



# Le radon : ce gaz sournois et pernicious

*Dr Delphine BREIL (médecin du travail, Brest)*

**J21** Quimper  
26 et 27  
septembre  
2024



- 
- 1 Propriétés**
  - 2 Epidémiologie des effets différés de l'exposition**
  - 3 Gestion du risque**
  - 4 Suivi médical en santé au travail**

# 1 Propriétés du radon



# 1 – Gaz radioactif d'origine naturelle

- Issu de la désintégration de l'uranium et du thorium des sols riches en roches uranifères
- Incolore, inodore
- Qui s'accumule dans les espaces clos
- 8 fois plus dense que l'air
- Gaz rare (tableau périodique de Mendeleïev)



# 1 – Répartition inégale

- 3 zones à potentiel radon (Art R1333-29 du CSP)
- zone 3 - potentiel radon significatif

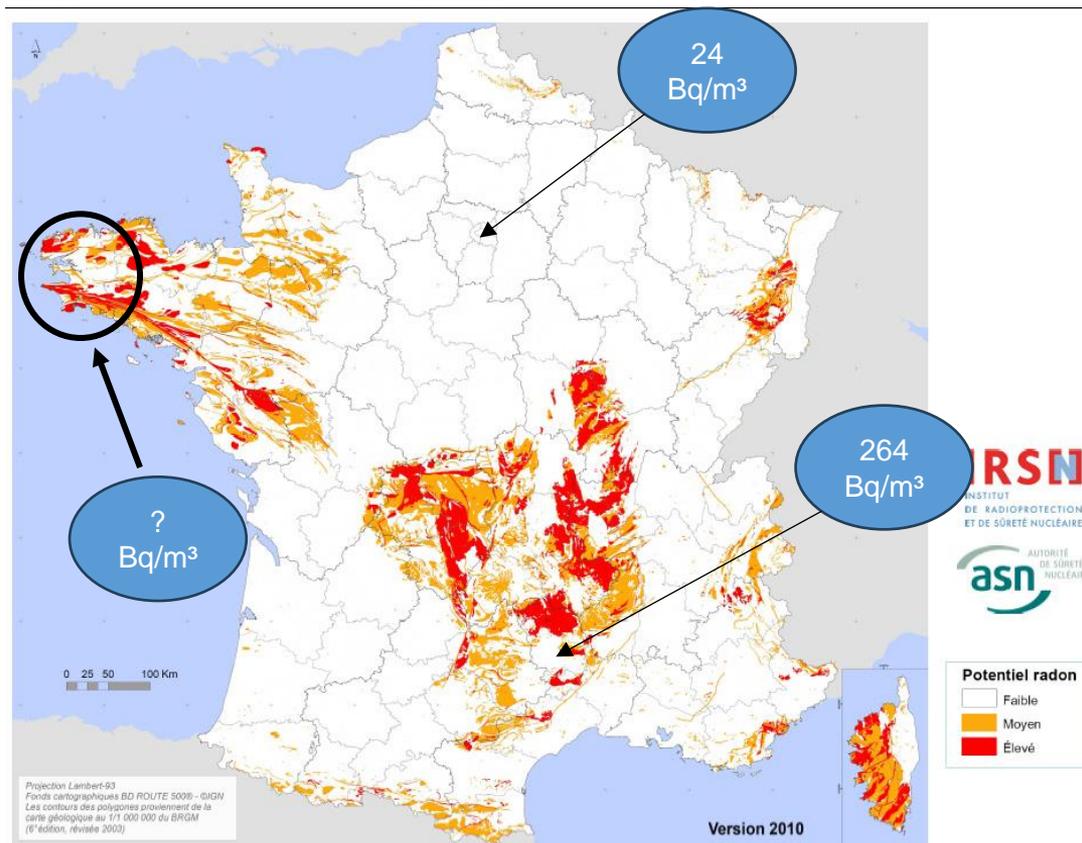


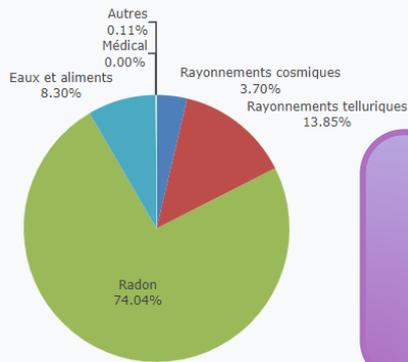
Figure 1 : Carte du potentiel radon des formations géologiques à l'échelle 1:1 000 000, version 2010

# 1 - Exposition chronique au radon, sur la vie entière, de toute la population

- Exposition interne par inhalation
- 1/3 de la dose annuelle de la radioactivité non professionnelle en moyenne
  - Zone 3 : 6-10 mSv/an

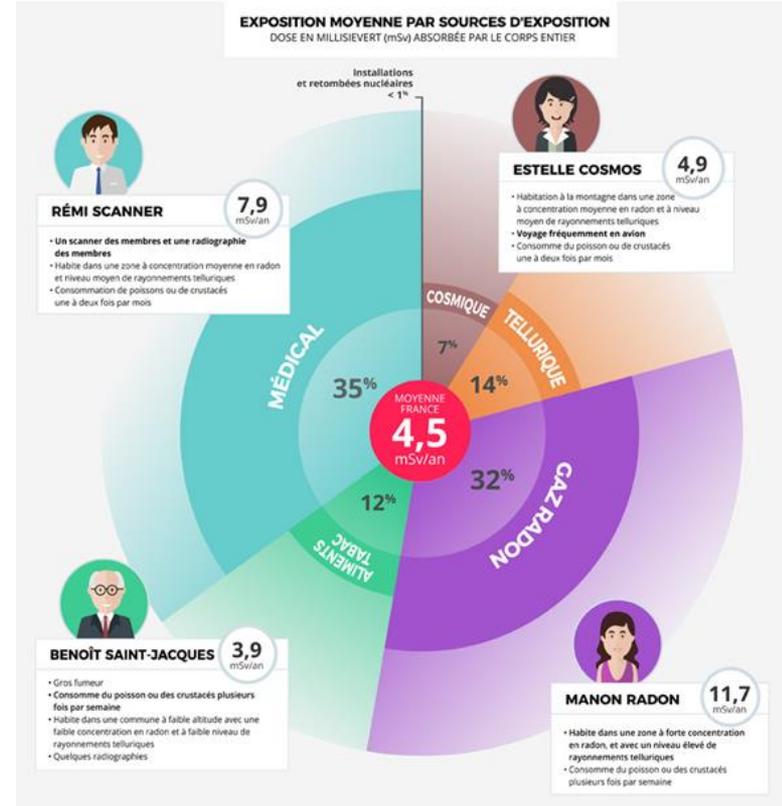
Votre exposition annuelle est estimée à 8.1 mSv

Composantes de votre exposition



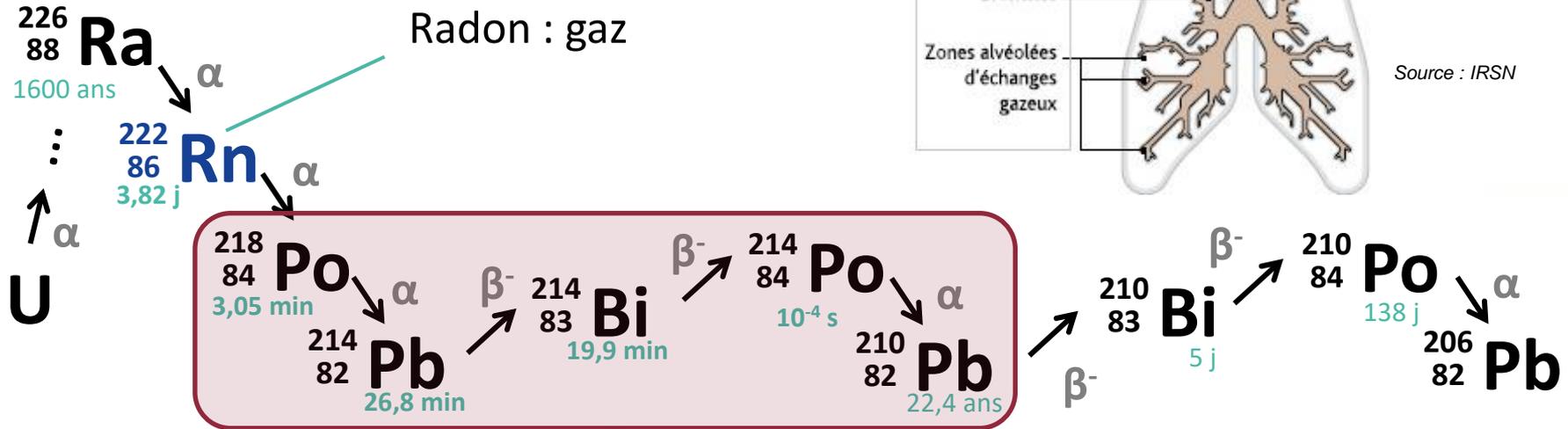
Quimper  
Maison individuelle  
Produits de la mer  
1-2 fois/mois  
Pas d'imagerie, pas de  
vol aérien, non fumeur

<https://expop.irsn.fr/>



# 1 – Désintégration du radon (Rn)

- Emet une particule  $\alpha$  (2N, 2P)
- Crée des descendants radioactifs solides (Po218, Pb214, Bi214, Po214) pouvant se fixer dans les poumons
- Ensemble, ils forment l'Energie Alpha Potentielle (EAP), donnant la dose Rn



Descendants du radon : solides  
→ 90% de la dose

# 1 – Distribution des radionucléides

- Principalement dans le poumon
  - Accessoirement dans les autres organes
- Désintégration en émettant des particules  $\alpha$ 
  - particule fortement ionisante sur une courte distance et qui dépose toute son énergie au contact des cellules, bronchiques notamment
- Irradiant les tissus
  
- Modèles dosimétriques montrent
  - 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)
  
- Néanmoins, une part de cette dose peut être délivrée à la moelle osseuse



## 2 Epidémiologie des effets différés de l'exposition au radon

Le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le radon comme cancérigène avéré pour le cancer du poumon (Groupe 1) en 1988

## 2 - Etudes de cohorte de mineurs

Etude conjointe internationale de 11 cohortes de mineurs (BEIR VI 1999)

Augmentation d'environ 6% du risque de CBP pour une exposition cumulée au radon de 100mSv

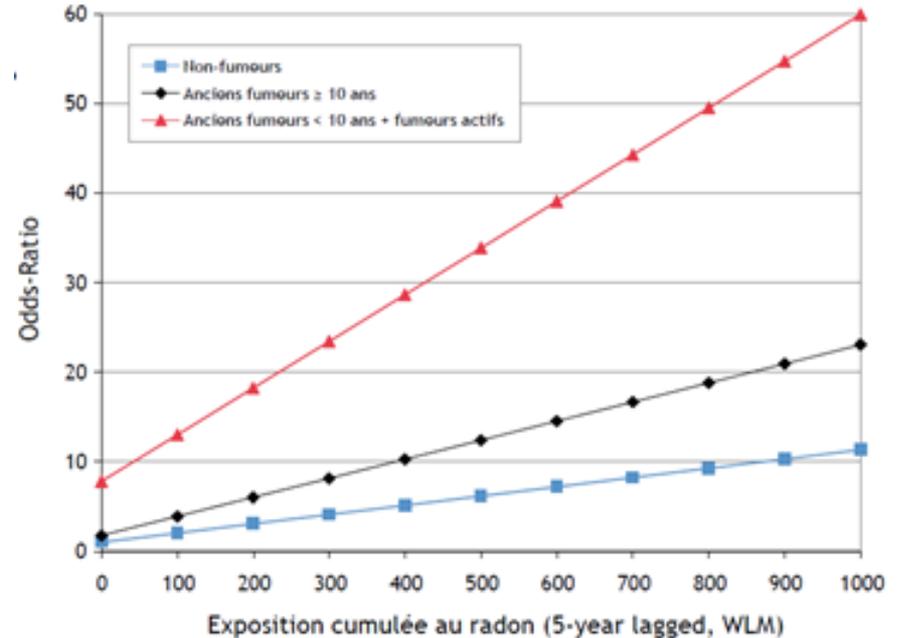
Etude	Pays	Type de mine	Période de suivi	N mineurs	Personnes-années	Décès par cancer du poumon	Exposition cumulée au radon (WLM)	ERR /100 WLM
Yunnan	Chine	Etain	1976-1987	13 649	134 842	936	286,0	0,17
W-Bohemia	R. Tchèque	Uranium	1952-1990	4 320	102 650	701	196,8	0,67
Colorado	USA	Uranium	1950-1990	3 347	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>

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

1 WLM = 170 heures de travail dans une ambiance de 1 WL soit 3,5 mJ.h/m<sup>3</sup> correspond à 10 mSv (travailleurs) d'après la publication CIPR 137

## 2 - Relation radon-tabac : projet européen Alpha-Risk (1/2)

- 3 cohortes de mineurs d'uranium (France, Allemagne, Rép. Tchèque)
- Relation entre exposition au radon et risque de CBP (en ajustant sur le tabagisme en 3 sous-groupes)
  - Non fumeur
  - Ex-fumeur  $\geq 10$  ans
  - Fumeur actif et ex-fumeur  $< 10$  ans



➔ Persistance du risque après prise en compte du tabac dans chaque sous-groupe

- Grande étude cas-témoins chez les mineurs d'uranium
  - Permettant la prise en compte du tabac dans l'analyse de la relation entre CBP et exposition professionnelle au radon
  - Effectifs suffisants pour calculer leur interaction
    - Interaction sub-multiplicative du radon et du tabac, se situant entre les effets additifs et multiplicatifs
- Analyses possibles sur des intervalles de doses restreints
  - Un effet significatif du radon (après ajustement sur le tabac) pour des expositions inférieures à 50 WLM

# 2 - Principaux résultats, de l'étude internationale BEIR VI à nos jours



Photo PC Guiollard

- **Excès de mortalité par CBP chez les mineurs**
- **Relation radon-risque de CBP**
  - Après ajustement sur le tabac, prise en compte des erreurs de mesure et des facteurs de confusion potentiels
  - Même chez les mineurs faiblement exposés (*Hunter et al, Health Phys 2013; Kreuzer et al, Br J Cancer 2015*)
  - Augmentation significative du risque de cancer du poumon associé à l'exposition cumulée au radon (*Rage et al. Intern Arch Occup Envir Health 2015*)
    - RR de 1,71 pour 100WLM
  - Diminution du risque avec le délai depuis la fin de l'exposition (*Lane et al. Intern Arch Occup Envir Health 2019*)
- **Contribution majoritaire du radon à la dose au poumon** (par rapport au rayonnement gamma et aux poussières d'uranium)
- **Interrogations** sur l'augmentation du risque de leucémie et de maladies de l'appareil circulatoire (*Kreuzer et al, Occ Environ Med 2017, Drubay et al, Radiat Res 2015*)

## 2 – Perspectives : étude PUMA (Pooled Uranium Miners Analysis)

### Etude internationale initiée en 2015

- **Améliorer l'estimation des risques de mortalité associés principalement à l'exposition au radon chez les mineurs d'uranium**
  - En augmentant la puissance statistique
- **Suivi à long-terme dans les périodes les plus récentes**
  - Meilleure estimation de l'exposition au radon, avec des expositions à de faibles niveaux
- **Prise en compte des différentes expositions radiologiques dans les mines et des différents niveaux d'exposition**

Pays, étude	Workers	Period of Follow-up
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>

## 2 – Etude PUMA : plusieurs objectifs

- Comparer les causes de décès chez les mineurs / à la population générale
- Etudier le risque de CBP pour de faibles niveaux d'exposition au radon et de faibles débits de dose
  - Contribuer à l'alimentation des normes de radioprotection
  - Renforcer les connaissances sur les expositions à faibles niveaux de radon



approchant les expositions domestiques au radon

- Etudier les effets combinés du radon et du tabac sur le risque de décès par CBP
- Etudier les relations entre l'exposition au radon et risque de décès
  - Cancer non pulmonaire (cancers des voies extra-thoracique, organes digestifs)
  - Cancer hématologique
  - Maladie de l'appareil circulatoire
  - Maladie de l'appareil respiratoire
- Estimer le risque vie entière pour le CBP associé à l'exposition cumulée au radon

## 2 - Etude PUMA : premières analyses

- **Profil de la cohorte** (*Rage et al., Occup Environ Med 2020*)
  - Selon les cohortes, les mineurs étaient suivis en moyenne 30 à 39 ans (début de suivi entre 1946 et 1960 - fin de suivi entre 2005 et 2014)
  - Exposés à des niveaux variables de radon, de 31 WLM à 579 WLM en moyenne cumulée
  - 44 % des mineurs étaient décédés
    - 17 085 par cancer dont 7 825 par CBP
    - 18 416 décès par maladie non cancéreuse de l'appareil circulatoire
    - 4 621 décès par maladie non cancéreuse de l'appareil respiratoire
- **Premières analyses de mortalité** (*Richardson et al., Int J Epidemiol 2021*)
  - Excès significatif de mortalité, par rapport à la population générale, par cancer du poumon (n = 7756, SMR = 1.90; 95% [1.86, 1.94]), cancer de l'estomac, cancer du foie et par silicose
  - Aucun excès de décès par leucémie, cancer du rein ou maladie pulmonaire chronique obstructive
- **Risques associés ou non avec l'exposition cumulée au radon ?**
  - A suivre ...

## 2 - Résultats concordants en population générale

- **3 000 [1 000-5 000] décès par CBP attribuables à l'exposition domestique au radon en France métropolitaine**
  - Correspondant à une **fraction attribuable de 10%** [3-17]
- Prise en compte de la consommation tabagique montre que parmi les décès attribuables au radon
  - 75% surviendraient chez des fumeurs actuels et 20 % chez des anciens fumeurs
  - 5 % chez des personnes qui n'ont jamais fumé
- Parmi ce nombre de décès estimé, 66 % surviendraient pour des expositions  $\leq 100$  Bq/m<sup>3</sup>
  - Concernerait 84 % de la population française et 71 % des communes

Décès par cancer du poumon



## 2 – Nouveaux projets d'étude

- **Projet européen RadoNorm (lancée en 2020)**
  - Améliorer les connaissances sur les effets de l'exposition chronique à des faibles doses de rayonnements (radon et autres matériaux présentant un niveau accru de radioactivité naturelle (NORM))
  - Promouvoir des mesures (travailleurs, population générale) de maîtrise de risque face à ces rayonnements
- **Etude européenne Bioradon (lancée en 2022)**
  - Etude prospective
  - Analyser la corrélation entre l'exposition au radon et les profils moléculaires (mutations) des patients atteints d'un CBP non à petites cellules



# 3 Gestion du risque radon

# 3 - Dispositions réglementaires du code du travail

## (évolution 2018 puis 2024)

- **Dispositions graduées selon le niveau de risque**

- Gestion des lieux de travail tenant compte des concentrations mesurées par rapport au niveau de référence
  - Réduit de 400 de 300 Bq/m<sup>3</sup> (activité volumique annuelle moyenne)
- Dispositif de protection des travailleurs renforcé en cas de présence de «zones radon»
  - Zones où l'exposition de travailleurs à temps complet est susceptible de conduire à une dose annuelle > 6 mSv/an

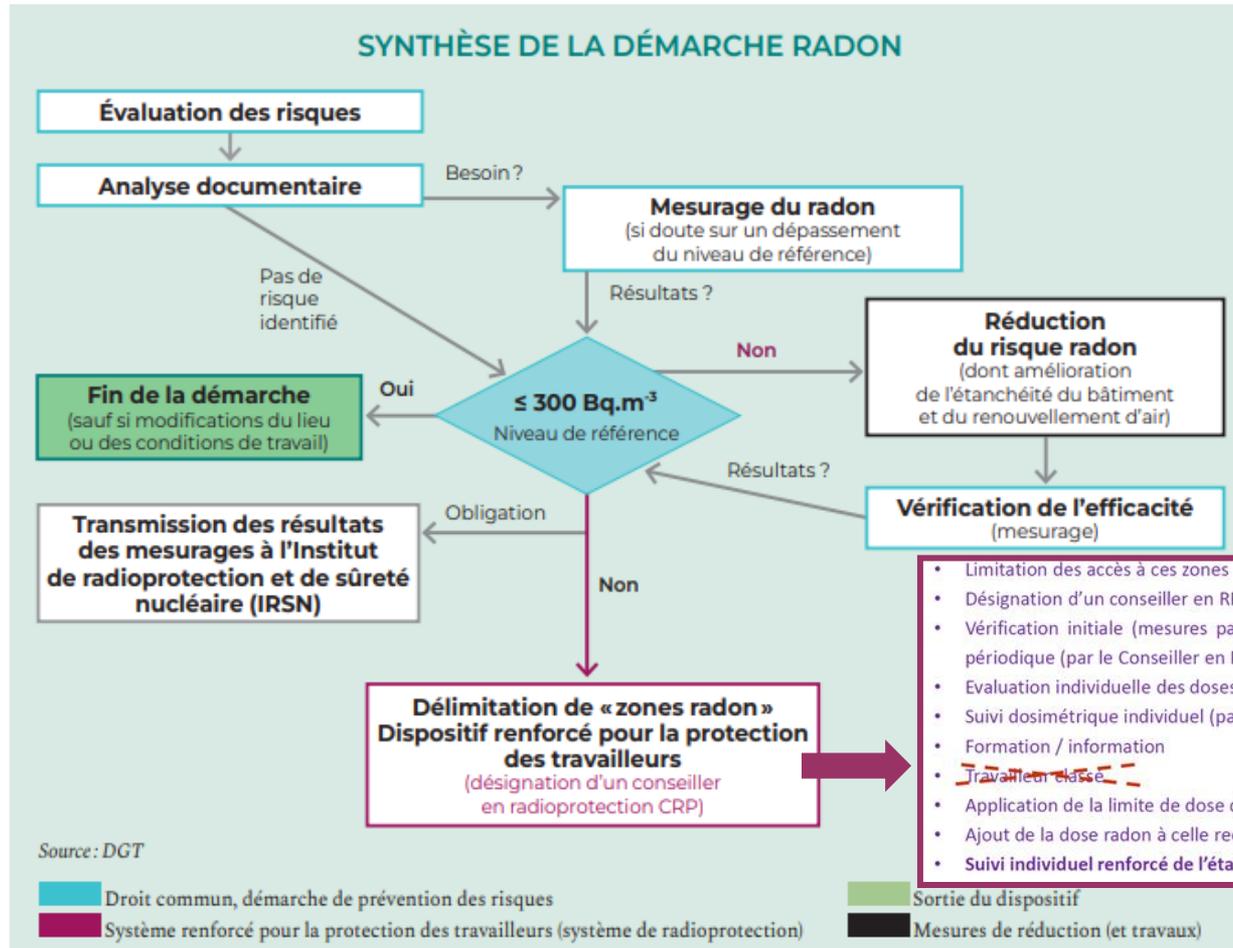
- **Champ d'application élargi (Art. R. 4451-1 du CT)**

- Aux activités professionnelles exercées
  - Au sous-sol ou au rez-de-chaussée de bâtiments situés dans les zones où l'exposition au radon est susceptible de porter atteinte à la santé des travailleurs définies en application de l' article L. 1333-22 du CSP
  - Lieux spécifiques de travail où sont réalisés des travaux souterrains des mines et des carrières

- **Insertion de la gestion du risque radon dans la démarche générale d'évaluation des risques professionnels**

- S'applique sur l'ensemble du territoire

# 3 - Modalités de gestion du risque dans les lieux de travail

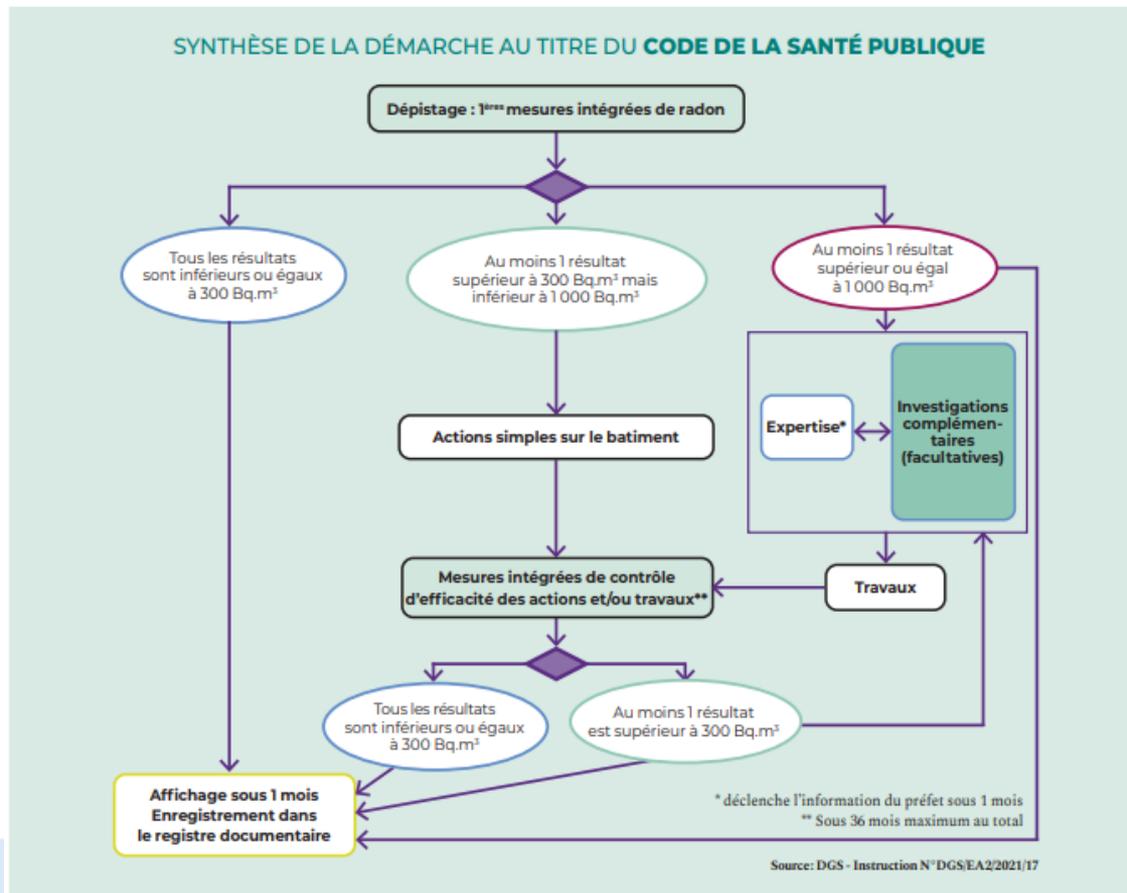


# 3 – Dispositions réglementaires du code de la santé publique pour les établissements recevant du public (ERP)

Les ERP répondant aux 2 critères cumulatifs suivants doivent mettre en place une surveillance de l'exposition du public qui les fréquente, car celui-ci est considéré comme sensible au radon

- Critère 1 : ERP appartient à une des catégories d'établissements suivantes
  - D'enseignement, y compris les bâtiments d'internat
  - D'accueil collectif d'enfants de moins de 6 ans
  - Sanitaires, sociaux et médicaux-sociaux, avec capacité d'hébergement
  - Pénitentiaires
  - Etablissements thermaux
- Critère 2 : ERP situé
  - en zone 3 (potentiel radon significatif)
  - en zones 1 et 2 lorsque les résultats de mesurages existants dans ces établissements dépassent le niveau de référence de 300 Bq/m<sup>3</sup>

# 3 - Modalités de gestion du risque des ERP





# 4 Suivi médical en santé au travail

## 4 – Suivi médical individuel en santé au travail

- Pour les travailleurs recevant une dose efficace estimée supérieure à 6mSv/an (radon)
  - Examen médical initial préalable à la prise de poste
  - Périodicité biennale
- Aucune recommandation en terme de contenu du suivi
  - Encourager le sevrage tabagique aux fumeurs ++

## 4 – Perspectives : étude LUCSO

- Expérimentation nationale recommandée en 2015
  - Suivi des travailleurs exposés à des cancérogènes pulmonaires
  - Évaluant l'intérêt du scanner thoracique basse dose

Critères d'éligibilité à l'expérimentation décrite dans les recommandations de 2015 sur le dépistage du cancer bronchopulmonaire par scanner thoracique basse dose (extrait des recommandations).

Définitions des sujets à haut risque de CBP : sujets âgés entre 55 et 74 ans éligibles à l'expérimentation d'un programme de dépistage du CBP par scanner thoracique basse dose en fonction de leur exposition à des cancérogènes pulmonaires et de la durée d'exposition cumulée (accord d'experts)

Nuisances professionnelles	Niveau d'exposition ou maladie	Durée d'exposition cumulée	Tabagisme actif ou arrêt depuis moins de 15 ans
<i>Amiante</i>	Intermédiaire	≥ 10 ans	≥ 30 PA
	Fort	< 5 ans	≥ 30 PA
	Fort	≥ 5 ans	≥ 20 PA
	Asbestose		≥ 20 PA
	Plaques pleurales		≥ 30 PA
<i>Autres cancérogènes<sup>a</sup></i>		≥ 10 ans	≥ 30 PA
<i>Co-expositions</i>			
	2 cancérogènes	≥ 10 ans	≥ 20 PA
	≥ 3 cancérogènes	≥ 10 ans	≥ 10 PA

Radon

<sup>a</sup> Production d'aluminium, gazéification du charbon, brai de brouille, production de coke, suie, rayons X et rayons gamma, radon, mines de fer, plutonium, fonderie de fonte et d'acier, métier de peintre, production de caoutchouc, arsenic et ses composés, composés du nickel, composés du chrome VI, béryllium, cadmium et ses composés, bis(chlorométhyl)ether, chlorométhyl méthyl ether, cobalt métal avec carbure de tungstène. Cas particuliers : silice cristalline (une silicose est nécessaire pour intégrer le groupe à haut risque de CBP et ce quelle que soit la durée de l'exposition) ; fumées d'échappement de moteur diesel (un niveau élevé d'exposition défini par un emploi dans les mines souterraines, la construction de tunnel et les travailleurs dans la maintenance dans les mines souterraines est nécessaire pour intégrer le groupe à haut risque de CBP).

## 4 – Perspectives : étude LUCSO

### Étude interventionnelle dans 2 départements (Gironde et Val-de- Marne)

- Sujets de 55 à 74 ans
  - 65-74 ans
    - inclusion débutée 2022
  - 55-64 ans
    - Inclusion débutée 2024
- Ayant une exposition à des cancérogènes pulmonaires professionnels (groupe 1 du CIRC) et fumeurs ou ex-fumeurs

Envoi d'une lettre d'invitation au dépistage avec auto-questionnaire comprenant cursus laboris historique du tabagisme (centres régionaux de coordination des dépistages des cancers)

Evaluation de l'exposition professionnelle à des carcinogènes pulmonaires et vérification de l'éligibilité (centre de consultation de pathologie professionnelle)

Dépistage par scanner thoracique basse dose renouvelé tous les ans pendant deux ans (T0, T1 an et T2 ans)  
Suivi des nodules selon consensus d'experts français

Prise en charge pneumo-oncologique : démarche diagnostique repose sur les recommandations de bonne pratique clinique de la HAS

## 4 – Perspectives : étude LUCSO

### • Premiers résultats de l'inclusion T0 sujets 65-74 ans

- 247 000 courriers envoyés
  - Taux de retour 8,7 % (n=21 450)
- Après analyse des auto-questionnaires, 510 (2,4 %) sujets éligibles
  - 309 (60,6 %) inclus
- 307 scanners thoraciques dont 18 positifs
  - Diagnostic de cancer du poumon posé pour 6 sujets
  - 9 négatifs et 3 investigation

Taux CBP dépisté (1,6%)  
+ élevé

*Etude NLST (1%)  
(USA 2011)*

*Etude Nelson (0,9%)  
(Pays-Bas, Belgique 2020)*

### • Déploiement de l'étude chez les sujets âgés de 55 à 64 ans est en cours et dans plusieurs autres départements de l'ouest dont le 29

- Un dépistage organisé du cancer du poumon est réalisable dans une population de sujets exposés professionnellement à des cancérogènes

- **Cancer du poumon** : aujourd'hui, **seul effet démontré associé au radon**
  - Bonne cohérence des résultats des études chez les mineurs et en population générale
  - Augmentation significative du risque de cancer du poumon associé à l'exposition cumulée au radon
  - Temps de latence estimé entre 5 et 30 ans
  - Radon **classé cancérigène groupe 1 par le CIRC depuis 1988**
- **Accroissement du risque pour les fumeurs comme pour les non-fumeurs**
  - **Interaction tabac-radon entre l'effet additif et multiplicatif** (sub-multiplicatif)
- **Pas d'évidence d'une augmentation du risque d'autre maladie**
  - Etudes en cours
- **Pas de recommandation en terme de contenu du suivi médical**
  - Suivi individuel renforcé si dispositif de protection renforcée en place (> 6 mSv/an)
  - Encourager le sevrage tabagique
  - Perspectives : apport des résultats de l'étude LUCSO ?

# Bibliographie

- Committee on Health Risks of Exposure to Radon- National Research Council. (1999) Health effects of exposure to radon (BEIR VI). Washington DC. National Academy Press.
- Drubay D, Caër-Lorho S, Laroche P, et al. Mortality from Circulatory System Diseases among French Uranium Miners: A Nested Case-Control Study. *Radiat Res.* 2015;183:550-562.
- Hunter N, Muirhead CR, Tomasek L, et al. Joint analysis of three European nested case-control studies of lung cancer among radon exposed miners: exposure restricted to below 300 WLM. *Health Phys.* 2013;104:282-92.
- Kreuzer M, Sobotzki C, Fenske N, et al. Leukaemia mortality and low-dose ionising radiation in the WISMUT uranium miner cohort (1946-2013). *Occ Environ Med.* 2017;74:252-258.
- Kreuzer M, Fenske N, Schnelzer M, et al. Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners. *Br J Cancer.* 2015;113:1367–1369.
- Lane RS, Tomasek L, Zablotzka LB, et al. Low radon exposures and lung cancer risk : joint analysis of Czech, French, and Beaverlodge cohorts of uranium miners. *Int Arch Occup Environ Health.* 2019;92:747–762.
- Leuraud K, Schnelzer M, Tomasek L, et al. Radon, smoking and lung cancer risk: results of a joint analysis of three European case-control studies among uranium miners. *Radiat Res.* 2011;176:375-87.
- Rage E, Caer-Lorho S, Drubay D, et al. Mortality analyses in the updated French cohort of uranium miners (1946–2007). *Int Arch Occup Environ Health.* 2015;88:717–730.
- Recommandations de bonne pratique. Surveillance médicoprofessionnelle des travailleurs exposés ou ayant été exposés à des agents cancérigènes pulmonaires. Société française de médecine du travail, Société de pneumologie de langue française, Société française de radiologie; 2015. (label HAS)
- F. Delva, S. Gendarme, P.Y. Brillet, P Brochard, C. Paris, et al.. Étude de faisabilité d'un dépistage organisé du cancer broncho-pulmonaire chez des sujets exposés professionnellement à des agents cancérigènes pulmonaires–LUCSO. *Arch Mal Prof Environ.* Volume 85, Issues 2–3, May 2024, Page 102343.

**Je vous remercie**

