

février 2025

# APPROCHE DOSIMÉTRIQUE DE LA CIPR ET CALCUL DE DOSE RADON

Eric Blanchardon - Journées techniques de la SFRP sur le radon :  
prévention et gestion du risque

# CHAÎNE DE DÉSINTÉGRATION DU RADON

| élément chimique                             |          | isotope           | rayonnement émis | période           |
|----------------------------------------------|----------|-------------------|------------------|-------------------|
| gaz radon<br><br>descendants<br>à vie courte |          | $^{222}\text{Rn}$ | $\alpha$         | 3,8 j             |
|                                              |          | ↓                 |                  |                   |
|                                              | polonium | $^{218}\text{Po}$ | $\alpha$         | 3 min             |
|                                              |          | ↓                 |                  |                   |
|                                              | plomb    | $^{214}\text{Pb}$ | $\beta, \gamma$  | 27 min            |
|                                              |          | ↓                 |                  |                   |
|                                              | bismuth  | $^{214}\text{Bi}$ | $\beta, \gamma$  | 20 min            |
|                                              |          | ↓                 |                  |                   |
|                                              |          | $^{214}\text{Po}$ | $\alpha$         | 160 $\mu\text{s}$ |
|                                              |          | ↓                 |                  |                   |
|                                              |          | $^{210}\text{Pb}$ |                  | 22 ans            |

A l'équilibre radioactif  $A(^{222}\text{Rn}) = A(^{218}\text{Po}) = A(^{214}\text{Pb}) = A(^{214}\text{Bi}) = A(^{214}\text{Po})$  en Bq

# DOSE RADON

Le gaz radon inhalé, chimiquement inerte, est majoritairement exhalé avant de se désintégrer ( $\sim 4$  j)

La plupart des descendants à vie courte ( $< 30$  min) qui se déposent dans le poumon s'y désintègrent avec l'ensemble de leur chaîne de décroissance.

L'énergie émise est majoritairement sous forme de rayonnement  $\alpha$ .

**Donc la dose reçue résulte du rayonnement  $\alpha$  des descendants à vie courte du radon déposés dans le poumon.**

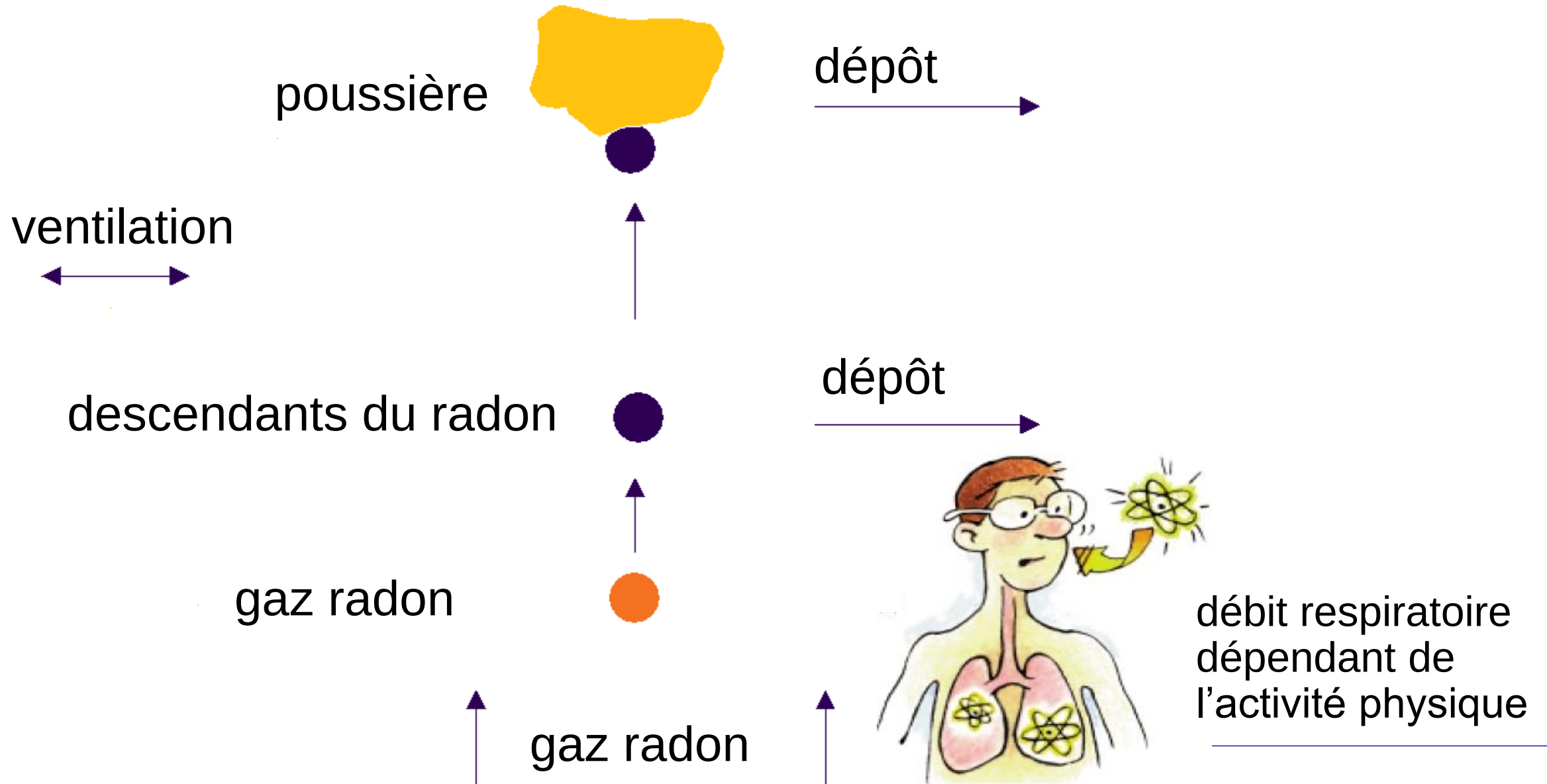
On utilise comme indicateur dosimétrique de l'exposition au radon l'énergie  $\alpha$  potentielle de ses descendants.

# ENERGIE ALPHA POTENTIELLE (EAP)

L'EAP (en joules, J) d'un atome dans la chaîne de désintégration du radon est l'énergie totale émise sous forme de rayonnement  $\alpha$  durant la transformation de cet atome en son descendant à vie longue  $^{210}\text{Pb}$ .

| radionucléide                       | émission $\alpha$<br>( $10^{-12}$ J) | période           | énergie alpha potentielle    |                                             |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
|                                     |                                      |                   | par atome<br>( $10^{-12}$ J) | par activité<br>( $10^{-10}$ J Bq $^{-1}$ ) |
| $^{218}\text{Po}$                   | 0,96                                 | 3,05 min          | 2,19                         | 5,79                                        |
| $^{214}\text{Pb}$                   | -                                    | 26,8 min          | 1,23                         | 28,6                                        |
| $^{214}\text{Bi}$                   | -                                    | 19,9 min          | 1,23                         | 21,2                                        |
| $^{214}\text{Po}$                   | 1,23                                 | 164 $\mu\text{s}$ | 1,23                         | $3 \times 10^{-6}$                          |
| total à l'équilibre par Bq de radon |                                      |                   |                              | 55,6                                        |

# DÉSÉQUILIBRES DU RADON



# DÉSÉQUILIBRES DU RADON

## FACTEUR D'ÉQUILIBRE F

En raison de la ventilation et du dépôt sur les surfaces, le gaz radon n'est pas à l'équilibre radioactif avec ses descendants.

| F = 1 <b>dose ↗</b>   |                    |
|-----------------------|--------------------|
| radionucléide         | Bq m <sup>-3</sup> |
| <sup>222</sup> Rn gaz | 1,0                |
| <sup>218</sup> Po     | 1,0                |
| <sup>214</sup> Pb     | 1,0                |
| <sup>214</sup> Bi     | 1,0                |

| F = 0,4               |                    |
|-----------------------|--------------------|
| radionucléide         | Bq m <sup>-3</sup> |
| <sup>222</sup> Rn gaz | 1,0                |
| <sup>218</sup> Po     | 0,8                |
| <sup>214</sup> Pb     | 0,4                |
| <sup>214</sup> Bi     | 0,3                |

## FRACTION LIBRE f<sub>p</sub>

### dépôt des descendants du radon inhalés

| région pulmonaire | libres (f <sub>p</sub> ) | Attachés (1- f <sub>p</sub> ) | masse de la région cible |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| bronches          | 13%                      | 2,8%                          | 3,3 g <b>dose ↗</b>      |
| alvéoles          | 0,17%                    | 10%                           | 1,1 kg                   |

f<sub>p</sub> ≈ 8% dans un bâtiment ; f<sub>p</sub> ≈ 1% dans une mine ; f<sub>p</sub> ≈ 15% dans une grotte touristique

# UNITÉS D'EXPOSITION AU RADON

## CONCENTRATION

- Concentration d'activité du gaz radon dans l'air en  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- Concentration d'énergie alpha potentielle (CEAP) d'un mélange de descendants dans l'air en  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$
- Facteur d'équilibre  $F$  = rapport entre CEAP réelle et CEAP théorique à l'équilibre radioactif.

## EXPOSITION

- Exposition à une concentration de gaz radon dans l'air pendant une durée de présence = intégrale sur le temps en  $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$
- Exposition à une concentration d'énergie potentielle alpha dans l'air pendant une durée de présence = intégrale sur le temps en  $\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$

$$1 \text{ Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3} = 5,56\cdot 10^{-9} \times F \text{ J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$1 \text{ J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3} = (1,80\cdot 10^8 / F) \text{ Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$$

# EVALUATION DE LA DOSE RADON

|                                                                |   |                                                                   |   |                              |
|----------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------|---|------------------------------|
| <div><u>exposition</u><br/>concentration<br/>x<br/>temps</div> | x | <div>coefficient de<br/>dose par<br/>exposition</div>             | = | <div>dose<br/>efficace</div> |
| Bq·m <sup>-3</sup> ·h<br>ou mJ·m <sup>-3</sup> ·h              | x | mSv par Bq·m <sup>-3</sup> ·h<br>ou mSv par mJ·m <sup>-3</sup> ·h | = | mSv                          |

Comment évaluer un coefficient de dose par exposition ?

# APPROCHE ÉPIDÉMIOLOGIQUE

Le suivi des mineurs d'uranium fournit une estimation directe du risque de cancer du poumon par unité d'exposition au radon :

$$\text{risque par exposition au radon} = 14 \times 10^{-2} / \text{J.h.m}^{-3}$$

Le suivi des survivants des bombardement d'Hiroshima et de Nagasaki fournit la base du détriment CIPR :

$$\text{détriment par sievert} = 4,2 \times 10^{-2} / \text{Sv [travailleurs]} \text{ ou } 5,7 \times 10^{-2} / \text{Sv [public]}$$

On fait l'approximation risque = détriment pour obtenir une conversion de l'exposition au radon en dose efficace :

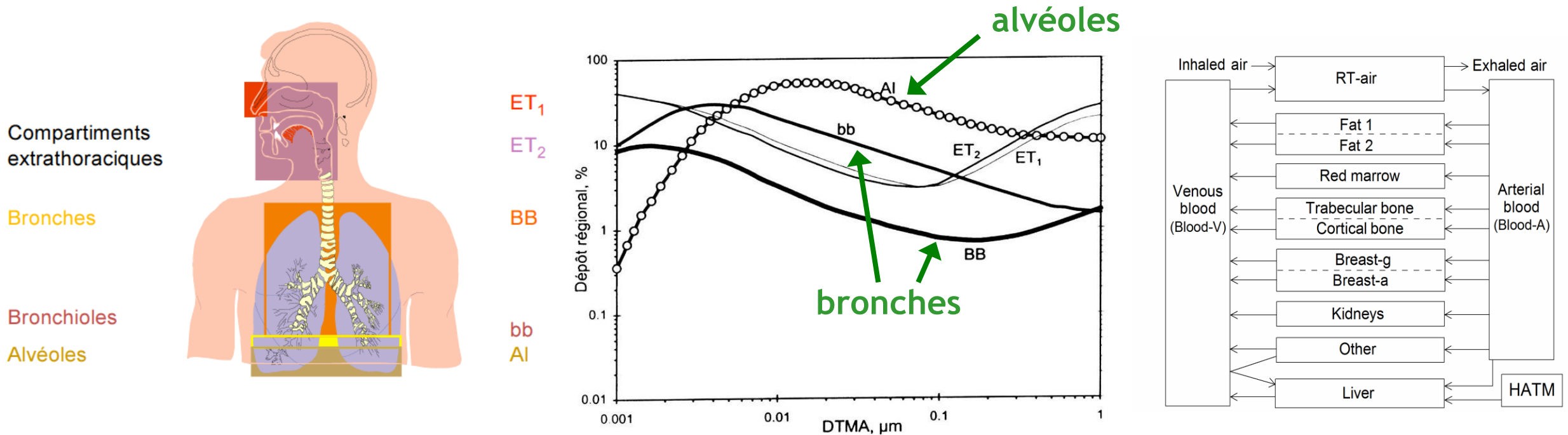
$$14 \times 10^{-2} / \text{J.h.m}^{-3} = 4,2 \times 10^{-2} / \text{Sv} \rightarrow 1 \text{ J.h.m}^{-3} / \text{Sv} = 14 \times 10^{-2} / 4,2 \times 10^{-2} \rightarrow 1 \text{ J.h.m}^{-3} = 3,3 \text{ Sv [travailleurs]}$$

$$14 \times 10^{-2} / \text{J.h.m}^{-3} = 5,7 \times 10^{-2} / \text{Sv} \rightarrow 1 \text{ J.h.m}^{-3} / \text{Sv} = 14 \times 10^{-2} / 5,7 \times 10^{-2} \rightarrow 1 \text{ J.h.m}^{-3} = 2,5 \text{ Sv [public]}$$

# APPROCHE DOSIMÉTRIQUE

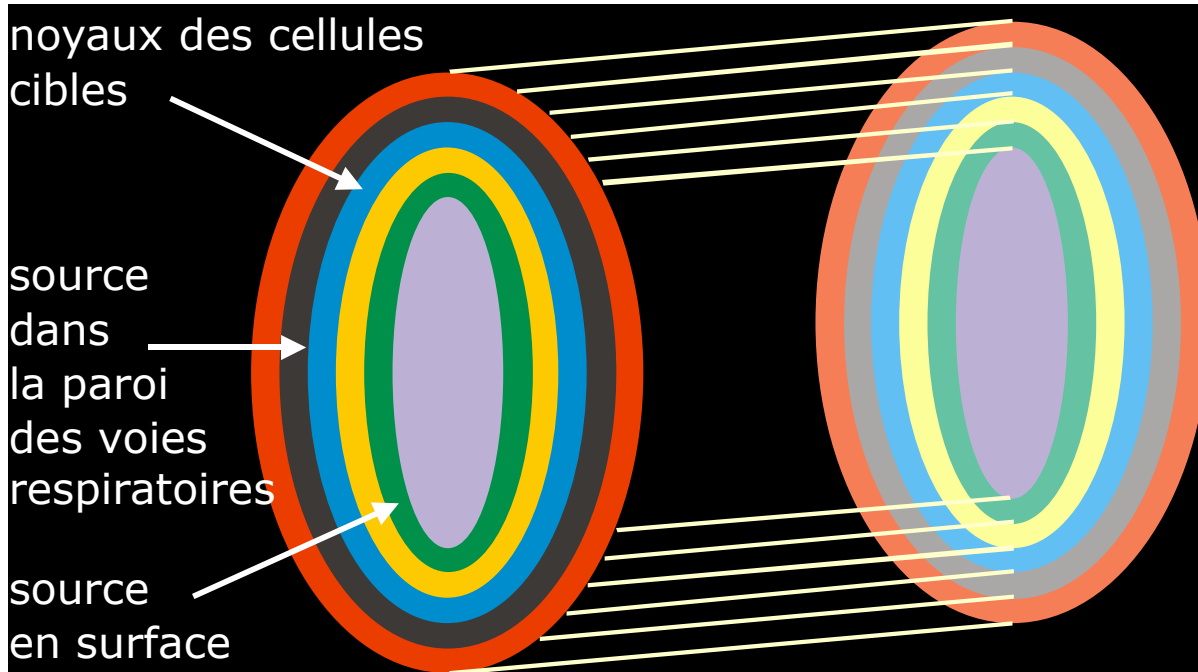
## RÉPARTITION DE L'ACTIVITÉ DANS LE CORPS HUMAIN

Le dépôt des aérosols inhalés dans les poumons est proportionnel au débit respiratoire et dépend de la taille des particules (**modèle respiratoire humain** de la publication CIPR 66).



Un **modèle systémique** (pub CIPR 137) décrit la distribution corporelle du gaz radon absorbé par le sang (contribution à la dose efficace  $\sim 5\%$ ).

# APPROCHE DOSIMÉTRIQUE



## Dose efficace

$$E = \sum_T w_T \times H_T \quad w_T (\text{poumon}) = 0,12$$

## SIMULATION MONTE-CARLO DES INTERACTIONS RAYONNEMENT - MATIÈRE

### Dose absorbée

$$D_{\text{région cible}} = \frac{\text{Energie déposée dans la région cible}}{\text{Masse de la région cible}}$$

### Dose équivalente aux régions du poumon

$$H_{\text{région cible}} = \sum_R w_R \times D_{R,\text{région cible}} \quad w_R (\alpha) = 20$$

### Dose équivalente au poumon

$$H_{\text{poumon}} = 1/3 \times H_{\text{bronches}} + 1/3 \times H_{\text{bronchioles}} + 1/3 \times H_{\text{alvéoles}}$$

# PUBLICATION CIPR 137

| APPROCHE<br>DOSIMÉTRIQUE | Activité de travail<br>en intérieur | Activité de travail<br>sédentaire en<br>intérieur | Mine                                | Grotte touristique                  |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Débit respiratoire       | 1,2 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> | 0,86 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>              | 1,2 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> | 1,2 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> |
| Facteur d'équilibre      | 0,4                                 | 0,4                                               | 0,2                                 | 0,4                                 |
| Fraction libre           | 8%                                  | 8%                                                | 1%                                  | 15%                                 |
| Dose efficace (Sv)       |                                     |                                                   |                                     |                                     |
| 1 J.h.m <sup>-3</sup>    | 5,7                                 | 4                                                 | 3,3                                 | 6,7                                 |

Bonne cohérence avec l’**approche épidémiologique (3,3 Sv par J.h.m<sup>-3</sup> pour les travailleurs)** et indication de situations pouvant conduire à une plus forte exposition en raison du débit respiratoire ou des caractéristiques de l’aérosol ambiant. Recommandation par la CIPR de valeurs arrondies à 3 et à 6 Sv par J.h.m<sup>-3</sup>.

# ARRÊTÉ DU 16 NOVEMBRE 2023

définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants

## III.3.1. Coefficient de dose applicable à la population

| Type de lieux                                  | Coefficient de dose pour les descendants du radon 222 applicable à la population (Sv/J.h.m <sup>-3</sup> ) |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Habitations, établissements recevant du public | 3                                                                                                          |

## III.3.2. Coefficients de dose applicables aux travailleurs exposés

| Type de lieux de travail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Coefficient de dose pour les descendants du radon 222 applicable aux travailleurs exposés (Sv/J.h.m <sup>-3</sup> ) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lieux de travail en intérieur où les travailleurs ont une activité majoritairement sédentaire (secteur tertiaire, bureaux...)                                                                                                                                                                                                                                            | 3                                                                                                                   |
| Lieux de travail en intérieur où les travailleurs ont une activité majoritairement non sédentaire (activité physique significative : travaux, maintenance, entretien...)                                                                                                                                                                                                 | 6                                                                                                                   |
| Concernant les lieux de travail spécifiques mentionnés au b) du 4° de l'article R. 4451-1 du code du travail, l'arrêté pris en application de l'article R. 4451-4 du même code dispose de modalités particulières pour le calcul de la dose efficace due au radon et peut définir des coefficients de dose applicables à certains types de lieux de travail spécifiques. |                                                                                                                     |

# EXEMPLES DE CALCUL DE DOSE RADON

## A PARTIR DE L'ÉNERGIE ALPHA POTENTIELLE VOLUMIQUE DES DESCENDANTS DU RADON 222

**Travailleur ayant une activité majoritairement sédentaire, en intérieur, exposé à 3,33 mJ.h.m<sup>-3</sup> pendant son année de travail**

$$\text{dose efficace annuelle} = 3,33 \text{ mJ.h.m}^{-3} \times 3 \text{ mSv}/(\text{mJ.h.m}^{-3}) = 10 \text{ mSv}$$

**Travailleur ayant une activité majoritairement non sédentaire, en intérieur, exposé à 3,33 mJ.h.m<sup>-3</sup> pendant son année de travail**

$$\text{dose efficace annuelle} = 3,33 \text{ mJ.h.m}^{-3} \times 6 \text{ mSv}/(\text{mJ.h.m}^{-3}) = 20 \text{ mSv}$$

# EXEMPLES DE CALCUL DE DOSE RADON

## A PARTIR DE L'ACTIVITÉ VOLUMIQUE DU GAZ RADON 222

**Travailleur ayant une activité majoritairement sédentaire 1607 heures par an, en intérieur à un poste (F = 0,4) où l'activité volumique moyenne du radon est de 300 Bq.m<sup>-3</sup>**

dose efficace annuelle =  $1607 \text{ h} \times 300 \text{ Bq.m}^{-3} \times 0,4 \times 5,56.10^{-9} \text{ J/Bq} \times 3 \text{ Sv/(J.h.m}^{-3}) \times 1000 \text{ mSv/Sv} = 3,2 \text{ mSv}$

**Travailleur ayant une activité majoritairement non sédentaire 1000 heures par an, en intérieur à un poste (F = 0,4) où l'activité volumique moyenne du radon est de 1000 Bq.m<sup>-3</sup>**

dose efficace annuelle =  $1000 \text{ h} \times 1000 \text{ Bq.m}^{-3} \times 0,4 \times 5,56.10^{-9} \text{ J/Bq} \times 6 \text{ Sv/(mJ.h.m}^{-3}) \times 1000 \text{ mSv/Sv} = 13 \text{ mSv}$

**Activité volumique du radon conduisant à une dose efficace de 6 mSv/an pour un travailleur ayant une activité majoritairement non sédentaire 1000 heures par an en intérieur (F = 0,4)**

activité volumique moyenne =  $6 \text{ mSv} / [(1000 \text{ h} \times 0,4 \times 5,56.10^{-9} \text{ J/Bq} \times 6 \text{ Sv/(J.h.m}^{-3}) \times 1000 \text{ mSv/Sv}] = 450 \text{ Bq/m}^3$



**MERCI**

---