



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Risques sanitaires liés au radon et à ses descendants

K. LEURAUD, IRSN, Laboratoire d'épidémiologie



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

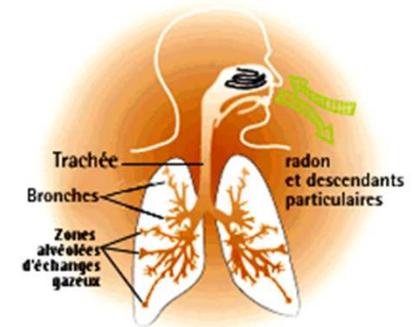
## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Mécanismes d'action du radon

- Inhalation du gaz radon
  - exposition interne au radon et à ses descendants
- Les radionucléides se distribuent dans le corps, principalement dans le poumon et accessoirement dans les autres organes, où ils se désintègrent en irradiant les tissus
- Les modèles dosimétriques montrent que
  - plus de 90 % de la dose reçue est délivrée au poumon
  - les doses aux autres organes sont beaucoup plus faibles (de l'ordre de 100 fois inférieures)





# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Radon : cancérigène pulmonaire

- Classé cancérigène pulmonaire certain par le Centre International de Recherche sur le Cancer en 1988
- IARC (1988) Man-made mineral fibres and radon. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum, 43: 1-300.*

IARC (1988) states that radon is a cause of lung cancer in humans, based on clear excess lung cancer rates consistently observed in underground miners, and elevated lung cancer risks seen in experimental animals exposed to radon.

## RADON

### 4.5 Evaluation<sup>1</sup>

There is *sufficient evidence* for the carcinogenicity of radon and its decay products in experimental animals.

There is *sufficient evidence* for the carcinogenicity of radon and its decay products in humans.

### Overall evaluation

Radon and its decay products *are carcinogenic to humans (Group 1).*





JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Les mineurs d'uranium

- 1567 Mortalité inhabituelle par maladies respiratoires chez les jeunes mineurs (*Mala Metallorum*, Paracelse)
- 1879 Maladies identifiées comme cancer des bronches
- 1898 Découverte du radium (Curie)
- 1924 Première évocation comme maladie professionnelle
- 1940 Inhalation du radon présentée comme cause possible (Planck)
- 1946 Début de l'extraction intensive de l'uranium en France
- 1955 Premières mesures de radioprotection en France  
→ *Diminution des niveaux d'exposition au radon et à ses descendants*
- 1960 Lancement des premières études épidémiologiques chez les mineurs
- 1988 Radon classé comme cancérigène pulmonaire certain chez l'homme**



Photographie de P. C. Guillaud



# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

### 1999 : Etude conjointe internationale de 11 cohortes de mineurs (BEIR)

Etude	Pays	Type de mine	Période de suivi	N mineurs	Personnes-années	Décès par cancer du poumon	Exposition cumulée au radon (WLM)	ERR /100 WLM
Yunnan	Chine	Etain	1976-1987	13 649	134 842	936	286,0	0,17
W-Bohemia	R. Tchèque	Uranium	1952-1990	4 320	102 650	701	196,8	0,67
Colorado	USA	Uranium	1950-1990	3 347	79 556	334	578,6	0,44
Ontario	Canada	Uranium	1955-1986	21 346	300 608	285	31,0	0,82
Newfoundland	Canada	Fluorine	1950-1984	1 751	33 795	112	388,4	0,82
Malmberget	Suède	Fer	1951-1991	1 294	32 452	79	80,6	1,04
New Mexico	USA	Uranium	1943-1985	3 457	46 800	68	110,9	1,58
Beaverlodge	Canada	Uranium	1950-1980	6 895	67 080	56	21,2	2,33
Port Radium	Canada	Uranium	1950-1980	1 420	31 454	39	243,0	0,24
Radium Hill	Australie	Uranium	1948-1987	1 457	24 138	31	7,6	2,75
CEA-Cogema	France	Uranium	1948-1986	1 769	39 172	45	59,4	0,51
<b>TOTAL</b>			<b>1943-1991</b>	<b>60 606</b>	<b>888 906</b>	<b>2 674</b>	<b>164,4</b>	<b>0,59</b>



**Augmentation d'environ 6 % du risque de cancer pulmonaire pour 100 mSv**

**1 WLM = 10 mSv (travailleurs) d'après la publication CIPR 137 (2018)**

Working Level Month : unité d'exposition au radon (concentration × temps de travail)

1 WLM = 170 heures de travail dans une ambiance de 1 WL soit 3,5 mJ.h.m<sup>-3</sup>



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

IRSN  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

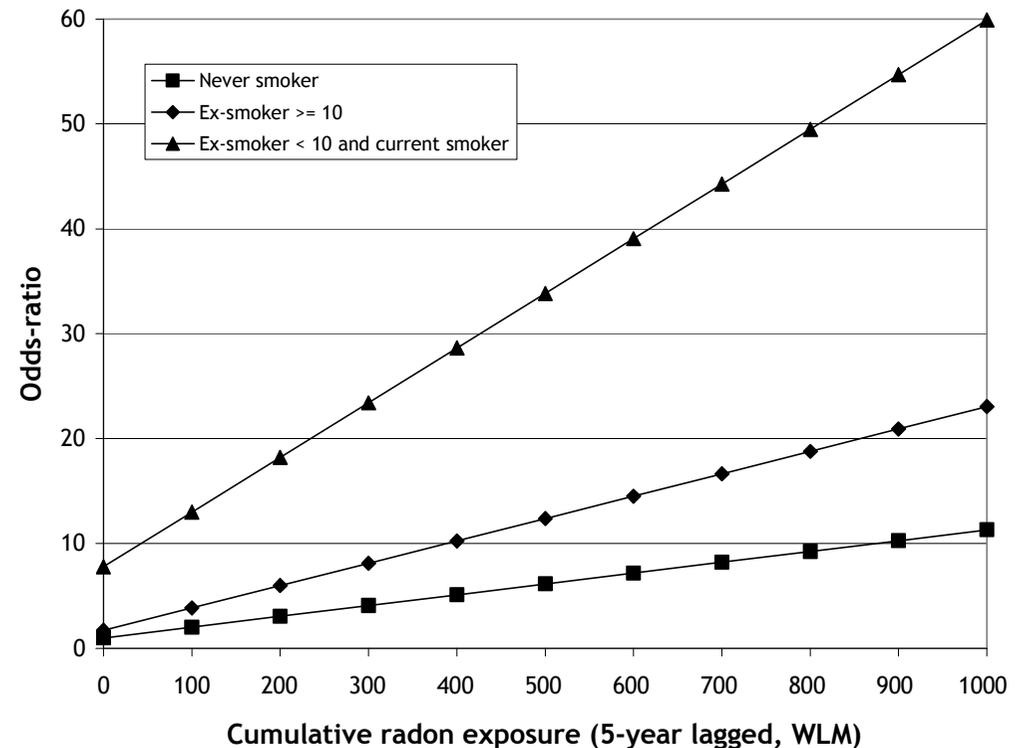
inrs  
Institut National de Recherche et de Sécurité



## Etude conjointe européenne française, allemande, tchèque

[Leuraud et al, Rad Res 2011]

- Etude cas-témoins nichée
  - 1 236 cas (cancers du poumon)
  - 2 678 témoins
- Relation entre l'exposition au radon et le risque de cancer du poumon en ajustant sur le tabagisme



- Relation avec le radon persiste après prise en compte du tabac
- Risque augmente dans chaque catégorie de tabagisme



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON

### Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Etudes sur les mineurs d'uranium : cancer du poumon

- Résultat bien établi : augmentation du risque de décès par cancer pulmonaire avec l'exposition cumulée au radon
- Radon classé comme cancérigène pulmonaire certain chez l'humain en 1988 par le Centre International de Recherche sur le Cancer (OMS)
- Ces résultats sont notamment confortés par les études cas-témoins qui ont pris en compte le tabac dans l'étude de la relation cancer du poumon/radon
  - **Persistance du risque associé au radon**
- D'autres facteurs de confusion potentiels ont été pris en compte
  - exposition à la silice, à l'arsenic, aux particules de diesel
  - radiographies pulmonaires dans le cadre de la surveillance médicale professionnelle annuelle (France)
  - Prise en compte d'erreurs de mesure
  - **Persistance du risque associé au radon**



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

### Etudes sur les mineurs d'uranium : autres pathologies

- Des questions se posent pour certaines localisations cancéreuses autres que le poumon mais les preuves sont moins claires : leucémie, voies aériennes extra-thoraciques, estomac
- Autres maladies : cérébro-vasculaires
  - relation significative en France, non significative en Allemagne
- Il reste encore des questionnements sur ces études
  - Absence de cohérence entre les résultats issus des différentes cohortes
  - Nécessité de conduire des études de large envergure



# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Etudes sur les mineurs d'uranium : leucémie

- Cohorte des mineurs d'uranium de la WISMUT (allemands) : 58 972 mineurs
- Risque de leucémie associé aux rayonnements à faible transfert d'énergie linéique (incluent les rayonnements gamma)

Cause de décès	WISMUT (low-LET)			INWORKS		
	No de décès	ERR/Gy	(90%-IC)	No de décès	ERR/Gy	(90%-IC)
Leucémie non lymphoïde chronique	120	2.18	(-0.41; 6.37)	531	2.96	(1.17–5.21)
Leucémie myéloïde chronique	31	7.2	(0.5; 20.5)	100	10.45	(4.48–19.65)
Leucémie myéloïde aiguë	60	0.5	(<0; 6.0)	254	1.29	(-0.82–4.28)
Leucémie lymphoïde chronique	70	-1.0	(<0; 2.1)	138	-1.06	(ne–1.81)

IC : intervalle de confiance

*[Kreuzer et al, Occup Environ Med 2017]*

- A ce jour, pas de relation établie entre exposition au radon et leucémie chez l'adulte



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Etudes sur les mineurs d'uranium : perspectives

- Une nouvelle étude internationale PUMA
- Larges effectifs
- Durée de suivi plus longue
- Prise en compte des différentes expositions radiologiques dans les mines
- Etude d'un large spectre de maladies



Pays, étude	Mineurs	Période de suivi
Canada, Ontario	28 546	1954-2007
Canada, Eldorado, hommes	13 574	1950-1999
femmes	1073	1950-1999
République tchèque	9978	1952-2014
France	5086	1946-2007
Allemagne, Wismut, hommes	54 919	1946-2013
femmes	3725	1951-2013
USA, Colorado Plateau	4137	1960-2005
USA, New Mexico	3469	1957-2012
<b>PUMA</b>	<b>124 507</b>	<b>1946-2013</b>



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Radon domestique et cancer du poumon

- Etudes cas-témoins radon/cancer du poumon
- Objectif
  - déterminer si le risque de cancer du poumon est associé à l'exposition domestique au radon
- Protocole : études cas-témoins
  - reconstruction de l'exposition domestique au radon
  - reconstruction de l'historique tabagique
  - autres facteurs de risque





## LE RISQUE RADON

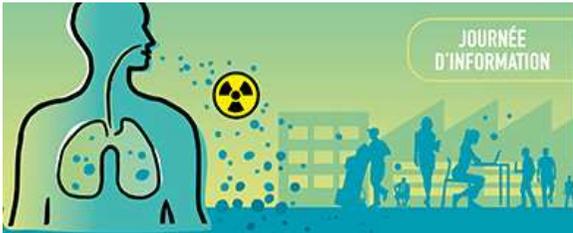
### Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Radon domestique et cancer du poumon

- Etude cas-témoins européenne : 9 pays, 13 études
- protocole standardisé
  - critères d'inclusion identiques, questionnaire commun, reconstruction de l'exposition domestique sur 30 ans, inter-comparaison des méthodes de mesure
- 7 148 cas / 14 208 témoins
- analyse conjointe des données individuelles
  - données détaillées sur les habitudes tabagiques
- **Concentration moyenne dans l'habitat des cas :** **104 Bq/m<sup>3</sup>**
- **Concentration moyenne dans l'habitat des témoins :** **97 Bq/m<sup>3</sup>**



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

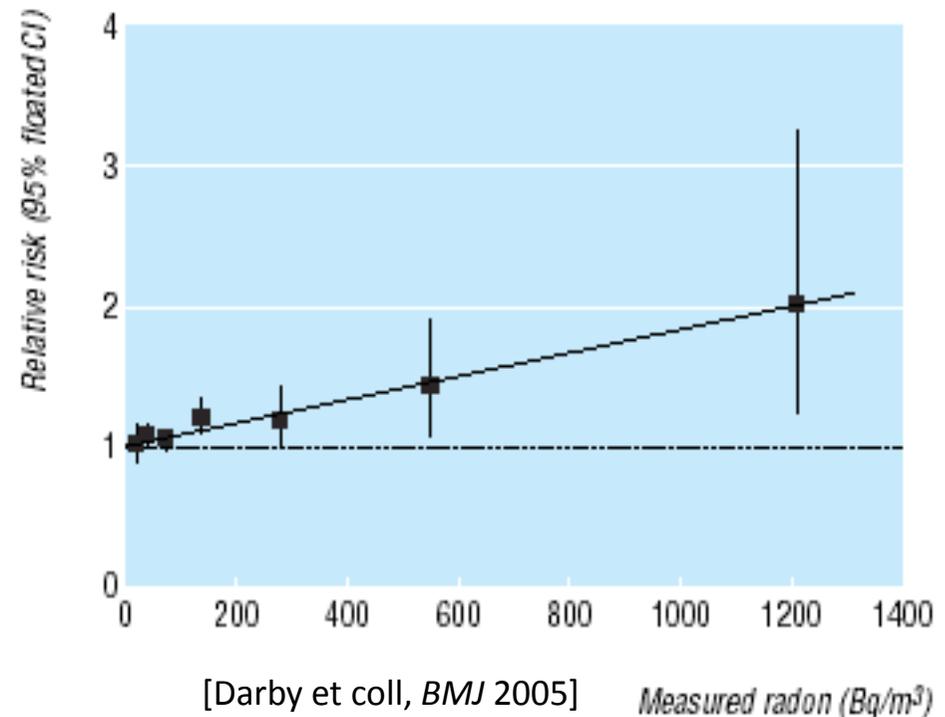
# Radon domestique et cancer du poumon

- Augmentation du risque de cancer du poumon avec la concentration en radon

**RR = 1.16 pour 100 Bq/m<sup>3</sup>**

**IC95% = [1.03 ; 1.16]**

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





JOURNÉE  
D'INFORMATION

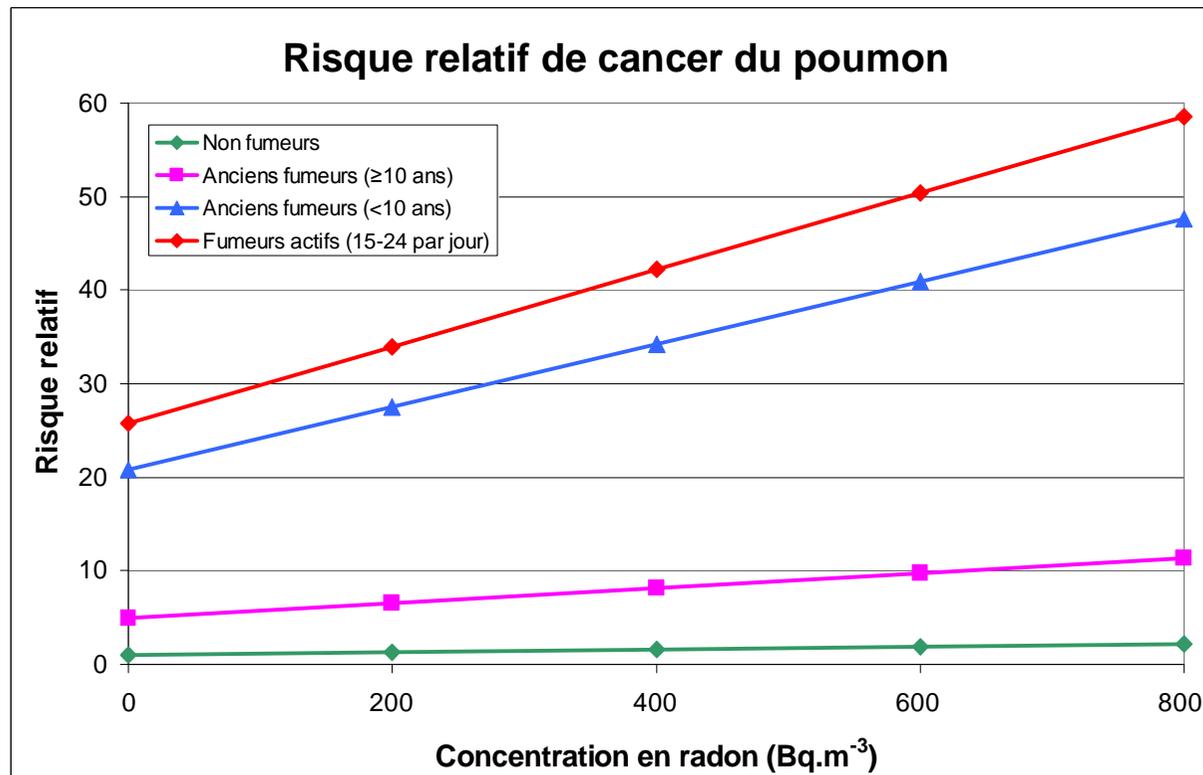
# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Radon domestique et cancer du poumon : effets conjoints du radon et du tabac



D'après [Darby et coll, Scand J Work Environ Health 2006]



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON

### Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# Radon domestique et cancer du poumon : effets conjoints du radon et du tabac sur la vie entière

## Risque absolu de décès par cancer du poumon à 75 ans

	Concentration de radon (Bq.m <sup>-3</sup> )			
	0	100	400	800
Non fumeur	0.4 %	0.5 %	0.7%	0.9 %
Fumeur	10 %	12 %	16 %	22%

[Darby et coll, BMJ 2005]



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON

### Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Radon domestique et cancer du poumon : apports

- Preuve claire d'une association : après une stratification détaillée sur le statut tabagique, le risque de cancer du poumon augmente avec la concentration en radon
- $RR = 1.16$  pour  $100 \text{ Bq/m}^3$ ,  $IC95\% = [1.05 ; 1.31]$  après prise en compte des incertitudes liées aux estimations des concentrations en radon
- La relation dose-réponse semble être linéaire, sans élément en faveur de l'existence d'un seuil



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Comparaison radon domestique/mines

### Cancer du poumon et radon

Etude		Cas / Témoins	RR/100 Bq.m <sup>-3</sup>	IC <sub>95%</sub>
<b>Mineurs</b>	BEIR VI, 1999		1,12	1,02-1,25
<b>Etude Européenne</b>	Darby et al., BMJ 2005	7148 / 14 208	1,16	1,05-1,31
<b>Etude Nord-Américaine</b>	Krewski et al., J Toxicol Environ Health 2006	3662 / 4966	1,10	0,99-1,26
<b>Etude Chinoise</b>	Lubin et al., Int J Cancer 2004	1050 / 1995	1,33	1,01-1,36

Conversion entre WLM et Bq/m<sup>3</sup>×durée, 1 WLM ↔ 1 an dans une maison à 230 Bq/m<sup>3</sup>

- Bonne cohérence des résultats mineurs et population générale



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON

### Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Conclusion sur les risques sanitaires liés au radon

- Augmentation du risque de cancer du poumon avec la concentration moyenne de radon
  - Augmentation du risque relatif  $\approx 10\%$  à  $15\%$  par  $100\text{ Bq/m}^3$
  - Pas d'évidence d'une augmentation du risque autre que cancer du poumon (mais interrogations croissantes)
- Accroissement du risque pour les fumeurs comme pour les non-fumeurs
- Nombreux résultats récents : augmentation (+ 80 %) de l'estimation du risque de cancer du poumon vie entière
- Nouvelles recommandations de niveaux d'action (CIPR)
- L'évaluation du risque radon fournit des éléments d'information pour la détermination des plans d'action contre le radon



JOURNÉE  
D'INFORMATION

# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Evaluation quantitative du risque de cancer du poumon en France métropolitaine

→ Estimer le nombre de décès par cancer du poumon attribuables à l'exposition au radon domestique

### 1 Identification de la population

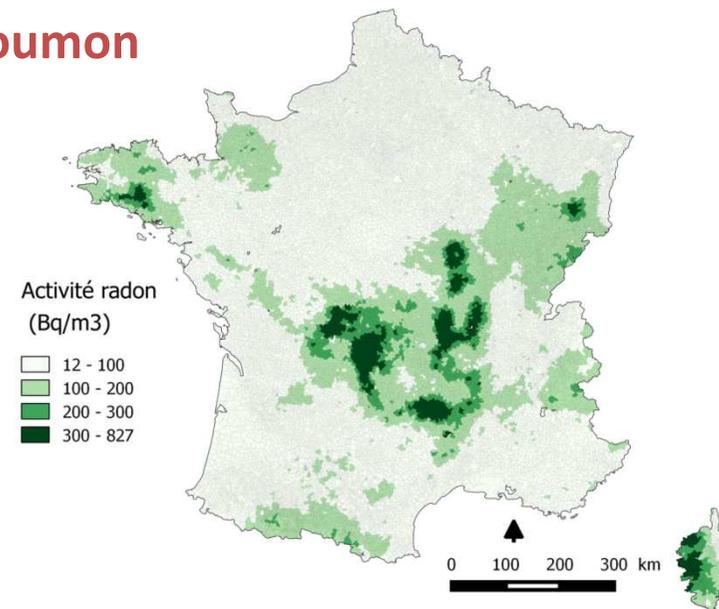
- Recensement (Insee 2012)
- Taux de mortalité (CépiDC, Inserm 2008-2012)
- Pourcentages de fumeurs (Inpes 2014)

### 2 Estimation de l'exposition au radon domestique

- Campagne de mesures (IRSN 2012)

### 3 Choix du modèle de relation exposition-risque

- Études sur la population générale (Darby 2005)
- ERR = 0,16 par 100 Bq.m<sup>-3</sup> sur une durée de 30 ans



Sources : IGN-Géofla 2013, IRSN 2012, Insee 2012 - © IRSN 2017

### Concentration moyenne en radon

Brute : **92 Bq.m<sup>-3</sup>**

Pondérée sur la population : **69 Bq.m<sup>-3</sup>**



JOURNÉE  
D'INFORMATION

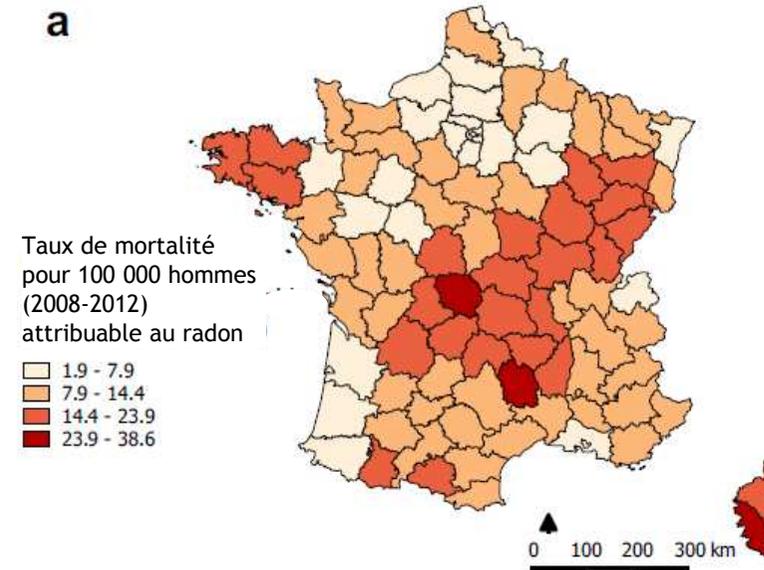
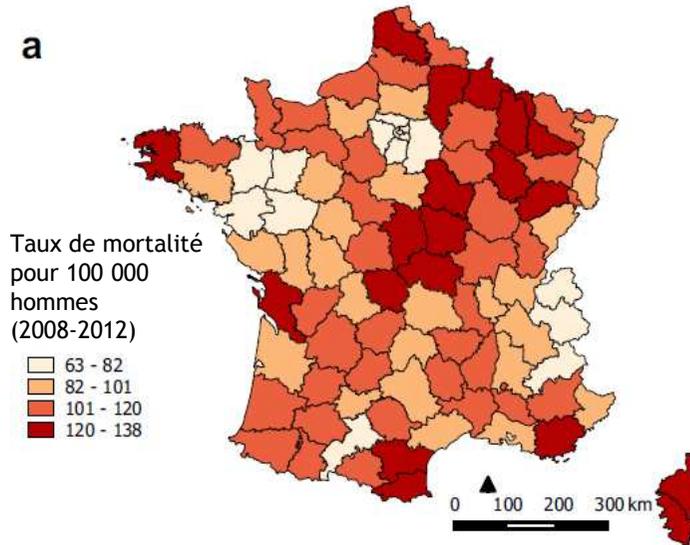
# LE RISQUE RADON

## Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Cancers du poumon en France métropolitaine



### Nombre de décès moyen

Total : **29 690**

#### Hommes

**22 230**

(75 %)

#### Femmes

**7 459**

(25 %)

### Nombre de décès attribuables

Total : **2 924** [1 007 - 5 069]

sur 29 690 observés en France

#### Hommes

**2 199**

[757 - 3 811]

#### Femmes

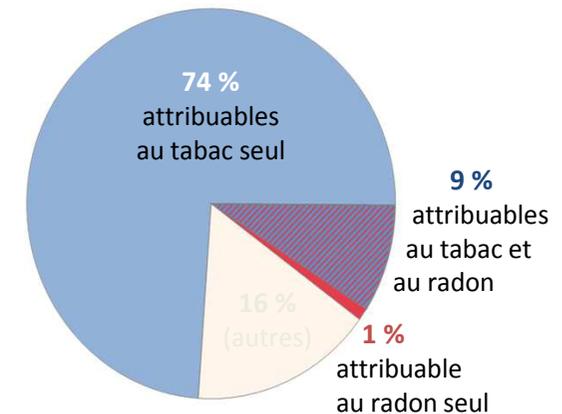
**725**

[250 - 1 258]



## Evaluation d'impact sanitaire du radon : conclusion

- Le **nombre annuel de décès par cancer du poumon attribuables** à l'exposition domestique au radon en France métropolitaine est de **3 000 [1 000 - 5 000]**, ce qui correspond à une **fraction attribuable de 10 % [3 - 17]**
- Parmi ce nombre de décès estimé, 66 % surviendraient pour des expositions  $\leq 100$  Bq.m<sup>-3</sup>  
→ ceci concernerait 84 % de la population française et 71 % des communes
- La prise en compte de la consommation tabagique montre que :
  - **le nombre de décès est  $\approx 3$  fois plus élevé chez les fumeurs actuels**
  - **20 % des décès attribuables au radon surviendraient chez des anciens fumeurs et 5 % chez des personnes qui n'ont jamais fumé**



Décès par cancer du poumon



JOURNÉE  
D'INFORMATION

## LE RISQUE RADON Quelle prévention en milieu professionnel ?

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

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

# 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



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



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

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



# LE RISQUE RADON

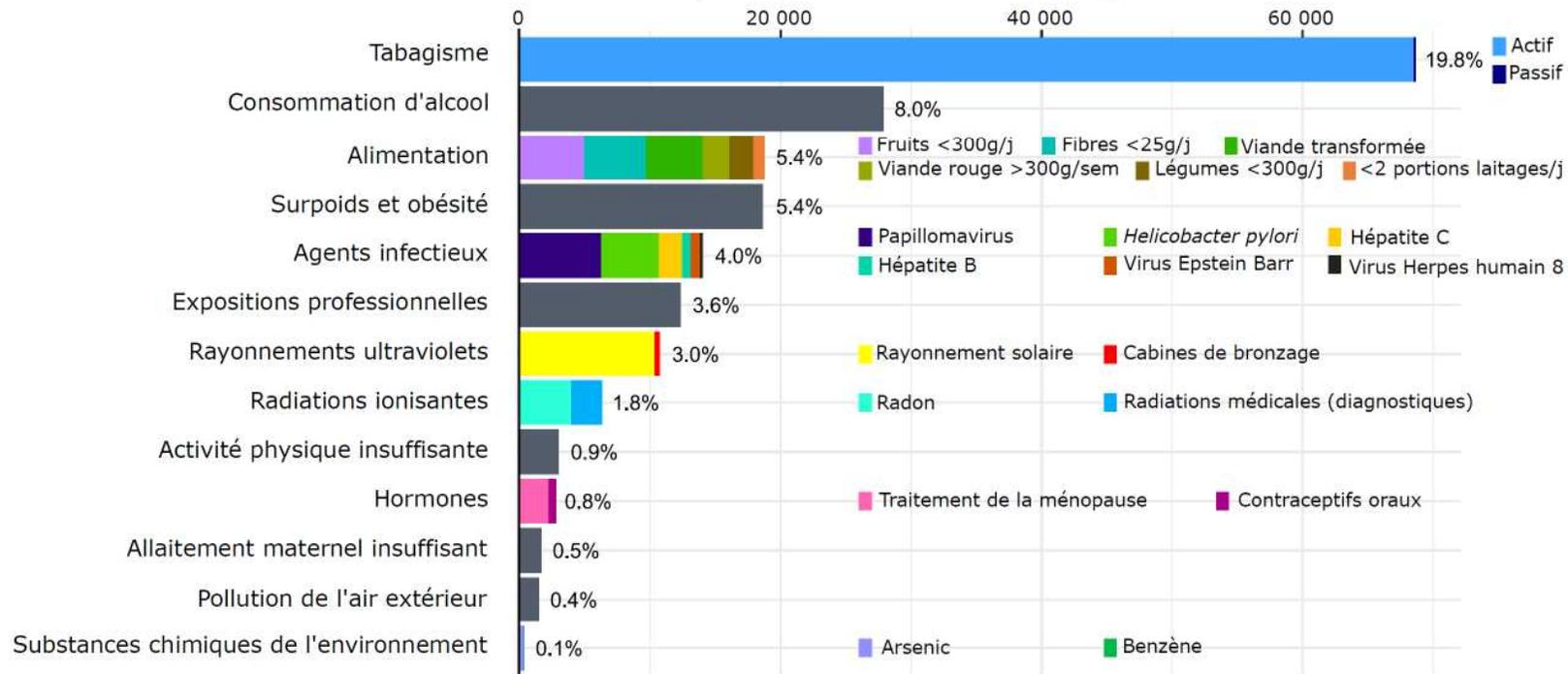
## Quelle prévention en milieu professionnel ?

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

**inrs**  
Institut National de Recherche et de Sécurité

## Nombre de nouveaux cas de cancer attribuables aux facteurs liés au mode de vie et à l'environnement en France en 2015 parmi les adultes de 30 ans et plus

Nombre de nouveaux cas de cancer attribuables au mode de vie et à l'environnement en France en 2015 parmi les adultes de 30 ans et plus



Centre international de Recherche sur le Cancer



Source: IARC (2018). Les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France métropolitaine.  
Lyon: International Agency for Research on Cancer. All rights reserved.

