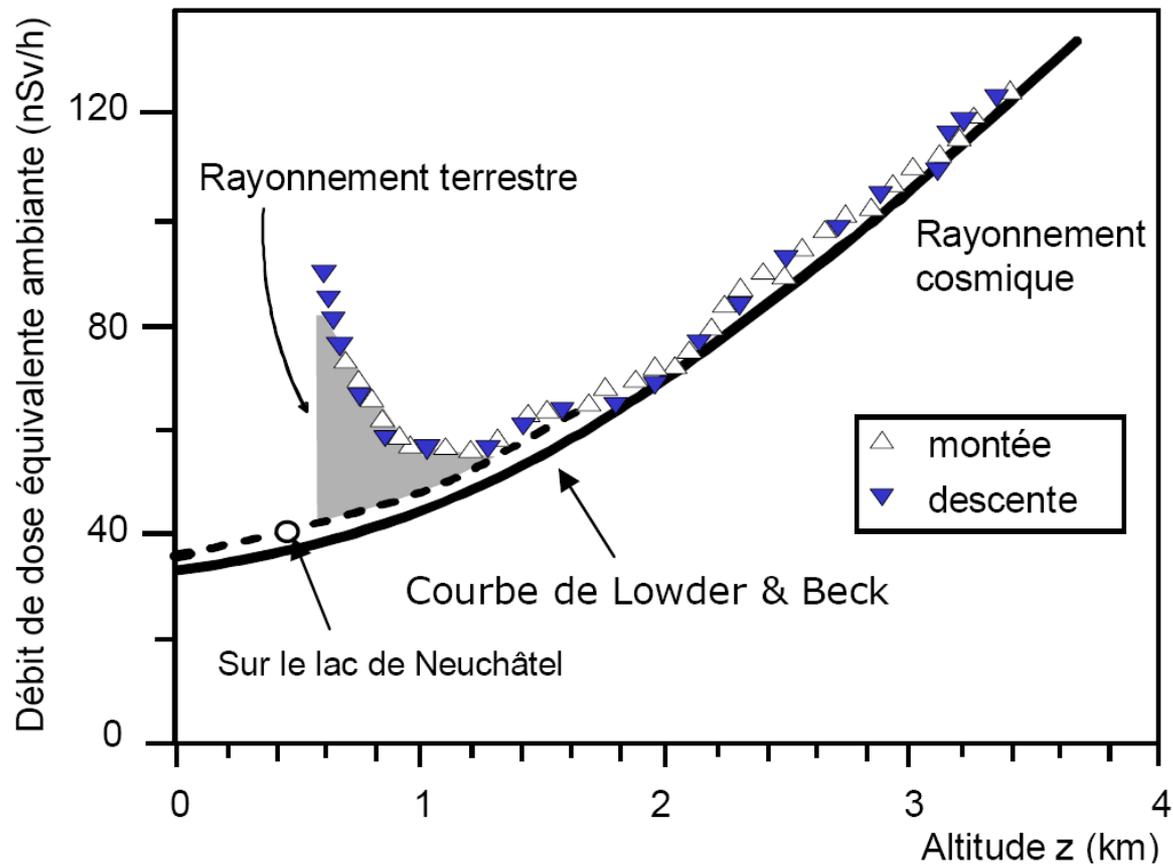
# Isotopes cosmogéniques

Isotope	Période (ans)	Inventaire		Désintégration Mode, énergie $\beta$ maximale
		Global (PBq)	mBq/m <sup>3</sup>	
Carbone-14	5310	12 750	56,3	$\beta^-$ (156 keV)
Tritium	12,3	1273	1,4	$\beta^-$ (18,6 keV)
Beryllium-7	53,3 j	413	12,5	Capture électronique, $\gamma$
Beryllium-10	1 510 000	230	0,15	$\beta^-$ (555 keV)
Argon-39	269	27	6,5	$\beta^-$ (565 keV)

- Le carbone-14 et le tritium sont le principaux éléments **générés par le rayonnement cosmique**.
- L'**inventaire** correspond à l'activité totale dans l'atmosphère estimée **à l'échelle de la Terre**.
- Une partie du carbone-14 est **absorbée par les plantes** et pour le tritium dans **l'eau**.

# Rayonnement terrestre

$^{40}\text{K}$  ,  $^{238}\text{U}$  + descendants,  $^{232}\text{Th}$  + descendants



# Composantes terrestres – isotopes

Estimation de l'exposition :

- Environ 600 mesures de **spectrométrie  $\gamma$**  in-situ sur tout le territoire suisse
- Mesures donnent les concentrations **dans le sol...**
  - des filles des deux chaînes de désintégration naturelle de l'uranium (**U-238**) et du thorium (**Th-232**)
  - du **K-40**
- Calcul du kerma dans l'air à une hauteur de 1 m au-dessus du sol
  - A partir de ces concentrations...
  - Et les facteurs de conversion de l'activité dans le sol en kerma dans l'air (UNSCEAR-2000)

Isotope(s)	Facteur de conversion de l'activité dans le sol en kerma dans l'air
$^{238}\text{U}$ + descendants	0.46
$^{232}\text{Th}$ + descendants	0.60
$^{40}\text{K}$	0.042

Table 5.1 : Facteurs de conversions en nGy/h par Bq/kg

# Composantes terrestres – dose

## 5.3 Valeurs moyennes et distributions

Les résultats des mesures in situ effectuées ces dernières années sont regroupées dans la table 5.2. Pour les doses effectives, on a considéré que les personnes passaient le 80 % de leur temps à l'intérieur des bâtiments. On obtient alors une moyenne de dose effective, pondérée selon le volume de population, se montant à 0.35 mSv par an. La valeur médiane est quelque peu inférieure du fait de la légère asymétrie de la distribution ; elle se monte à 0.32 mSv par an. On constate que la valeur du kerma en plein air est presque égale à celle de la dose effective totale (y compris séjour à l'intérieur) ; on obtient, en effet :  $0.75 \cdot (1.4 \cdot 0.8 + 0.2) = 0.99$ .

Canton	Habitants x1000	$E_{\text{terr}}$ [mSv/a]	Canton	Habitants x1000	$E_{\text{terr}}$ [mSv/a]
AG	508	0.32	NW	33	0.35
AI	14	0.40	OW	29	0.35
AR	52	0.40	SG	428	0.40
BE	958	0.32	SH	72	0.32
BL	233	0.35	SO	232	0.32
BS	199	0.35	SZ	112	0.35
FR	214	0.32	TG	209	0.32
GE	379	0.36	TI	282	0.50
GL	39	0.35	UR	34	0.35
GR	174	0.45	VD	602	0.36
JU	66	0.33	VS	250	0.38
LU	326	0.35	ZG	86	0.32
NE	164	0.30	ZH	1'179	0.32
<b>Moyenne pondérée pour toute la Suisse [mSv/a] :</b>					<b>0.35</b>

Table 5.2 : Aperçu des résultats des mesures in situ

# Composantes terrestres – distribution de dose

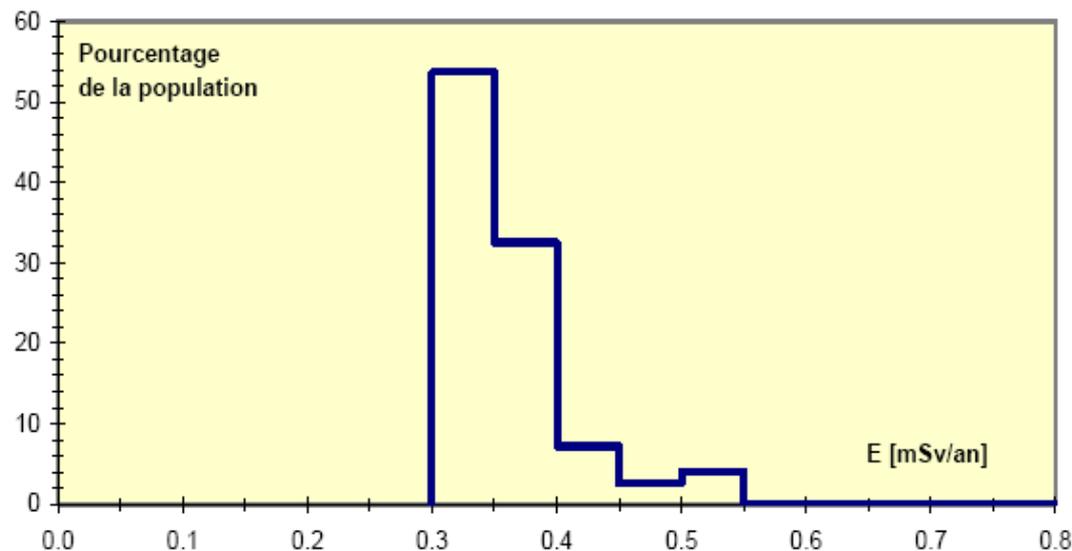


Figure 5.1 : Distribution de la dose effective  $E$  [mSv/an] due à la composante terrestre, calculée à partir des mesures in situ effectuées entre 1986 et 2000 (en tenant compte du temps passé à l'intérieur) ; source : [4]

Kerma dans l'air [mGy/an]		Dose effective [mSv/an]		
à l'extérieur	à l'intérieur	80 % $t_{\text{indoor}}$ , 20 % $t_{\text{outdoor}}$	moyenne	médiane
0.35	0.49	0.46	0.35	0.32

Tableau 5.3 : Dose moyenne en Suisse des composantes terrestres

# Applications médicales

**RAD+DOSE**

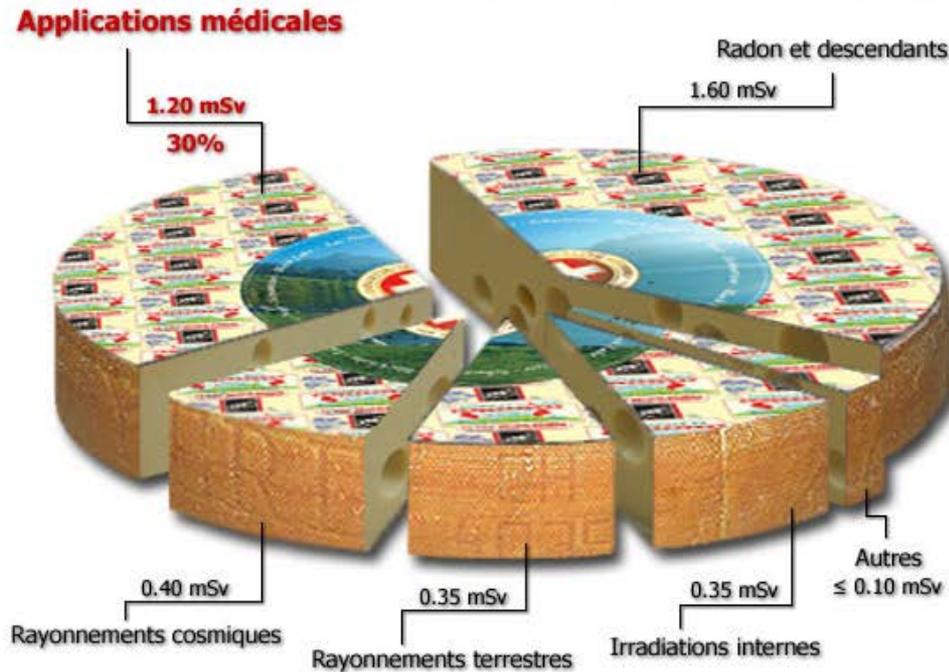


Radiologie Diagnostique et Interventionnelle

Médecine Nucléaire

Deutsch | Français | Italiano | English

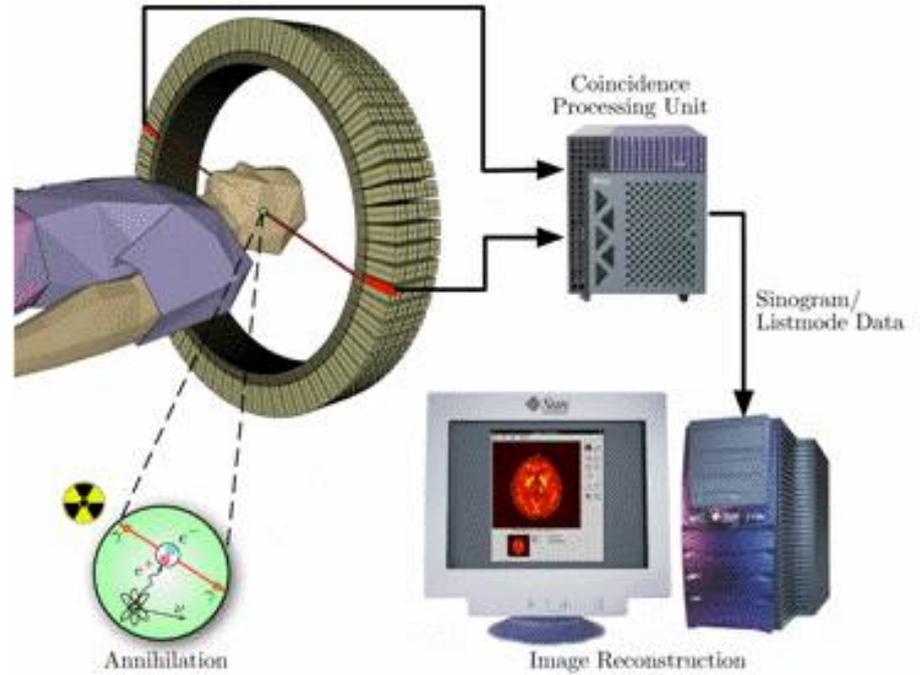
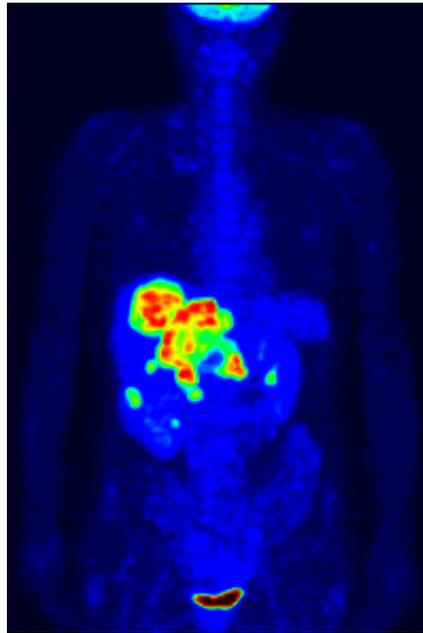
*En Suisse la dose moyenne à la population due à l'irradiation médicale représente la part la plus importante de l'irradiation artificielle et environ le quart de la dose totale reçue par la population et qui est de 4 millisievert (mSv) par an et par personne.*



## **DOSES MOYENNES REÇUES PAR LA POPULATION SUISSE**

*( par an et par personne ) - Source: Office fédéral de la santé publique OFSP*

# Applications médicales



# Applications médicales

L'irradiation de la population à des fins médicales, diagnostiques et thérapeutiques :

- Constitue **la contribution la plus importante** de l'irradiation artificielle
- Particularités: délibérée/volontaire et contrôlée

Le jugement sur cette irradiation doit ainsi prendre en compte :

- Le **bénéfice individuel important pour le patient**
- Législation : **aucune limite de dose au patient** dans le cadre des applications médicales (art. 15 de LRaP)
- L'application des principes de justification, indication de l'examen, et d'optimisation, réalisation de l'examen avec la dose la plus faible possible, assure la protection du patient.

# Applications médicales

## Scopie



### Diagnostic par rayons X

- Radiographie
  - la plus importante source d'irradiation médicale
- Radiologie interventionnelle
  - utiliser en angiographie pour intervenir localement (pose de stent...)
  - forme récente d'utilisation des Rx
  - vaisseaux sanguins ne sont pas visibles en cliché Rx  $\Rightarrow$  Produits de contraste
  - examen invasif

### En fort développement

- avantages: cette technique est une **alternative à une opération** par une intervention **peu invasive** et souvent ambulatoire
- inconvénients: **doses relativement élevées**  $\Rightarrow$  risque stochastique important, voire dépassement du seuil des effets déterministes sur la peau (brûlure, nécrose)

# Applications médicales

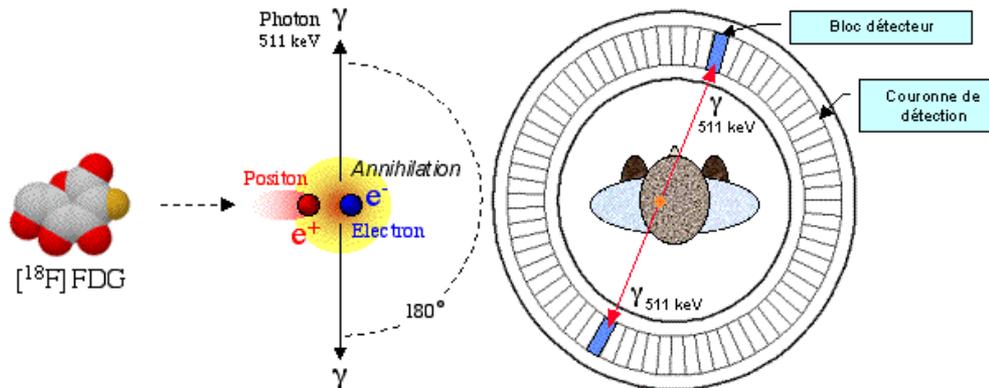
## Med. Nuc.

The radiotracer, injected into a vein, emits gamma radiation as it decays. A gamma camera scans the radiation area and creates an image.



### Diagnostic:

- administration de produits radio-pharmaceutiques
- scintigraphie – émetteurs gamma (imagerie par gamma caméra)
- TEP – Tomographie par émission de positrons



Les doses sont du même ordre de grandeur que celles en radiodiagnostic *classique*, mais le **nombre d'examen en médecine nucléaire est beaucoup plus faible**

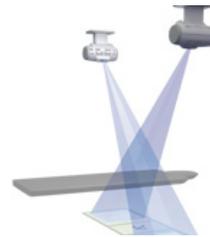
### Thérapie (oncologie)

- **La fréquence de ces traitements est encore limitée, mais est en augmentation.**
- Les doses sont relativement élevées (problématique de calcul de doses)

# Applications médicales

## Radiothérapie

- Objectif: destruction des cellules tumorales par rayonnements ionisants ( $\gamma$ , e)
- Problématique:
  - **irradiation des tissus sains proche de la tumeur**
  - **doses élevées!**
  - risque radiologique: cancers radio-induits
- Irradiateur:
  - au Cobalt
  - Accélérateurs linéaires
  - Tomothérapie
  - Curiethérapie
  - Gamma-knife (en français: *couteau gamma* ou *scalpel gamma*)
  - Cyber-knife



# Applications médicales

## Détermination des doses

La **détermination des doses** reçues par la population dans le cadre des applications médicales se fait **sur la base d'enquêtes**, en prenant en compte:

- Le type d'examen
- La fréquence de l'examen considéré
- La dose associée

⇒ L'analyse de ces données conduit à une **dose collective**, et par division par le nombre d'habitants à une dose moyenne par habitant

⇒ Remarque: Une grande partie de la population n'aura aucun examen/traitement

Discussion sur la manière d'estimer la dose moyenne, mais celle-ci reste un bon indicateur du risque radiologique pour l'ensemble de la population d'un pays donné

# Applications médicales

## « limite de dose »

### RX

Nombreuses données et suivi dans les grands centres en Suisse

### Projet OSUR

(Optimisation de la radioprotection lors des examens à dose intensive en radiologie)

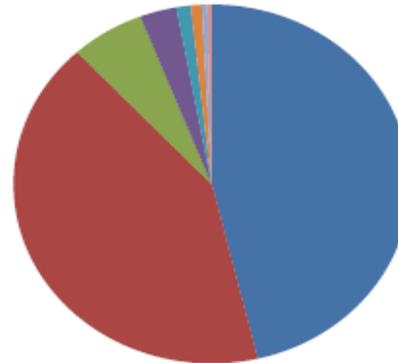
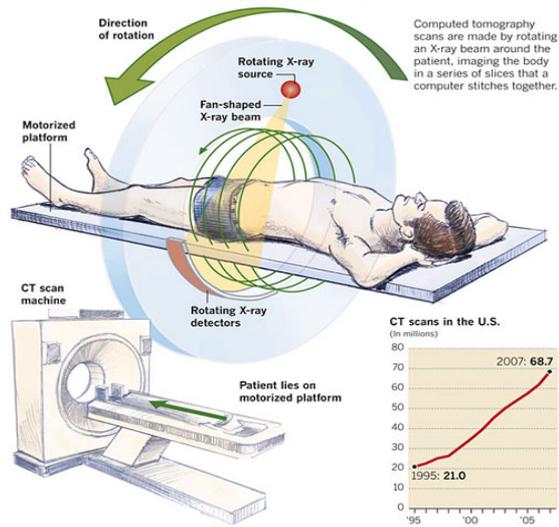
- développer le concept des **niveaux de référence diagnostique** (NRD)
- pour les examens de:
  - **radiologie diagnostique** à dose de rayonnements élevés (fluoroscopie, tomodensitométrie)
  - **cardiologie**
  - **médecine nucléaire**
- mettre en œuvre, en collaboration avec les utilisateurs
- L'OFSP poursuit la concrétisation du projet



# Applications médicales distribution de dose

## Anatomy of a CT scan

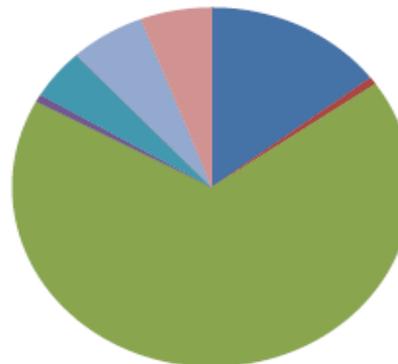
CT scanners give doctors a 3-D view of the body. The images are exquisitely detailed but require a dose of radiation that can be 100 times that of a standard X-ray.



- RA (46%)
- DR (42%)
- CT (6.0%)
- MA (3.0%)
- FL (1.2%)
- BD (0.9%)
- ID (0.4%)
- IT (0.4%)



dentaire  
CT



- RA (14.6%)
- DR (0.7%)
- CT (68%)
- MA (0.7%)
- FL (4.6%)
- BD (0.003%)
- ID (6.1%)
- IT (5.8%)



dentaire  
CT

**Figure 2:** Distribution of the total annual number of examinations (upper part) and the total annual collective dose (lower part) over the various radiological modalities: radiography (RA), conventional fluoroscopy (FL), diagnostic interventional radiology (ID), therapeutic interventional radiology (IT), computed tomography (CT), dental radiology (DR), mammography (MA), bone densitometry (BD).

# Applications médicales – distribution de dose

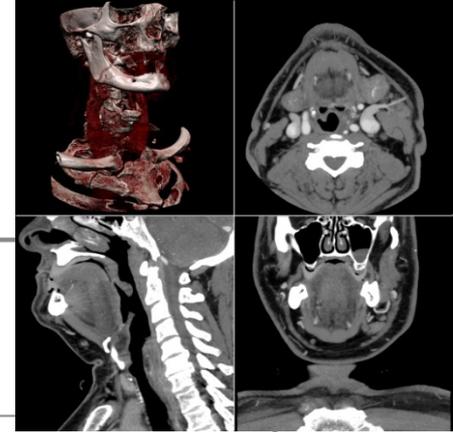
La dose moyenne globale due aux applications médicales, à l'exception de la radio-oncologie, s'établit à 1.04 mSv/an. L'incertitude sur cette moyenne est estimée à  $\pm 20\%$ . La répartition de cette dose moyenne sur les diverses modalités est donnée dans la table 6.1.

Modalité	Dose moyenne par modalité (mSv/an)	Dose moyenne par domaine (mSv/an)	
Diagnostic aux rayons X		1.0	
- radiographie	0.41		
- fluoroscopie	0.17		
- angiographie	0.08		
- radiologie interventionnelle	0.04		
- tomodensitométrie	0.28		
- mammographie	0.006		
- radiologie dentaire	0.01		
- tomographie conventionnelle	0.007		
- Minéralométrie	$6 \cdot 10^{-6}$		
Médecine nucléaire (valeur de 1989/1990)	-	0.04	2008
Total	-	1.04	2013

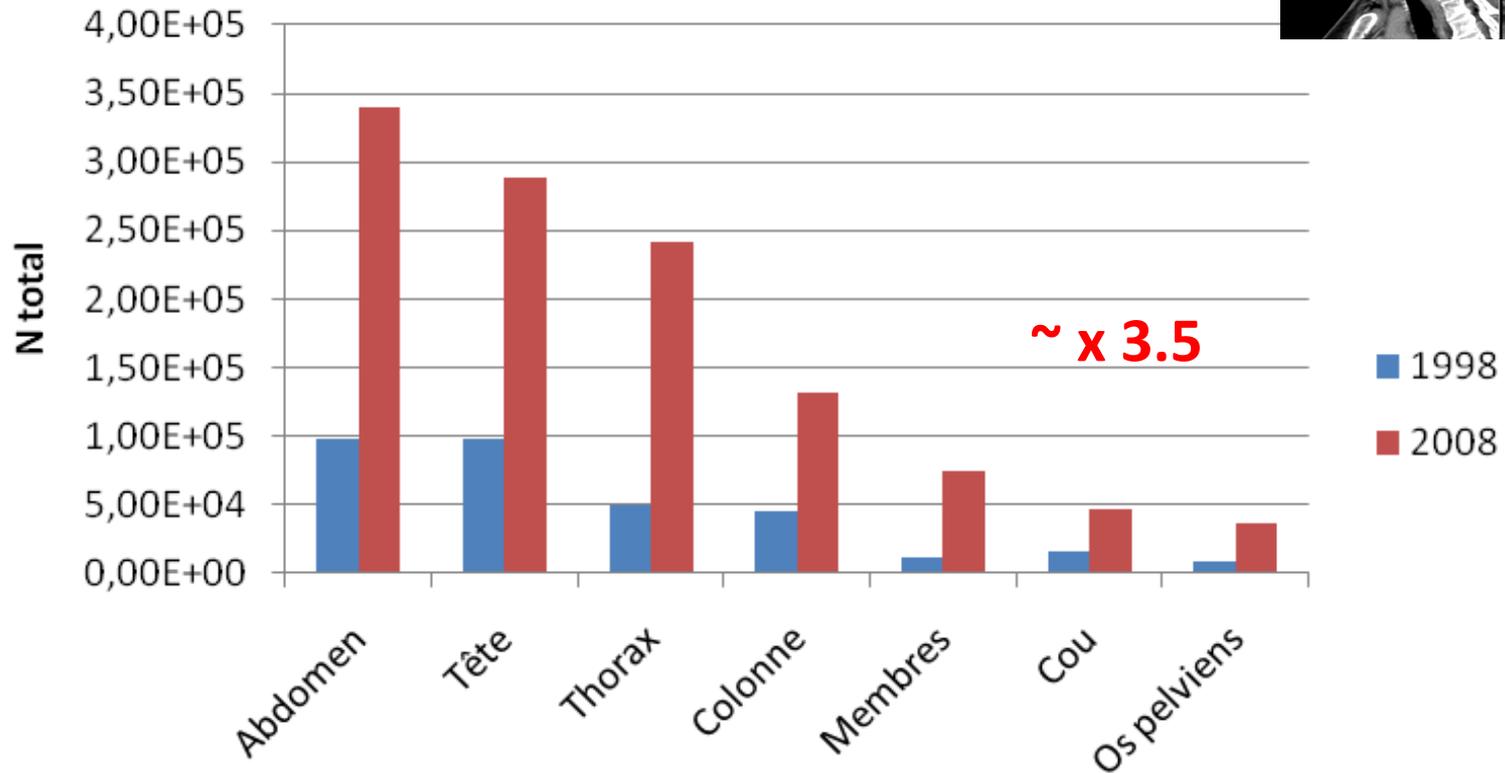
2004, basé sur études 1998

Table 6.1 : Répartition de la dose moyenne sur les diverses modalités d'examen

# Applications médicales – CT



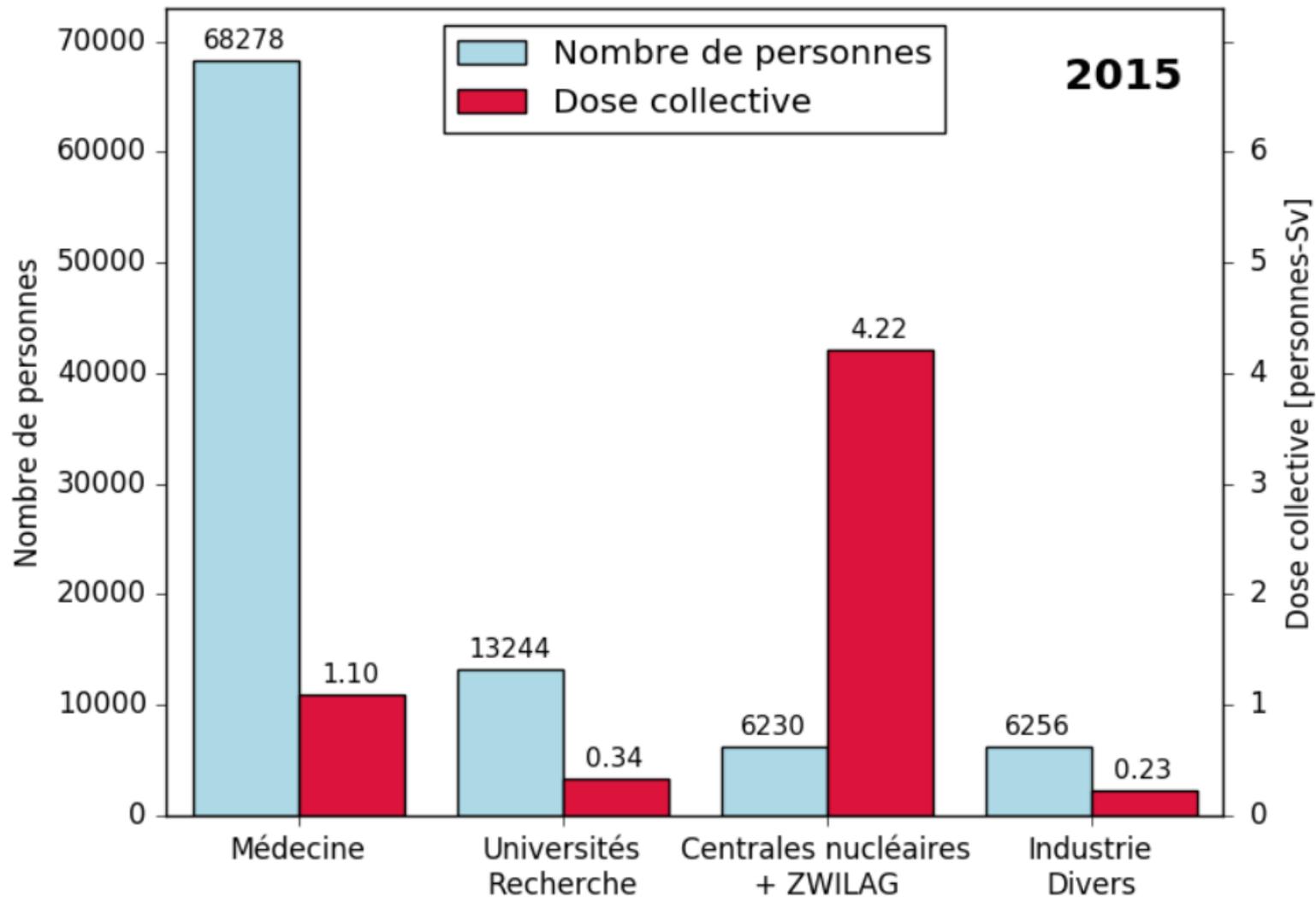
## Tomodensitometrie



Type d'examen irradiant	Dose en mSv	Période équivalente d'irradiation naturelle <sup>1</sup>	Risque
Scanner PET/CT Scanner abdomen/pelvis	- 20 -	← 7.8 ans	Petit
Scanner thorax	- 10 -	← 3.8 ans	Très petit
Scintigraphie osseuse	- 5 -		
Urographie Scanner crâne Radiographie rachis lombaire	- 1 -	← 1 an ← 4.6 mois	
Radiographie abdomen/pelvis	- 1 -	← 4.6 mois	Minime
Scintigraphie rénale	- 0.5 -	← 2.3 mois	
Mammographie (4 clichés)	- 0.1 -	← 14 jours	
Radiographie crâne	- 0.1 -	← 14 jours	Négligeable
Radiographie thorax	- 0.01 -	← 1.4 jours	
Radiographie dentaire	- 0.01 -	← 1.4 jours	

<sup>1</sup> Moyenne suisse = 2.7 mSv par an

# Activités professionnelles – dose par secteur



# Rappel : Ordres de grandeur des doses

Irradiation naturelle annuelle : 5.5 mSv

Vol Paris - New-York : ~ 0.1 mSv

Radiographie du thorax : ~ 0.02 mSv

Radiographie de l'abdomen : ~ 1 mSv

CT de l'abdomen : 10 mSv

Limite pour les professionnels : 20 mSv/an

*Irradiation d'une tumeur correspond à : 20 à 60 Gy*

*(mais irradiation localisée!)*

Umweltradioaktivität  
und Strahlendosen in der Schweiz  
Radioactivité de l'environnement  
et doses de rayonnements en Suisse  
Radioattività dell'ambiente e dosi  
d'irradiazione in Svizzera

2010



Publié par le Département  
de l'Environnement  
et de la Sécurité  
Nucleaire

WHO HANDBOOK ON  
INDOOR RADON  
A PUBLIC HEALTH PERSPECTIVE



Institut de  
radiophysique  
Rue du Grand-Pré 1  
CH-1007 Lausanne

Institut universitaire de  
médecine sociale et préventive  
Route de la Corniche 2  
CH-1066 Epalinges

## Exposure of the Swiss population by Medical X-rays: 2008 Review

Abbas Aroua, Eleni T. Samara, François O. Bochud and Francis  
R. Verdun  
*Institute of Radiation Physics, Lausanne*

John-Paul Vader  
*University Institute of Social and Preventive Medicine, Lausanne*

June 2011



This research project was jointly funded by the Swiss  
of Public Health (contract Nr. 08.004670/434.0000/-53)  
National Science Foundation (subsidy Nr. 32003B\_127461).

RAPPORT



## La radioprotection des travailleurs

Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants  
en France : bilan 2009

DIRECTION DE LA RADIOPROTECTION DE L'HOMME

# Résumé

- Les contributions de l'irradiation **naturelle** sont les suivantes :
  - rayonnement cosmique : 0,38 mSv
  - rayonnement terrestre : 0,35 mSv
  - rayonnement propre : 0,34 mSv.
- Le **radon** est la principale source d'irradiation de la population suisse; la dose effective moyenne est estimée en Suisse à **3,2 mSv/an**.
- Le nombre de personnes professionnellement exposées aux radiations en Suisse est d'environ 94'000 (2015) et la dose effective collective totale de l'ordre de 6 pers.Sv.
- L'application **médicale** constitue la source d'irradiation artificielle de la population la plus importante (~ **1,4 mSv/an**).
- La dose efficace **moyenne** totale de la population suisse est estimée à **5,7 mSv/an** (~ 5,9 mSv avec irradiation professionnelles et autres sources incluses)

# Objectifs du cours

- **Inventorier les différentes sources d'irradiation** de la population suisse et les doses correspondants
- Discuter les **ordres de grandeur des doses** reçues par la population par rapport aux limites légales

# Exercices

1. Quelles sont les diverses composantes de l'irradiation naturelle et quelle est la plus importante en Suisse ?
2. A combien s'élève le nombre de travailleurs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique en Suisse ?
3. Quel est le secteur d'activité qui conduit à la dose collective la plus élevée en Suisse ?