

# **Radon: risques et conséquences**

## **Approche de la CIPR**

---

**CPR-ComABC-CSN**

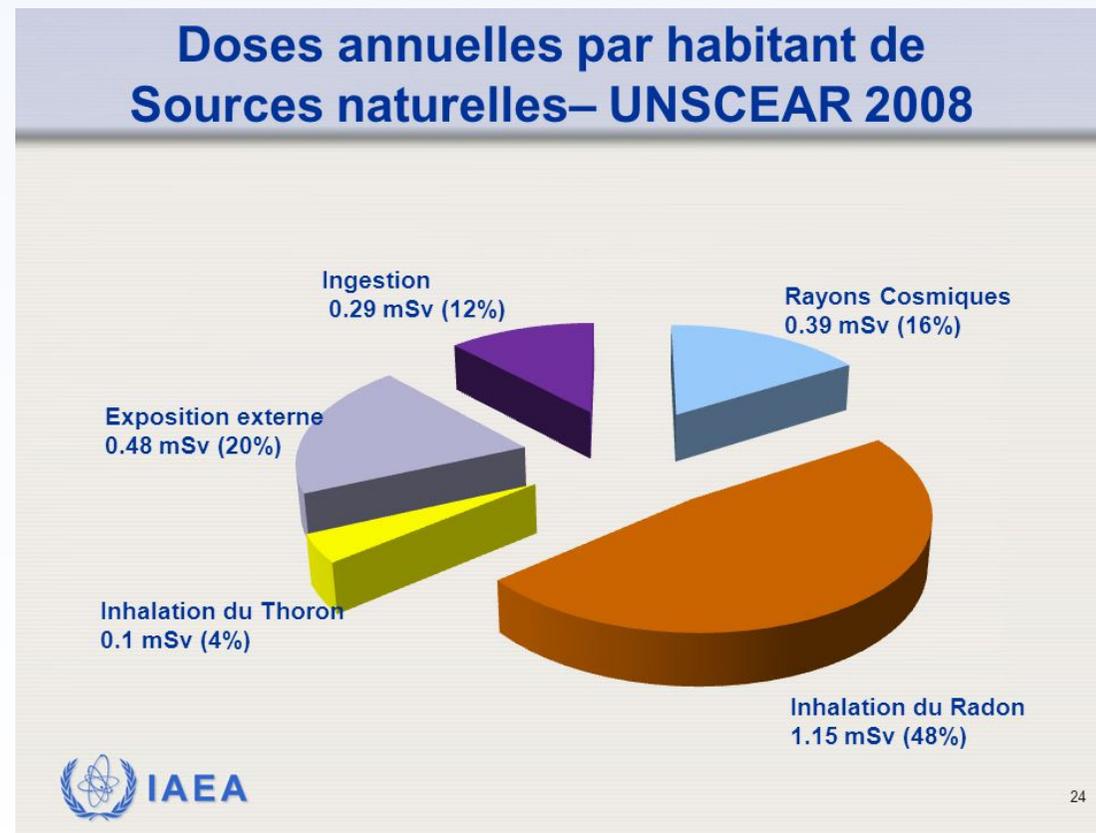
Berne, 14 Juin 2019

**François Paquet IRSN, CIPR  
avec la contribution de E. Cléro, IRSN**

# Pourquoi (tant de bruit sur) le Radon ?

Gaz naturel mais.....

Contribue à la majeure partie de l'exposition naturelle



# Pourquoi (tant de bruit sur) le radon ?

Gaz naturel mais.....

Contribue à la majeure partie de l'exposition naturelle

Constitue la seconde cause de cancer de poumon



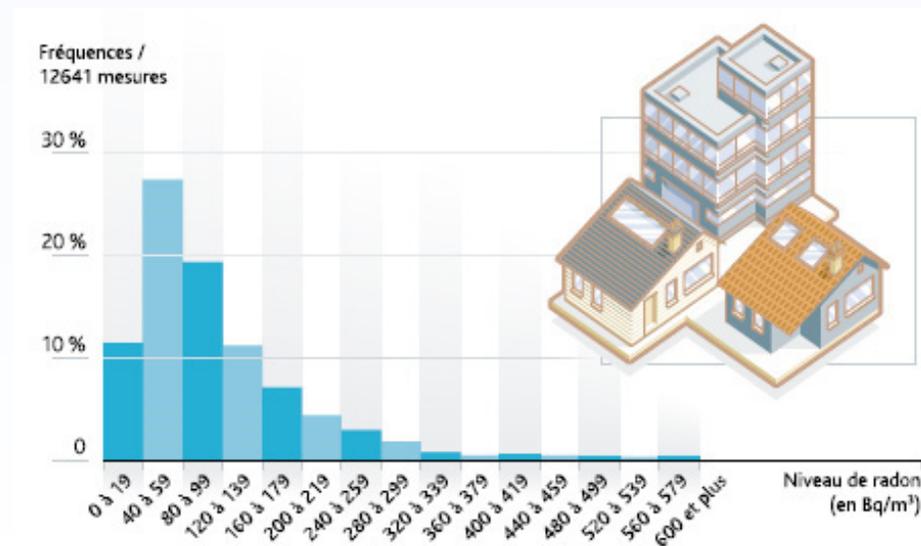
# Pourquoi (tant de bruit sur) le radon ?

Gaz naturel mais.....

Contribue à la majeure partie de l'exposition naturelle

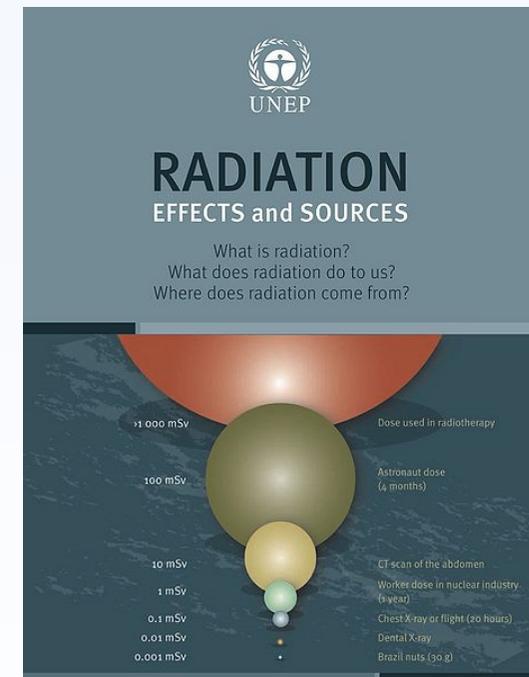
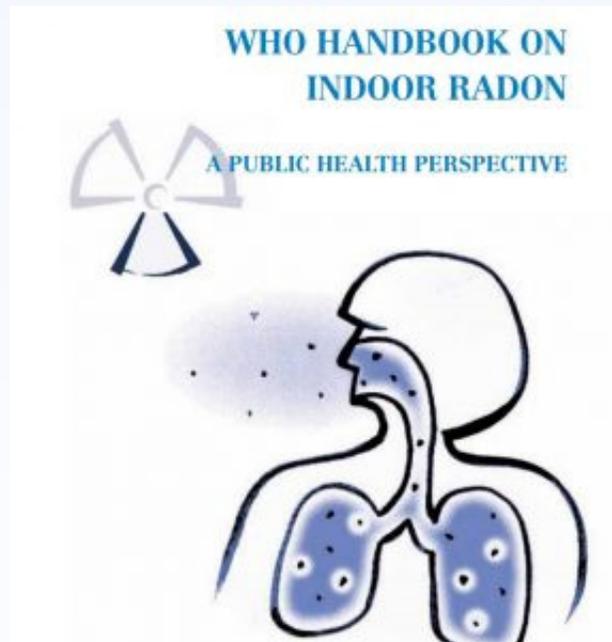
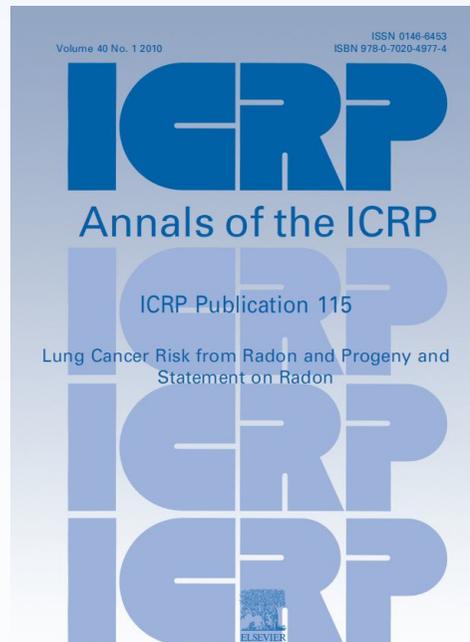
Constitue la seconde cause de cancer de poumon

Concentrations dans les habitats et les lieux de travail varient de 10 à 10 000 Bq/m<sup>3</sup>



Source : IRSN

# Les organisations internationales et le radon



# Etudes épidémiologiques des risques associés au radon

## ① Mineurs d'uranium

(exposition professionnelle)



### Etudes de cohorte

- ❑ Mises en place à partir des années 60
- ❑ Plus d'une vingtaine d'études
- ❑ Suivi dosimétrique individuel des travailleurs
- ❑ Suivi de la mortalité sur plusieurs dizaines d'années



**Estimer le risque de cancer du poumon associé à l'exposition cumulée au radon dans les mines / les habitations**

Données individuelles

Relation temporelle : la cause vers l'effet

1 facteur de risque → plusieurs maladies

Long et coûteux + Perdus de vue

Mal adapté en cas de maladies rares

## ② Population générale

(exposition domestique)



### Etudes cas-témoins

- ❑ Mises en place à partir des années 90
- ❑ Plus d'une vingtaine d'études
- ❑ Reconstruction de l'exposition au radon
- ❑ Questionnaires : reconstruction détaillée de l'historique tabagique, autres facteurs de risque de cancer du poumon

Données individuelles

Relation temporelle : l'effet vers la cause

1 maladie → plusieurs expositions

Biais de sélection (choix des témoins)

+ mesure (reconstitution difficile des expos)

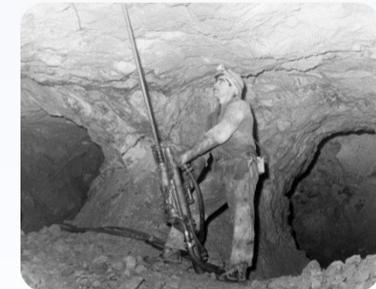
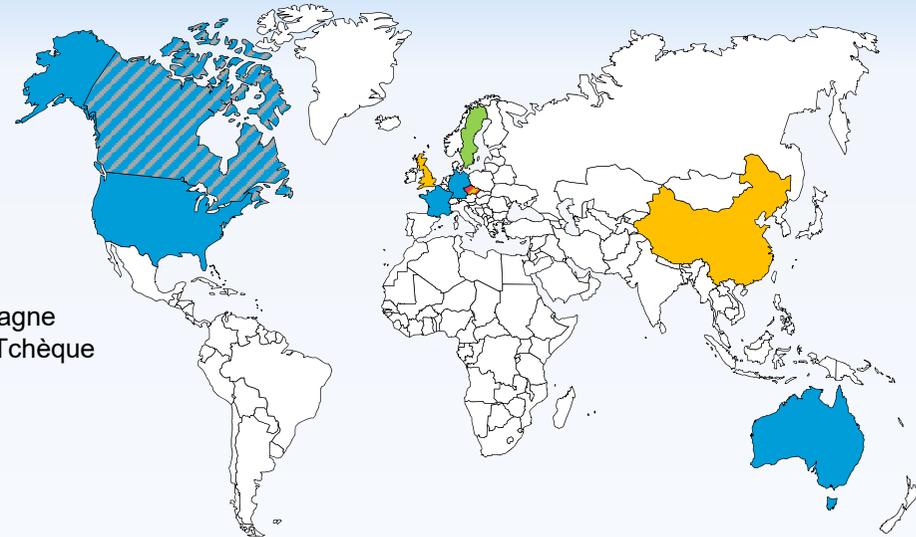
# ***I. Etudes chez les mineurs***

# Etudes chez les mineurs à travers le monde

## Études épidémiologiques chez les mineurs :

- Uranium**  
Canada (Ontario, Port Radium, Beaverlodge)  
Etats-Unis (Colorado, Nouveau Mexique)  
République Tchèque (Bohème)  
France, Allemagne, Australie
- Fluorine** - Canada (Newfoundland)

- Etain**  
Chine  
Grande-Bretagne  
République Tchèque
- Fer** - Suède

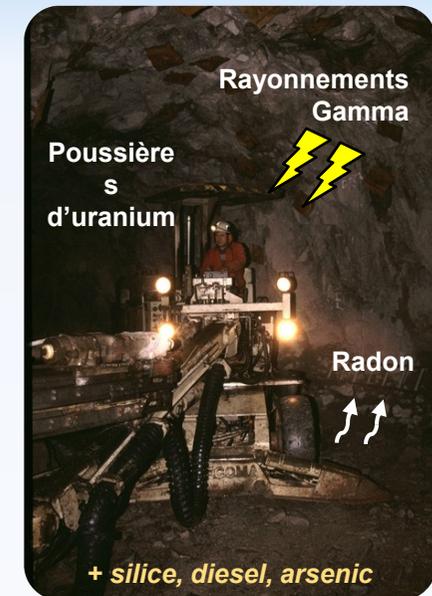


# Cohorte française des mineurs d'uranium (1/5)



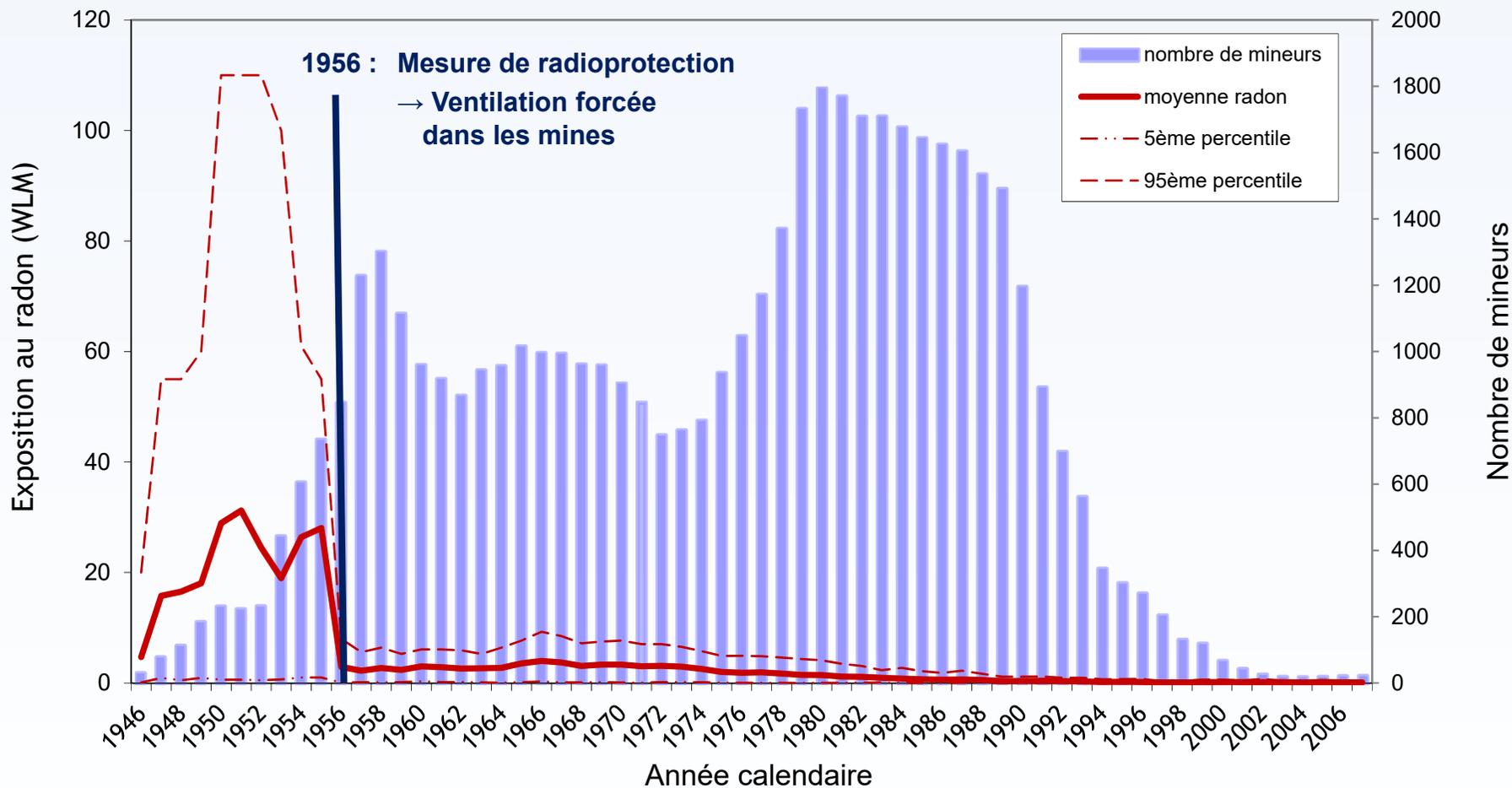
## Etude épidémiologique

- ❑ Mise en place en 1982 (par IPSN et COGEMA)
- ❑ Inclusion des hommes ayant le statut mineur
- ❑ Embauchés à CEA-COGEMA entre 1946 et 1990
  
- ❑ Suivi reconstitué jusque fin 2007 (nouveau suivi en cours → 2015)
- ❑ Recueil du statut vital et des causes de décès
- ❑ Estimation de l'exposition annuelle individuelle au radon (+ autres rayonnements ionisants : gamma, poussières d'uranium)



# Cohorte française des mineurs d'uranium (2/5)

Distribution de l'exposition annuelle au radon (WLM)  
dans la cohorte totale sur la période 1946-2007



Working Level Month : unité d'exposition au radon (concentration × temps de travail), 5 WLM ⇔ 1 mSv (Travailleurs)

# Cohorte française des mineurs d'uranium (3/5)

## ■ Caractéristiques de la cohorte française

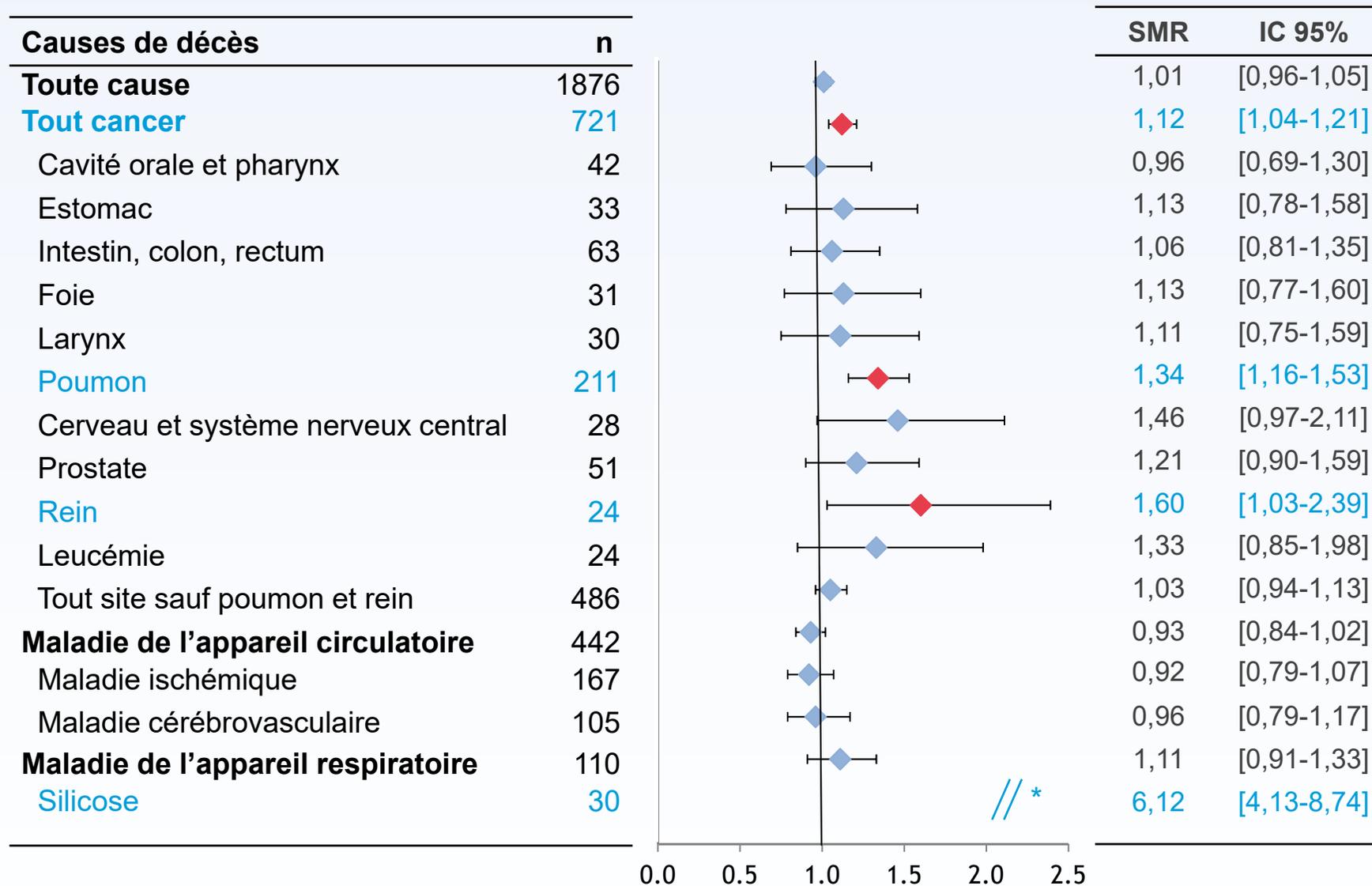
---

Nombre de mineurs, n	5 086	
Période de suivi	1946 - 2007	
Personnes-Années, n	179 955	
<b>Statut vital, n (%)</b>		
Vivants à la fin du suivi	2 924 (57,5 %)	
Décédés	1 935 (38,0 %)	
<i>Décédés avec causes connues</i>	1 876	→ 3 % de données manquantes pour les causes de décès
<i>Décédés par cancer du poumon</i>	211	
Perdus de vue	40 (0,8 %)	
Âgés > 85 ans	187 (3,7 %)	
<b>Suivi, moyenne (min-max)</b>		
Âge à la fin de l'étude (années)	64,2 (20 - 85)	
Durée du suivi (années)	35,4 (0,1 - 61)	

---

(Rage et al. Intern Arch Occup Environ Health 2015)

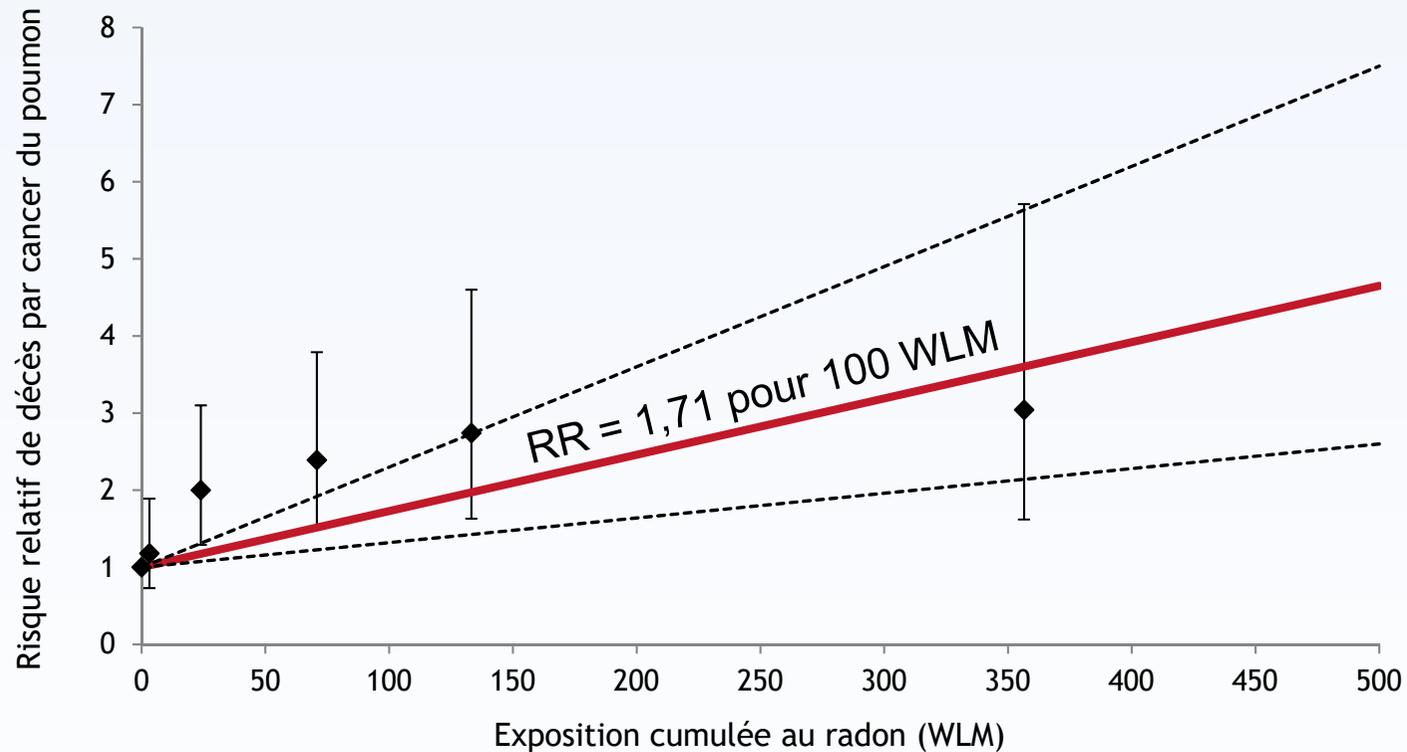
## ■ Mortalité par cancer du poumon (par rapport à la population générale)



➔ ↗ significative de la mortalité par cancer du poumon

# Cohorte française des mineurs d'uranium (5/5)

## Relation entre exposition au radon et risque de décès par cancer du poumon



➔ ERR = 0,71 [0,31 - 1,30]

↗ significative du risque de cancer du poumon associé à l'exposition cumulée au radon

## Etude conjointe internationale de 11 cohortes de mineurs

Place	Country	Type of mine	Follow-up period	No. of miners	Cumulative exposure WLM	Person-years <sup>a</sup>	ERR per 100 WLM	SE
Yunnan	China	Tin	1976–1987	13,649	286.0	134,842	0.17	
W-Bohemia	Czech Republic	Uranium	1952–1990	4320	196.8	102,650	0.67	
Colorado	USA	Uranium	1950–1990	3347	578.6	79,556	0.44	
Ontario	Canada	Uranium	1955–1986	21,346	31.0	300,608	0.82	
Newfoundland	Canada	Fluorspar	1950–1984	1751	388.4	33,795	0.82	
Malmberget	Sweden	Iron	1951–1991	1294	80.6	32,452	1.04	
New Mexico	USA	Uranium	1943–1985	3457	110.9	46,800	1.58	
Beaverlodge	Canada	Uranium	1950–1980	6895	21.2	67,080	2.33	
Port Radium	Canada	Uranium	1950–1980	1420	243.0	31,454	0.24	
Radium Hill	Australia	Uranium	1948–1987	1457	7.6	24,138	2.75	
CEA-COGEMA	France	Uranium	1948–1986	1769	59.4	39,172	0.51	
<b>Total</b>				<b>60,606</b>	<b>164.4</b>	<b>888,906</b>	<b>0.59</b>	<b>1.32</b>

WLM, working level month; ERR, excess relative risk; SE, multiplicative standard error.

<sup>a</sup> Among exposed.

(BEIR VI, 1999)

# Etudes chez les mineurs d'uranium : risque associé au radon et tabac



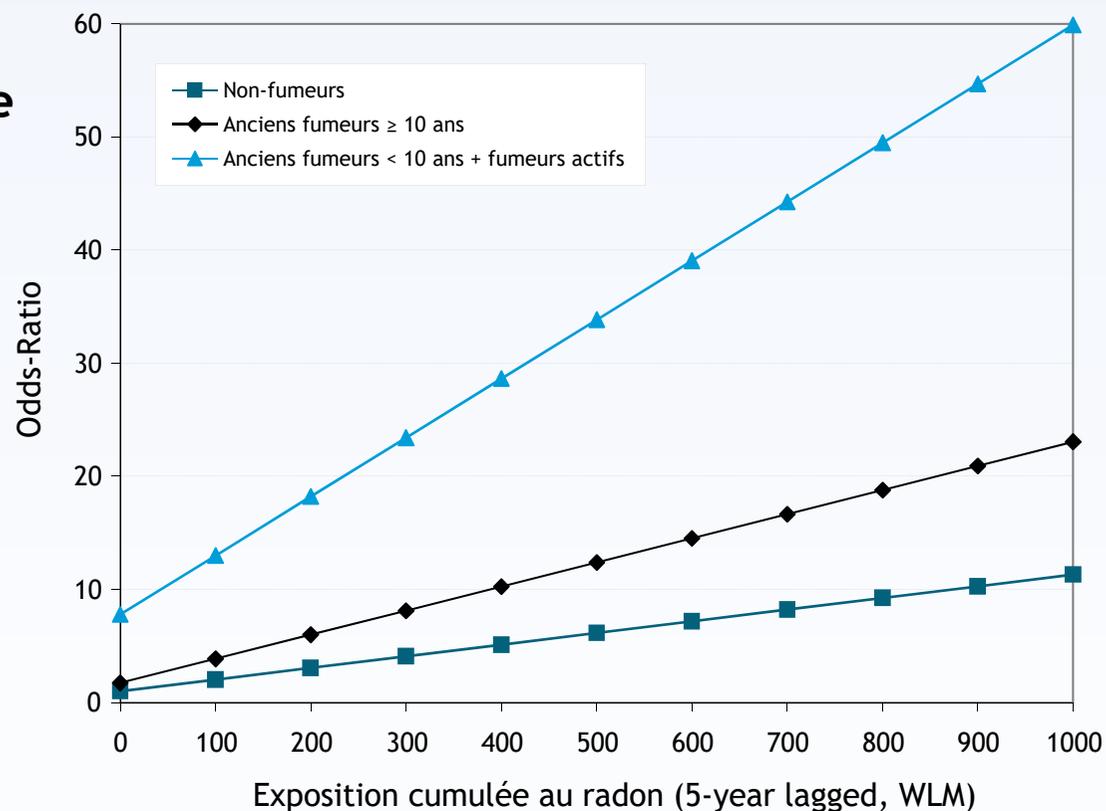
## Statut tabagique Etude conjointe européenne

### Étude cas-témoins nichée

- France
- Allemagne
- République Tchèque

1 236 cas (cancers du poumon)

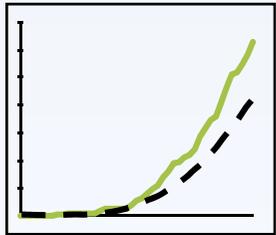
2 678 témoins



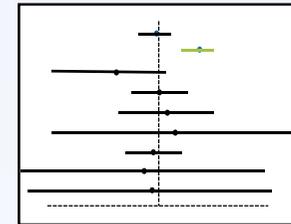
- ➡ Persistance de la relation avec le radon après prise en compte du tabac  
Augmentation du risque dans chaque catégorie de tabagisme  
Interaction sub-multiplicative

(Leuraud et al. Radiat Res 2011)

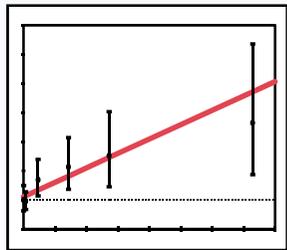
# Etudes chez les mineurs : principaux résultats



Excès de mortalité par cancer du poumon



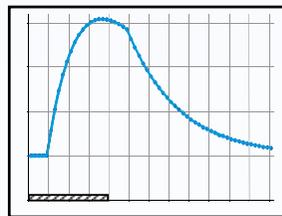
Doutes sur l'existence de risques hors cancer du poumon (leucémie, rein, estomac, cardiovasculaire...)



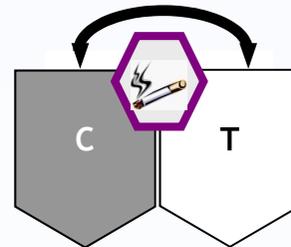
Relation radon - risque de cancer du poumon

Persistence chez les mineurs faiblement exposés

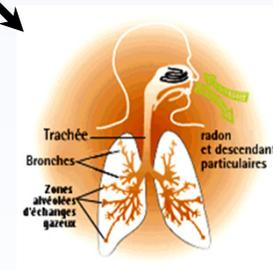
Persistence après prise en compte des erreurs de mesure



Diminution du risque avec le délai depuis l'exposition



Persistence du risque après ajustement sur le tabac



Contribution majoritaire du radon à la dose au poumon (gamma, poussières d'uranium)

***I. Etudes chez les mineurs***

***II. Etudes en population générale***

## Etude cas-témoins européenne (1/3)

### 3 études conjointes

Groupe		Etudes <i>n</i>	Cas <i>n</i>	Témoins <i>n</i>	RR / 100 Bq.m <sup>-3</sup> (IC 95%)
Européen	<i>Darby 2005</i>	13	7 148	14 208	1,08 (1,03 - 1,16)
Nord Américain	<i>Krewski 2006</i>	7	3 662	4 966	1,10 (0,99 - 1,26)
Chinois	<i>Lubin 2004</i>	2	1 050	1 995	1,13 (1,01 - 1,36)

➔ ↗ risque relatif d'environ 10 % par 100 Bq.m<sup>-3</sup>

### Etude conjointe européenne en population générale

- ❑ 13 études dans 9 pays : Allemagne, Belgique, Espagne, Finlande, France, Italie, Grande-Bretagne, République Tchèque, Suède
- ❑ Protocole standardisé :
  - ✓ Critères d'inclusion identiques
  - ✓ Questionnaire commun
  - ✓ Reconstruction de l'exposition domestique sur 30 ans
  - ✓ Inter-comparaison des méthodes de mesure
  - ✓ Analyse conjointe des données individuelles
- ❑ Effectif : 7 148 cas / 14 208 témoins

## Etude cas-témoins européenne (2/3)

(Darby et al. BMJ 2005)

- Concentration moyenne dans l'habitat

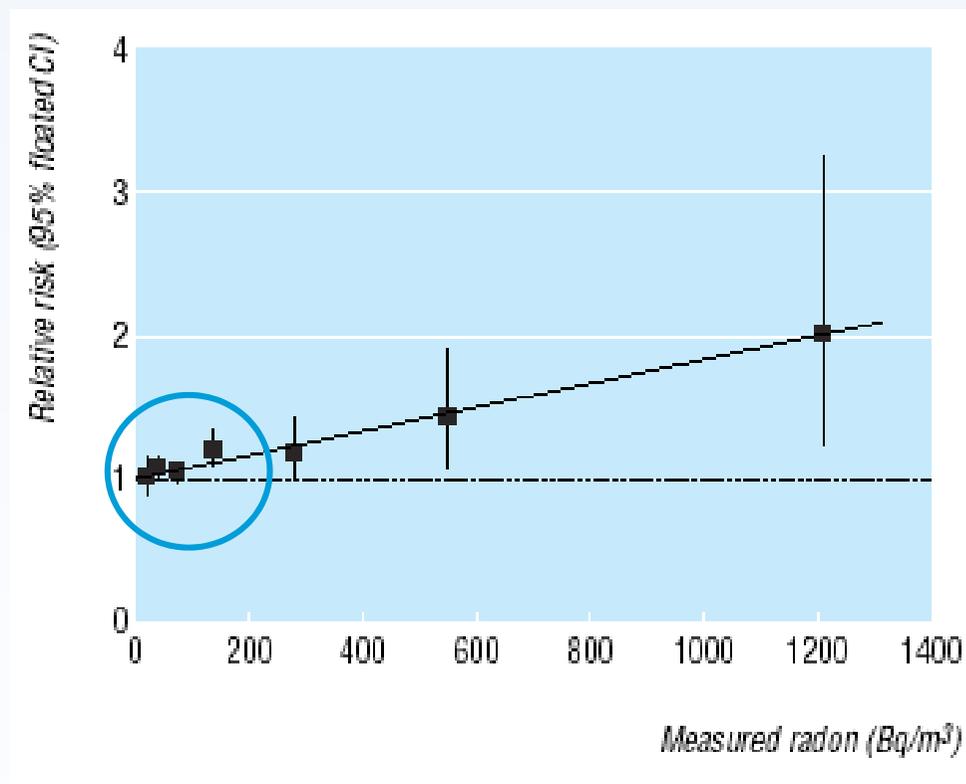
Cas = 104 Bq.m<sup>-3</sup>

Témoins = 97 Bq.m<sup>-3</sup>

- ↗ risque de cancer du poumon avec la concentration de radon

RR = 1,08 par 100 Bq.m<sup>-3</sup> [1,03 - 1,16]

RR = 1,16 par 100 Bq.m<sup>-3</sup> [1,05 - 1,31]  
après prise en compte des incertitudes liées aux estimations des concentrations de radon

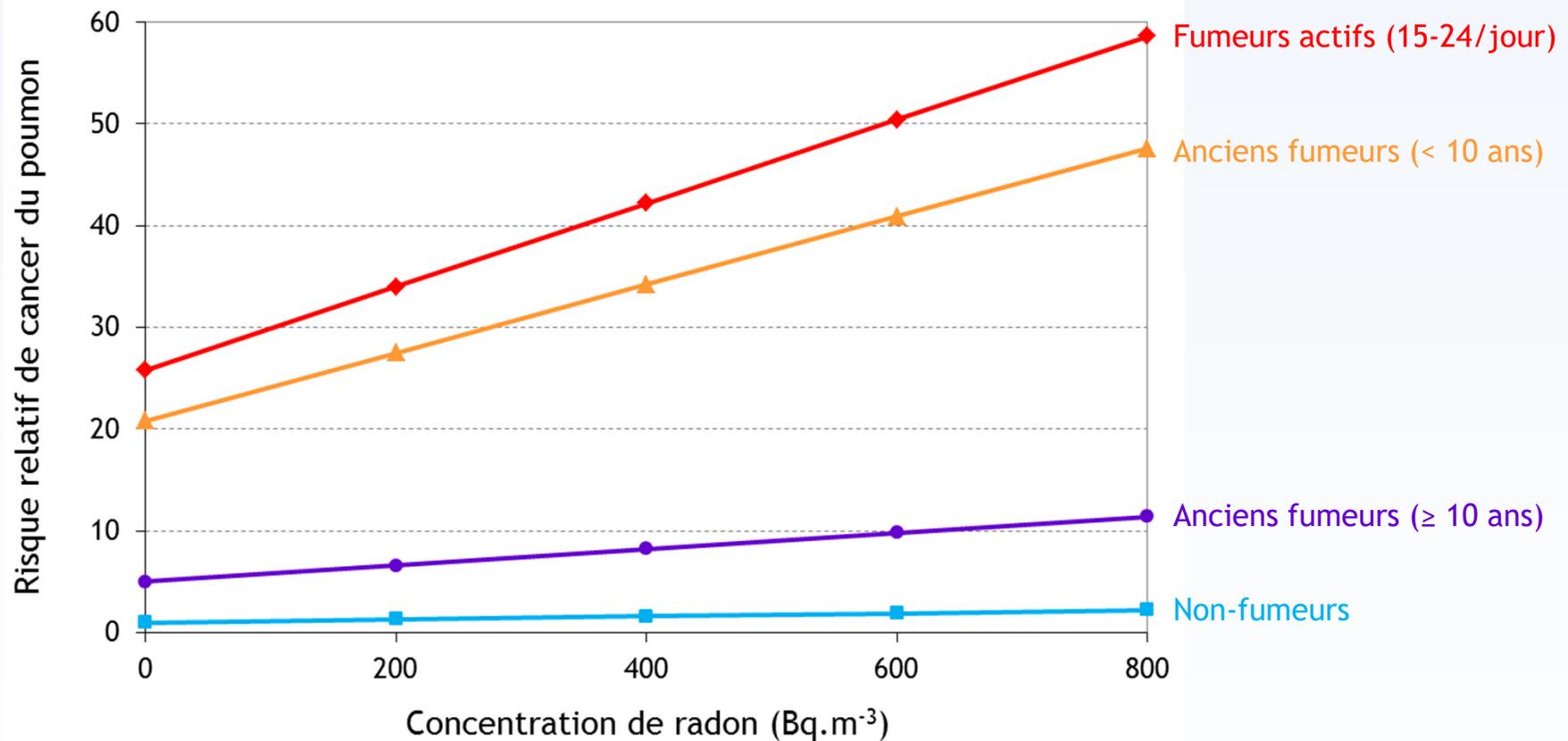


- Relation significative pour les expositions < 200 Bq.m<sup>-3</sup>

## Etude cas-témoins européenne (3/3)

(Darby et al.  
Scand J Work Environ Health 2006)

### □ Effet conjoint du radon et du tabac



➔ Relation significative persiste chez les fumeurs et les non-fumeurs

## Etudes cas-témoins sur le radon domestique et le risque de cancer du poumon : conclusion

- ❑ Une vingtaine d'études épidémiologiques depuis 1990
- ❑ Puissance des études individuelles généralement insuffisante pour conclure à une association significative
- ❑ Trois analyses conjointes :
  - ✓ Preuve claire d'association :  
Augmentation du risque de cancer du poumon avec l'exposition cumulée au radon dans l'habitat, après une stratification détaillée sur le statut tabagique
  - ✓ La relation dose-réponse semble être linéaire, sans élément en faveur de l'existence d'un seuil

# Fractions attribuables au radon : incidence et mortalité du cancer du poumon

■ Cancers du poumon attribuables au radon, chaque année en France

Incidence	Mortalité
4 000 nouveaux cas soit 10 % des nouveaux cas de cancer du poumon	3 000 décès soit 10 % des décès par cancer du poumon

Centre international de Recherche sur le Cancer



Marant-Micallef et al.  
Les cancers attribuables au mode de vie et à  
l'environnement en France en 2015. *BEH* 2018

Rapport CIRC publié en juin 2018

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



Ajrouche et al.  
Quantitative health impact of indoor radon in France.  
*Radiat Environ Biophys* 2018

Gaskin et al.  
Global estimate of lung cancer mortality attributable to  
residential radon. *Environ Health Physics* 2018

# Fractions attribuables au radon dans le monde

Pays	Exposition au radon (Bq.m <sup>-3</sup> )	Fraction attribuable au radon dans l'habitat (%)				
		BEIR VI <sup>a</sup>	Hunter <sup>b</sup>	Kreuzer <sup>c</sup>	Krewski <sup>d</sup>	Darby <sup>e</sup>
Cuba	5	4,3	2,3	2,1	1,6	1,2
Australie	9	4,7	3,7	3,5	2,1	1,6
Royaume-Uni	14	8,0	5,8	5,4	4,1	3,1
Algérie	22	15,8	9,0	8,3	6,4	4,8
Chine	34	15,9	13,1	12,4	9,5	7,2
Canada	42	16,3	15,5	14,6	11,2	8,6
Corée du Sud	49	16,8	17,5	16,6	12,8	9,9
France	50	19,4	17,8	16,9	13,0	10,0
Suisse	51	19,6	18,2	17,2	13,2	10,3
Suède	67	19,2	22,4	21,2	16,3	13,0
Mexique	82	26,7	25,9	24,9	19,3	15,4
Rép. Tchèque	94	24,3	28,9	27,5	21,4	17,3
Pologne	133	28,4	36,1	34,8	27,3	22,6
<b>66 pays (médiane)</b>	<b>38</b>	<b>16,5</b>	<b>14,4</b>	<b>13,6</b>	<b>10,4</b>	<b>8,4</b>

Exposition au radon : moyenne géométrique nationale

<sup>a</sup> Modèle EAC « âge concentration », analyse conjointe de 11 cohortes de mineurs du BEIR VI (NRC 1999)

<sup>b</sup> Analyse conjointe de 3 études européennes sur les mineurs (Hunter et al. 2013)

<sup>c</sup> Cohorte allemande de mineurs d'uranium (Kreuzer et al. 2015)

<sup>d</sup> Analyse conjointe nord-américaine en population générale (Krewski et al. 2003)

<sup>e</sup> Analyse conjointe européenne en population générale (Darby et al. 2006)

(Gaskin et al. Environ Health Physics 2018)



## État des connaissances sur les risques associés au radon

- ❑ **Cancer du poumon** : aujourd'hui, seul effet démontré associé au radon  
(études sur leucémie, cancer de la peau, du cerveau, de l'estomac)
- ❑ Bonne **cohérence des résultats** mineurs et population générale
- ❑ Augmentation du **risque relatif  $\approx 16\%$  pour  $\nearrow 100 \text{ Bq.m}^{-3}$**   
(concentration moyenne sur 25 années de résidence)
- ❑ **Temps de latence** entre 5 et 30 ans
- ❑ Accroissement du risque pour les fumeurs comme pour les **non-fumeurs**
- ❑ **Interaction tabac-radon** entre l'effet additif et multiplicatif
- ❑ Lacune de connaissances sur les effets des **expositions durant l'enfance**

# **La gestion des risques et des expositions au radon**

**Plusieurs approches ont été adoptées  
au fil du temps**

# Les travaux de la CIPR sur le sujet

24 ans



Publication 65 (1993)	Protection against Radon-222 at home and at work
Publication 103 (2007)	Recommendations
Publication 115 (2010)	Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon
Publication 126 (2014)	Radiological Protection against Radon Exposure
Publication 137 (2017)	Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3

# Les travaux de la CIPR sur le sujet

*Publication 65 Protection against Radon-222 at home and at work (1993)*

Publication de coefficients de conversion, fondés sur les données épidémiologiques

Compare un risque par WLM à un risque (ou détriment) par Sv

**donne Sv par WLM**

# Les coefficient de conversion de dose CIPR 65 (1993)

Compare risque de cancer chez les mineurs (LEAR)

$2.83 \times 10^{-4}$  par WLM

Au détriment total (cancer et effets héréditaires) de la CIPR 60 (1991):

- Travailleurs  $5.6 \times 10^{-2}$  par Sv **5 mSv par WLM**
- Public  $7.3 \times 10^{-2}$  par Sv **4 mSv par WLM**

# Les travaux de la CIPR sur le sujet

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- **Publication 103 (2007) Recommendations**

## Evolution du detriment par Sv entre les *Publication 60 et 103*

### Publication 60 (1991)

	Cancer Lung	Total	Hereditary	Total
Workers	0.6	4.8	0.8	5.6
Public	0.8	6.0	1.3	7.3

### Publication 103 (2007)

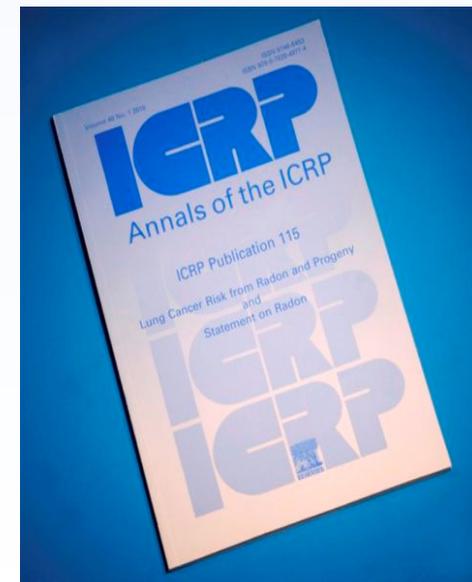
Workers	1.2	4.1	0.1	4.2
Public	0.9	5.5	0.2	5.7



**Le coefficient en Sv par WLM augmente mécaniquement  
(30% environ)**

# Les travaux de la CIPR sur le sujet

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- **Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon**



# Nouvelle évaluation du risque radon

## Publication CIPR 115 (2010)

- ❑ Mise à jour de la revue de la littérature scientifique depuis la publication CIPR 65 (1993)
- ❑ Bonne concordance des estimations de risque chez les mineurs peu exposés et de celles en population générale
- ❑ Aucune preuve de risque associé au radon, en dehors du cancer du poumon
- ❑ Calcul du détriment vie entière du cancer du poumon dû au radon et à ses descendants

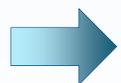
# Facteurs de conversion de dose pour le radon

« Approche épidémiologique » pour les hommes travailleurs

	Risque vie entière de cancer du poumon (WLM <sup>-1</sup> )	Détriment (Sv <sup>-1</sup> )	Dose efficace (mSv.WLM <sup>-1</sup> )
1993	2,8.10 <sup>-4</sup> (CIPR 65)	5,6.10 <sup>-2</sup> (CIPR 60)	<b>5</b>
2010	5.10 <sup>-4</sup> (CIPR 115)	4,2.10 <sup>-2</sup> (CIPR 103)	<b>12</b>



(Marsh et al. Health Phys 2010)



**Augmentation du risque vie entière dans la CIPR 115 par rapport à la CIPR 65**



**Valeur du facteur de conversion : 3,3 mSv par mJ.h.m<sup>-3</sup> (≈ 12 mSv.WLM<sup>-1</sup>)  
Publication CIPR 137 (2018)**

## Conclusions du “Statement on Radon” (ICRP Publication 115)

*Abaisser la valeur haute du niveau de référence pour les habitats de 600 Bq m<sup>-3</sup> à 300 Bq m<sup>-3</sup>*

*Spécifier la valeur de 1000 Bq m<sup>-3</sup> comme point d'entrée pour appliquer les règles de protection des travailleurs*

**Produire des coefficients de dose en utilisant une approche dosimétrique (comme pour tous les autres RN)**

# Les travaux de la CIPR sur le sujet

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon
- **Publication 126 (2014) Radiological Protection against Radon Exposure**

# **Radiological Protection against Radon Exposure Publication 126 (2014)**

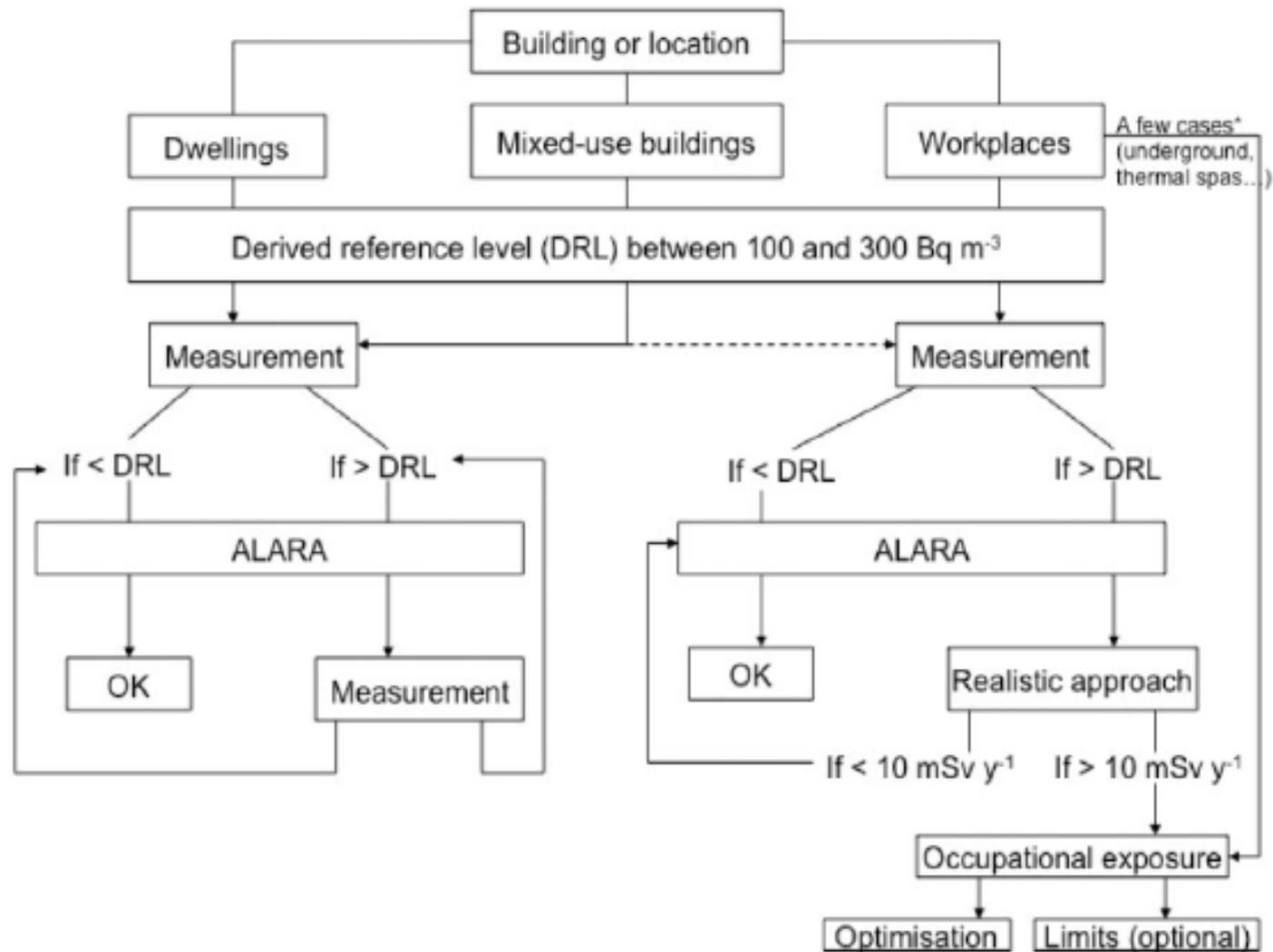
Application du système de protection pour les expositions au radon dans l'habitat et dans les lieux de travail

Gestion basée sur optimisation à partir d'un niveau de référence (300 Bq m<sup>-3</sup> dans l'habitat)

Approche intégrée quel que soit le lieu

Approche graduée sur les lieux de travail

# Publication 126 : Radiological Protection against Radon Exposure



# Les travaux de la CIPR sur le sujet

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon
- Publication 126 (2014) Radiological Protection against Radon Exposure
- **Publication 137 (2017) Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3**

# Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3 (ICRP Publication 137)

3<sup>eme</sup> volume d'une série visant à réviser tous les coefficients de dose des travailleurs, après exposition par inhalation et ingestion

# Occupational Intakes of Radionuclides

**OIR1** (P130) Introduction et modèles généraux

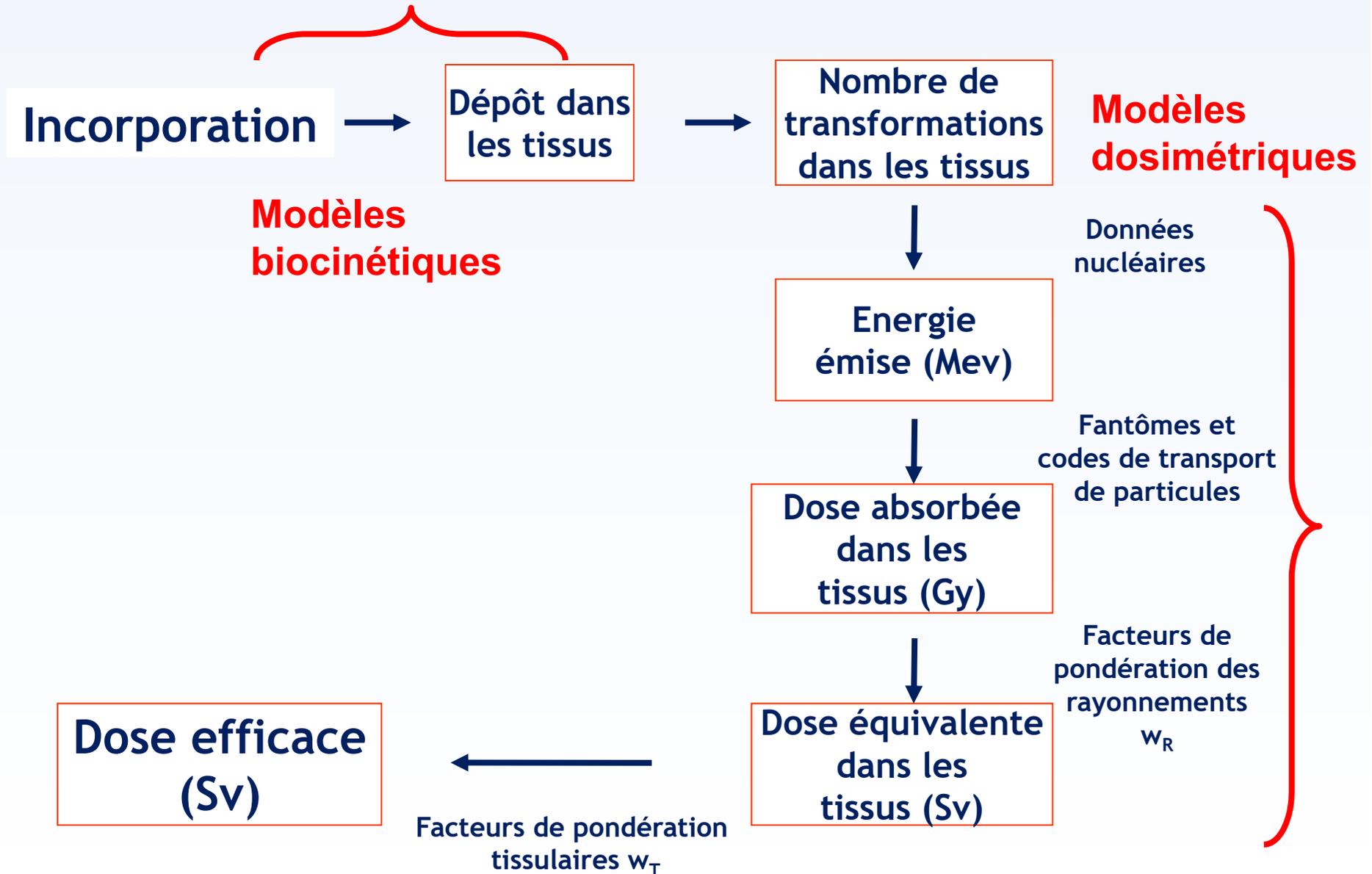
**OIR2** (P134) H, C, P, S, Ca, Fe, Co, Zn, Sr, Y, Zr, Nb

**OIR3** (P137) Ru, Sb, Te, I, Cs, Ba, Ir, Pb, Bi, Po, **Rn**,  
Ra, Th, U

**OIR4** Lanthanides et Actinides

**OIR5** Tous les autres RN

# Calcul des doses equivalentes et efficaces



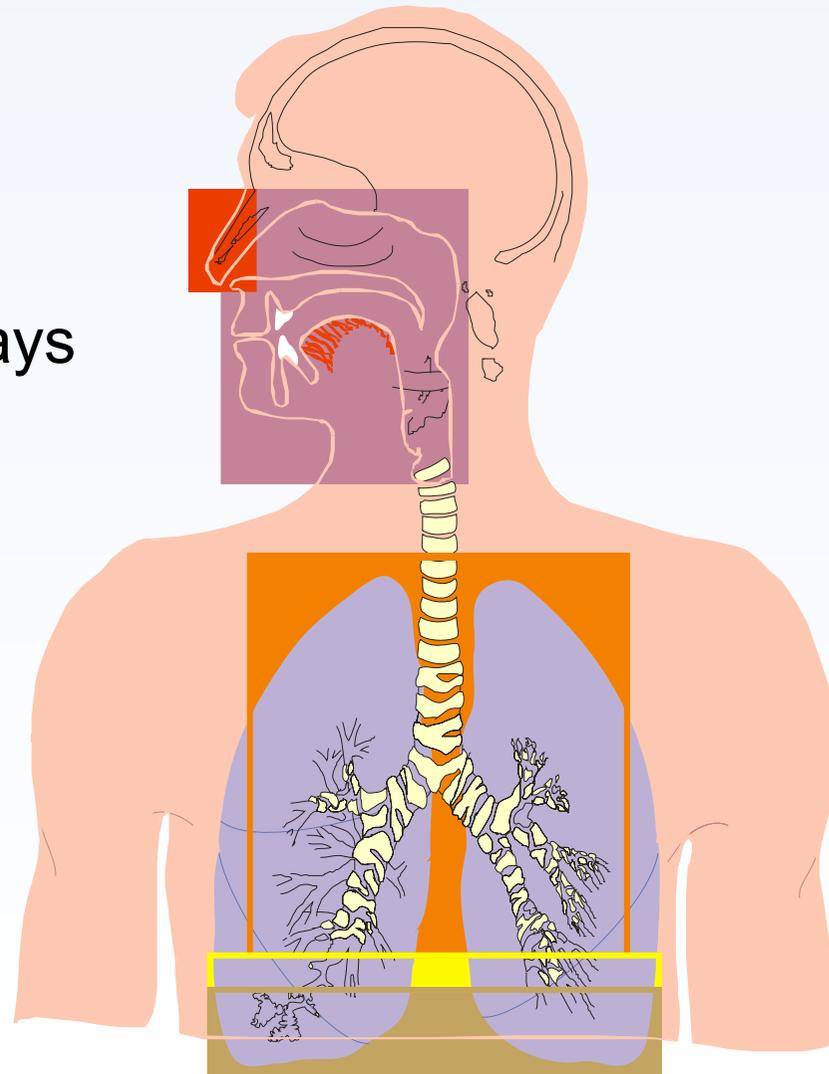
# Human Respiratory Tract Model, Publication 66 (1994), révisé dans OIR P1

Extrathoracic airways

Bronchial

Bronchiolar

Alveolar interstitial



ET<sub>1</sub>

ET<sub>2</sub>

BB

bb

AI

# Les particularités du radon

1. Le radon est un gaz chimiquement inerte
2. L'inhalation de radon s'accompagne de l'inhalation des descendants
3. Les concentrations respectives de radon et de ses descendants sont très variables.
4. L'exposition au radon est exprimée selon différentes façons

***En conséquence, les coefficients de dose du Rn sont donnés :***

- pour le gaz radon et pour l'ensemble radon + descendants
- pour des “conditions environnementales types” (avec des F et des modes de formation “de référence”) (ex. mine, bureau, spas, grottes, maison,..)

# 1. Cas du gaz radon

# Modèle biocinétique du radon

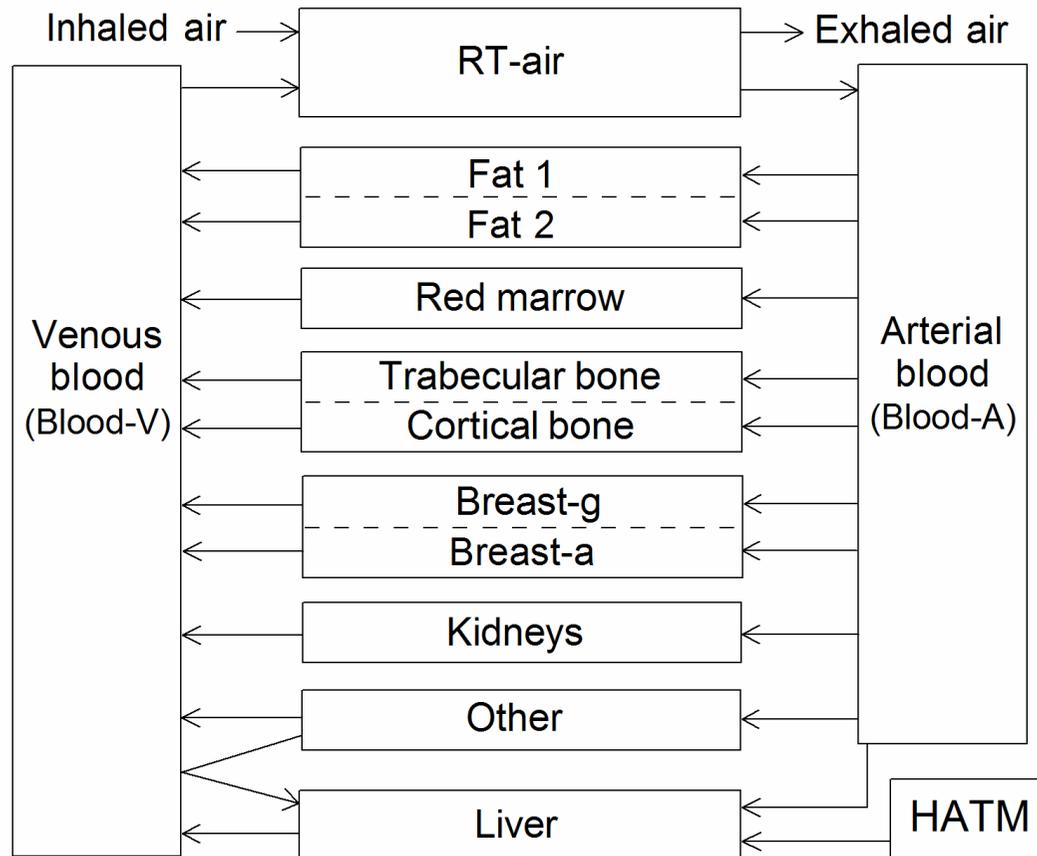


Fig 12.2. Structure of the biokinetic model for systemic radon.  
Abbreviations: RT-air = respiratory tract air; Blood-A = arterial blood;  
Blood-V = venous blood; Breast\_g = glandular breast tissue;  
Breast\_a = adipose tissue in breast;

# Coefficients de dose pour le gaz radon

Inhalation ou ingestion

Radon-222 (Radon)

dose efficace

Radon-220 (Thoron)

doses equivalente aux organes

Radon-219 (Actinon)

Nuclide	Physical half-life, $T_{1/2}$	Effective dose	
		Sv per Bq	mSv per Bq h m <sup>-3</sup> a
<b>Rn-222 (radon)</b>	3.8 d	4.4E-10	1.8E-7
<b>Rn-220 (thoron)</b>	56 s	1.8E-10	-
<b>Rn-219 (actinon)</b>	4.0 s	4.8E-11	-

Table 12.5 Effective dose coefficients following the inhalation of radon gas alone.

<sup>a</sup> This is the effective dose rate following chronic exposure to unit concentration of radon after the radon concentration in organs and tissues have reached saturation (i.e. equilibrium).

## **2. Cas des descendants du radon**

**Les coefficients de dose vont dépendre de très nombreux paramètres**

## Définition des principaux paramètres

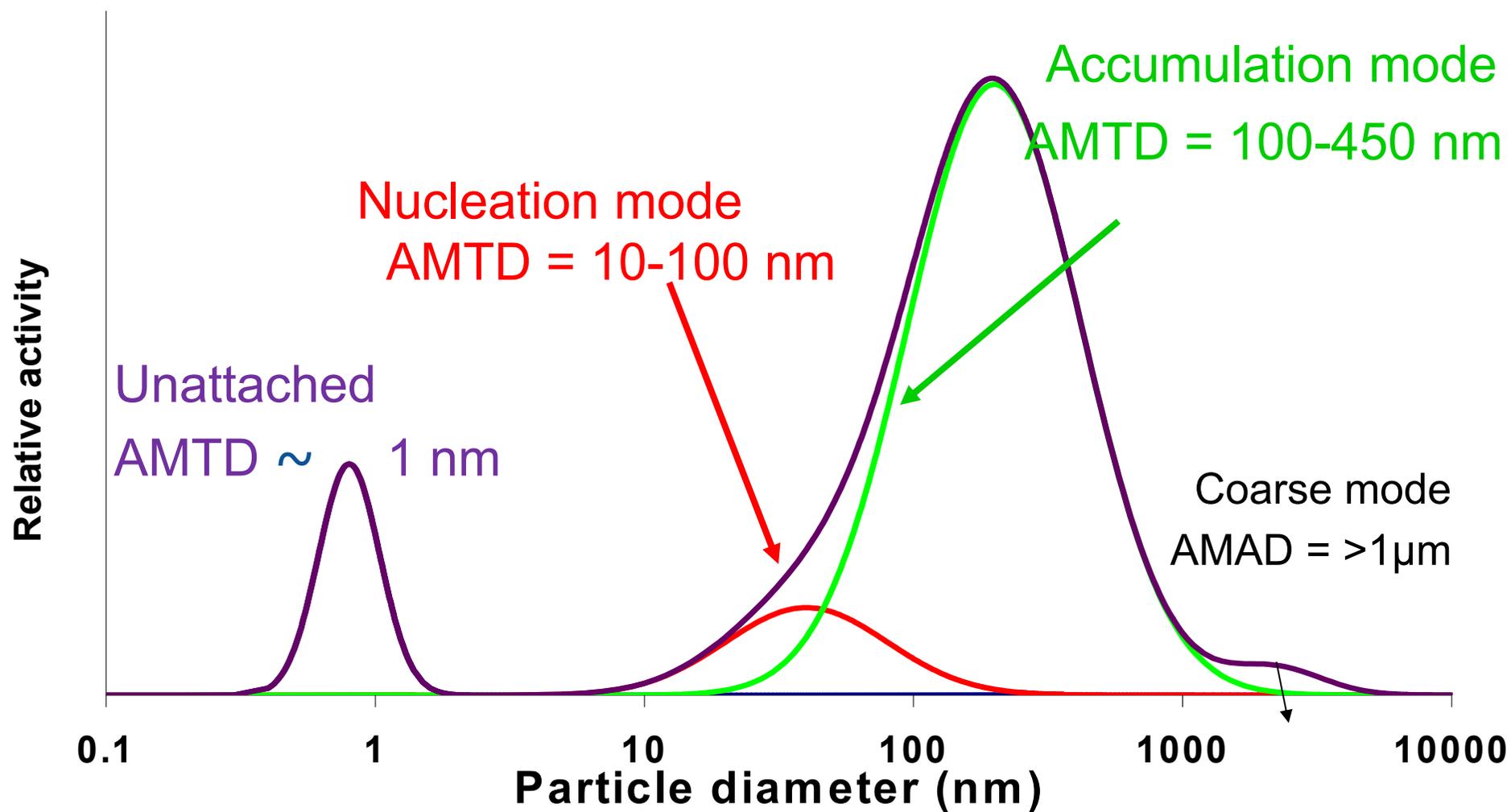
- Le taux de respiration  
1.2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> pour les travailleurs

## Définition des principaux paramètres

- Le taux de respiration
- Les caractéristiques des aérosols
  - fraction libre
  - distribution en taille qui influe sur le depot pulmonaire

La CIPR définit des situations de référence, avec des aérosols de référence

# Distribution en taille des aerosols des descendants du radon



Porstendörfer 2001, Marsh *et al* 2002

# Caractéristiques de référence des aerosols des descendants du radon

Exposure scenario	$f_p$	F	Attached aerosol characteristics in the ambient air <sup>c</sup>						
			Mode	$f_p$	AMTD <sub>i</sub> (nm)	$\sigma_{gi}$	Density, $\rho_i$ (g cm <sup>-3</sup> )	Shape factor, $\chi_i$	hgf <sub>i</sub>
Indoor workplace	0.08	0.4	n	0.2	30	2.0	-	-	2.0
			a	0.8	250	2.0	-	-	2.0
Mine	0.01	0.2	a	1.0	250	2.0	0.7 <sup>d</sup>	1.0 <sup>d</sup>	1.0
Tourist cave	0.15	0.4	a	1.0	200	2.0	1.0	1.0	1.0

Table A.3. Reference aerosol parameter values for different exposure scenarios for <sup>222</sup>Rn progeny.

## Dépôt des aerosols “de reference” dans l’arbre bronchique

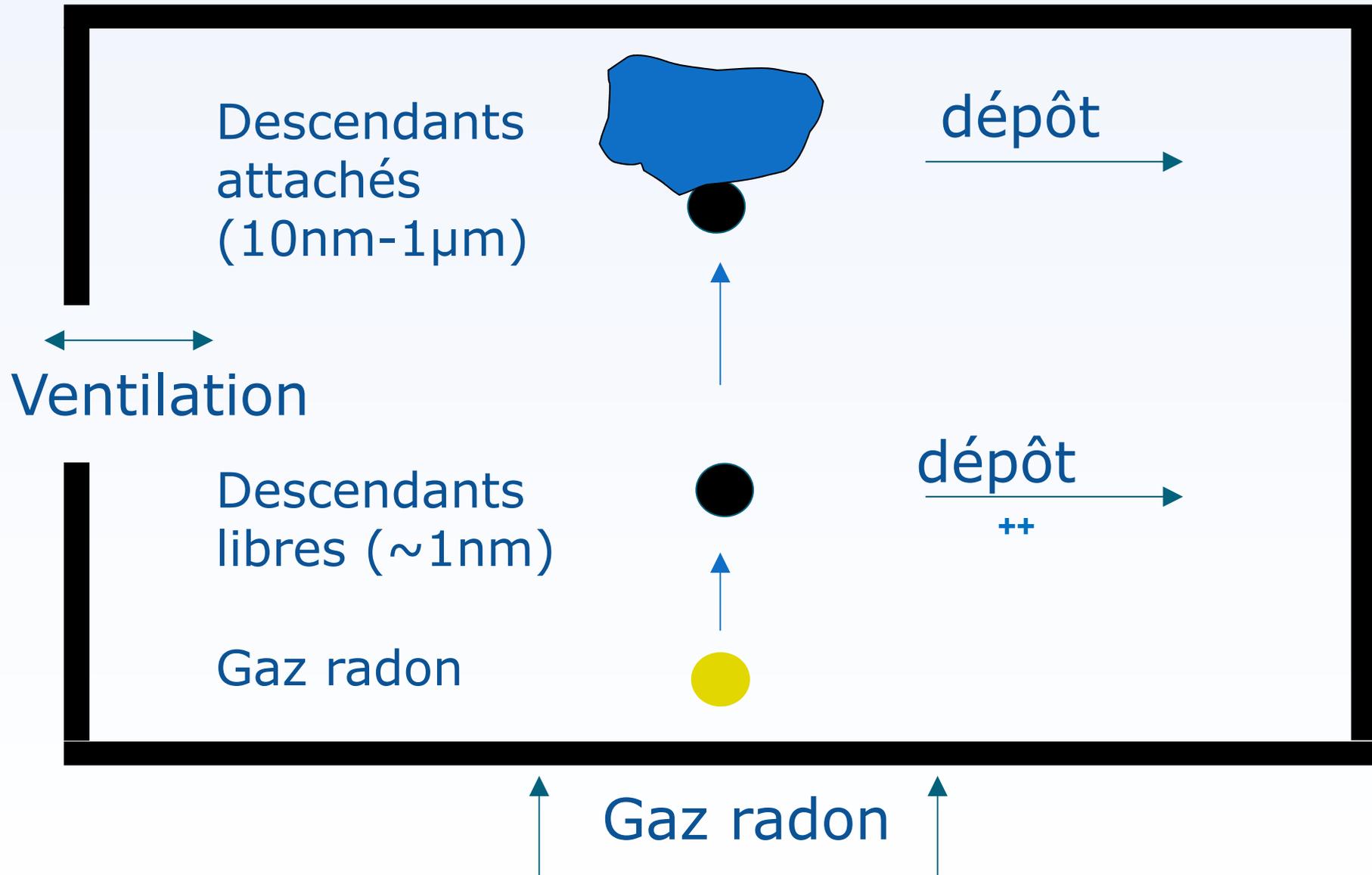
Exposure scenario	Mode	Deposition in regions (%)					
		ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB	bb	Al	Total
All	u	51.91	27.96	7.93	10.05	0.59	<b>98.43</b>
Indoor workplace	n	3.85	2.08	0.93	6.53	27.90	<b>41.29</b>
	a	10.68	5.75	0.60	1.42	9.05	<b>27.51</b>
Mine	a	3.16	1.70	0.41	2.16	9.94	<b>17.37</b>
Tourist cave	a	3.42	1.84	0.47	2.61	11.94	<b>20.28</b>

Table A.6. Deposition of inhaled <sup>222</sup>Rn progeny aerosols in respiratory tract regions. ‘u’ = unattached mode, ‘n’ = nucleation mode, and ‘a’ = accumulation mode.

# Définition des principaux paramètres

- Le taux de respiration
- Les caractéristiques des aérosols
  - fraction libre
  - distribution en taille
- **Le facteur d'équilibre**

# Devenir des descendants du radon



# Facteur d'équilibre, F

F est la mesure du degré de déséquilibre entre le gaz radon et ses descendants

F=1		F=0.3	
Nuclide	Bq m <sup>-3</sup>	Nuclide	Bq m <sup>-3</sup>
<sup>222</sup> Rn gas	1.0	<sup>222</sup> Rn gas	1.0
<sup>218</sup> Po	1.0	<sup>218</sup> Po	0.6
<sup>214</sup> Pb	1.0	<sup>214</sup> Pb	0.3
<sup>214</sup> Bi	1.0	<sup>214</sup> Bi	0.2

***La valeur de F depend du taux de ventilation :***

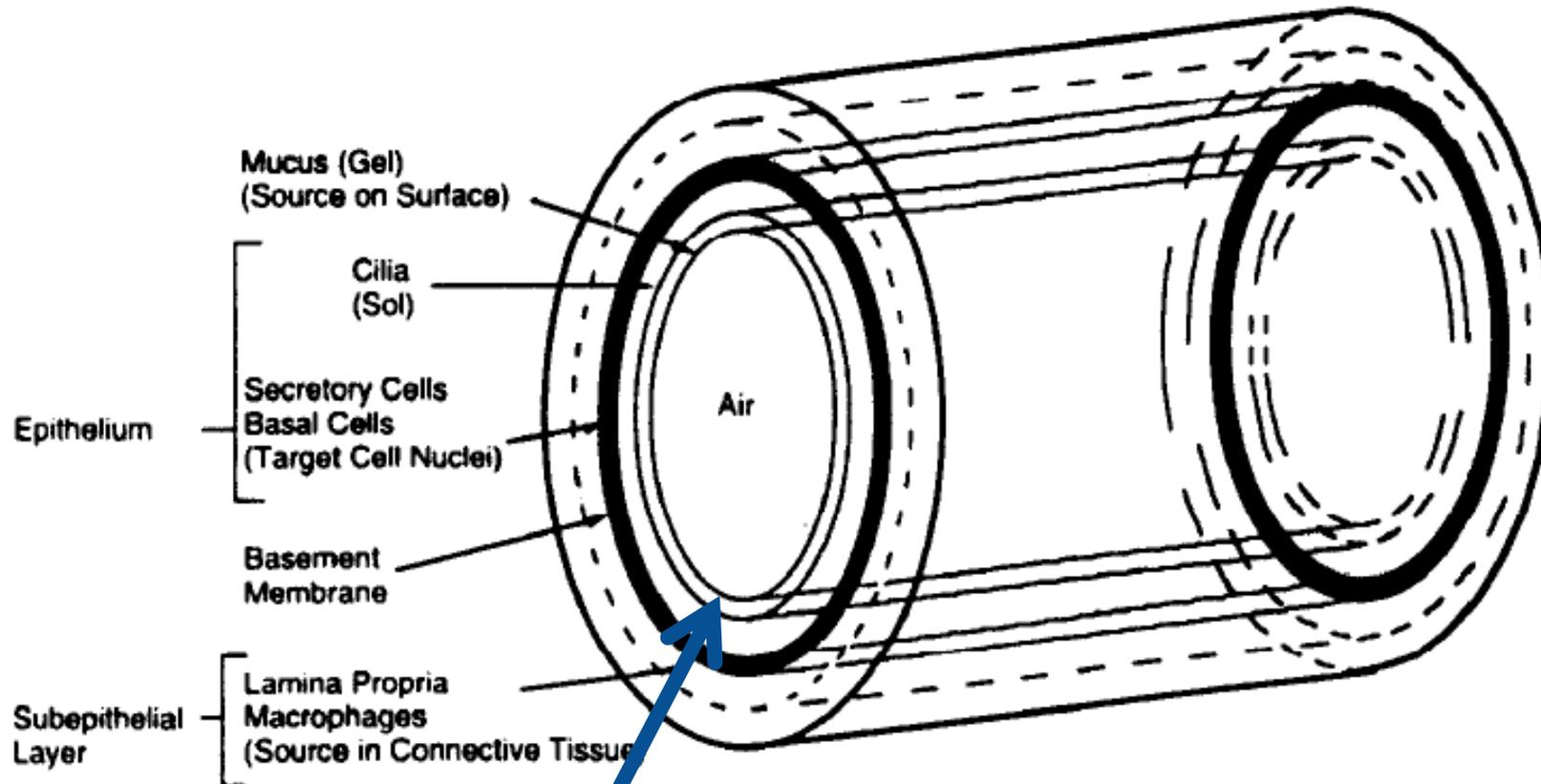
**Air intérieur :            F ≈ 0.4            ventilation naturelle**

**Mines :                    F ≈ 0.2            ventilation forcée**

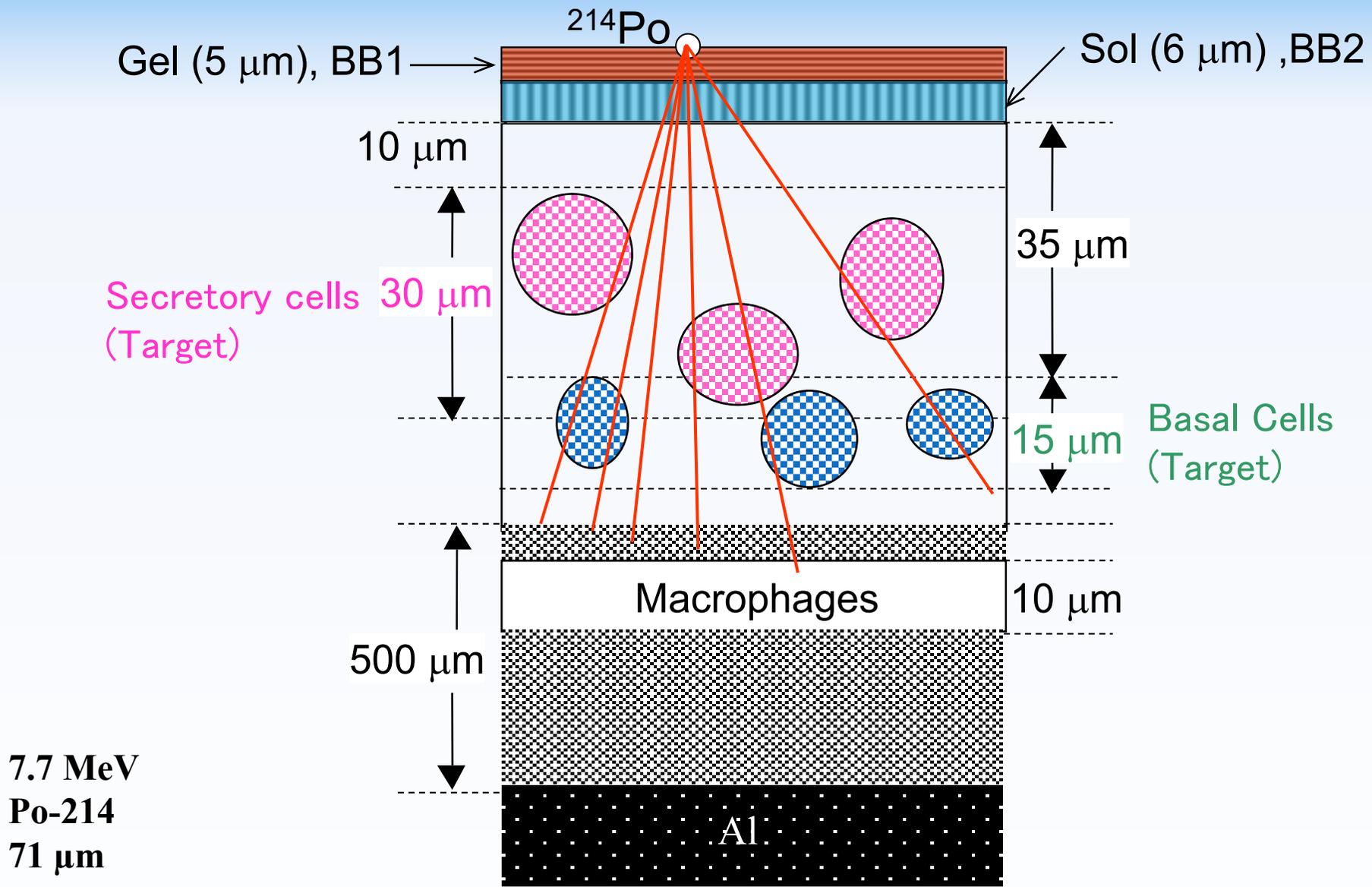
## B/ Définition des principaux paramètres

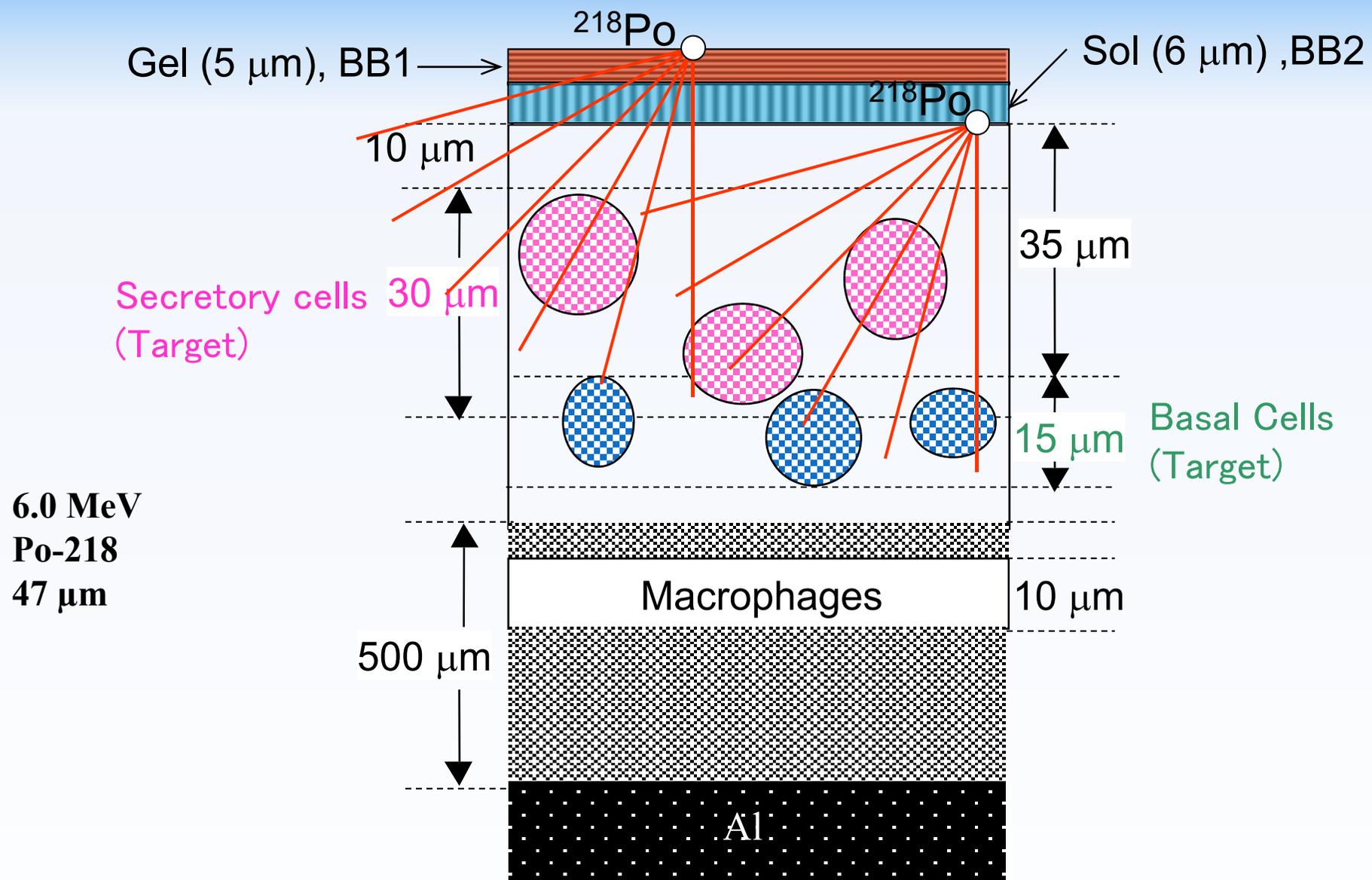
- Le taux de respiration
- Les caractéristiques des aérosols
  - fraction libre
  - distribution en taille
- Le facteur d'équilibre
- **Le modèle géométrique des voies aériennes**

# Modèle géométrique des voies aériennes (HRTM)



RN déposés  
sur la surface





# Coefficients de dose pour Rn + descendants

	Facteur équilibre	Fraction libre, %	Dose efficace mSv par WLM
Bureaux	0.4	8	<b>20 (a)</b> <b>14 (b)</b>
Mines	0.2	1	<b>12</b>
Grotte touristique	0.4	15	<b>24</b>
Habitat	0.4	8	<b>13</b>

(a) ICRP reference breathing rate est  $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $\frac{1}{3}$  assis,  $\frac{2}{3}$  exercice léger)

(b) Plus faible débit respiratoire de  $0.86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $\frac{2}{3}$  assis,  $\frac{1}{3}$  exercice léger)

# Comparison entre les approches dosimétriques et épidémiologiques

		Dose efficace	
	mSv par WLM	mSv par mJ h m <sup>-3</sup>	
<b><i>Dosimetrie</i></b>			
Mine	12	3.3	
Bureaux	20	5.7	
<i>Faible débit respiratoire</i>	14	3.9	
Grotte touristique	24	6.7	
Habitat	13	3.7	
<b><i>Epidémiologie</i></b>			
Travailleurs	12	3.4	
Public	9	2.6	

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ h m}^{-3}$$

# Coefficients de dose pour Rn + descendants

## Propositions de la CIPR

- **3 mSv par mJ h m<sup>-3</sup> (approx. 10 mSv par WLM)**  
dans la majorité des cas,
- **6 mSv par mJ h m<sup>-3</sup> (approx. 20 mSv par WLM)**  
pour les grottes et les travaux demandant une  
activité physique conséquente

*Tous les détails de calculs sont donnés en annexe,  
permettant une modulation (**sous couvert de l'accord de  
l'organisme de regulation !!!**) de ces coefficients en  
fonction de données plus précises sur le facteur d'équilibre  
et/ou les caractéristiques des aérosols*

ICRP

[www.ICRP.org](http://www.ICRP.org)