

# Effets sur la santé observés dans les populations vivant près des mines d'uranium

Agathe Croteau

Septembre 2014

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

microbiologie

prom

urité et prévention des traumatismes

recherche

santé au tra

Institut national  
de santé publique

Québec



# Plan de la présentation

## Introduction

## Données disponibles

## Résultats

- Cancers
  - Décès par cancers
  - Incidence des cancers
- Décès par cause non cancéreuses
- Autres effets

## Conclusions

# Introduction

Que nous apprennent les études épidémiologiques à propos des effets sur la santé des populations vivant près d'une mine d'uranium?

## Apport de l'épidémiologie

- Études d'observation
- Sur des populations humaines en situation réelle d'exposition
- Pas d'extrapolation de l'animal vers l'humain

## Inconvénients

- Études souvent très coûteuses
- Peu d'études épidémiologiques
- Difficultés méthodologiques

# Certaines difficultés méthodologiques rencontrées

## Études rétrospectives vs prospectives

- Individus questionnés sur leur exposition après l'apparition de la maladie

## Le contrôle des autres facteurs de risque

## Études écologiques

- Les données sur l'exposition et la maladie sont connues pour un groupe et non pour chaque individu

# Identification des publications pertinentes

## Recherche dans les bases de données scientifiques: *MEDLINE, EMBASE et COCHRANE*

- 195 publications entre 1960 et 2012 concernant les mines d'uranium et la santé humaine
  - 19 recensions d'écrits
  - 176 études originales
    - 165 sur la santé des travailleurs miniers
    - 11 sur la santé des populations

# Onze études originales, publiées entre 1992 et 2012

- USA (6), Canada (1), Espagne (2), Niger (1) et Ukraine (1)
- Neuf études sur le cancer dont 3 ont aussi étudié les causes de décès non cancéreuses
- Deux autres études: anomalies chromosomiques et issues de grossesse défavorables
- Sept des 11 études sont de devis écologique
- Période d'exploitation minière souvent < 1975 et parfois < 1960

# Analyse de la qualité méthodologique des études

Chaque étude pertinente, identifiée dans les bases de données consultées, a été évaluée de façon systématique à l'aide d'une grille d'analyse et s'est vue attribuer un score

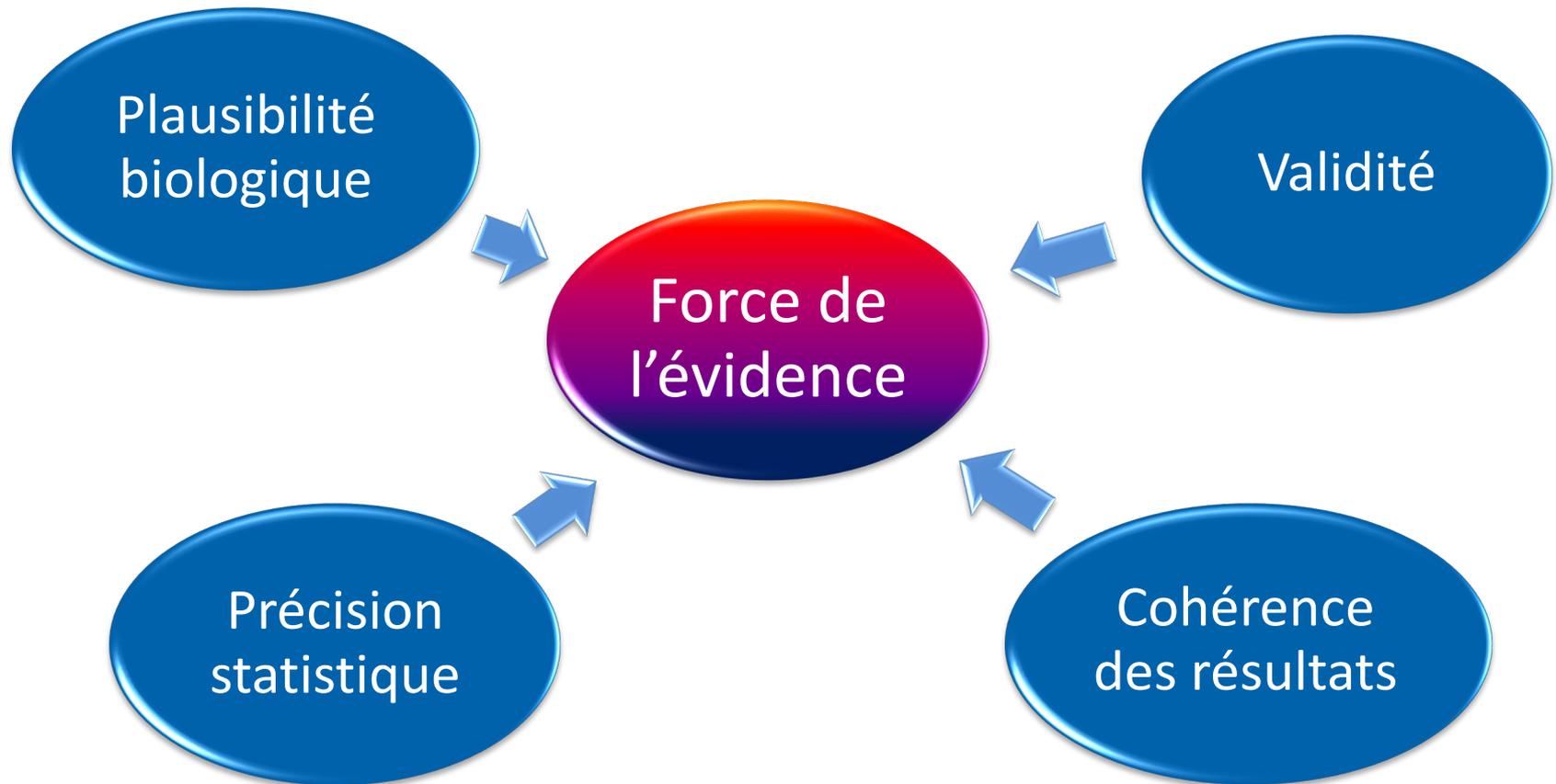
- Pays, période
- Sélection et participation de la population visée
- Fiabilité de l'information relative à la santé
- Fiabilité de l'information relative à l'exposition minière
- Contrôle des facteurs de risque
- Source de financement

# Synthèse des résultats

## Pour chaque problème de santé étudié :

- Globalement, une augmentation du risque est-elle observée ?
- Quelle certitude est accordée à cette observation ?
  - Force de l'évidence
    - Évidence forte, évidence suffisante
    - Suspicion
    - Les données ne permettent pas de conclure

# Quatre éléments pour établir la force de l'évidence



# Résultats

santé recherche  
innovation centre d'expertise et de référence  
maladies infectieuses promotion de saine  
santé environnementale se  
toxicologie prévention des maladies chroniques  
impact des politiques pub  
santé au travail  
développement des personnes et des communautés

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

sur l'état de santé de la population microbiologie prom  
sécurité et prévention des traumatismes  
recherche santé au tra

# Décès par cancers

## 7 études, problème de santé le plus souvent étudié

- Devis: 6 écologiques, 1 rétrospective
- Pays: 4 américaines, 2 espagnoles, 1 canadienne
- Pour certains cancers, des méta-analyses ont pu être réalisées
  - Permet de faire une « moyenne » des résultats qui tient compte de l'importance de chaque étude
  - Parfois possible d'évaluer l'influence des faiblesse méthodologiques

# Décès par cancer du poumon

## Résultat de la méta-analyse

- Augmentation de 20 % du risque dans l'ensemble de la population
  - Analyses séparées pour les hommes et les femmes
    - Hommes: augmentation de 31 % du risque
    - Femmes: pas d'augmentation du risque (-11 %)
  - Explication: travail des hommes dans les mines d'uranium
  - Le résultat des femmes représente mieux l'effet de résider près d'une mine d'uranium sans l'effet du travail minier

# Force de l'évidence pour les décès par cancer du poumon chez les femmes

## Certitude accordée à cette observation après

- Évaluation des 4 éléments suivants:
  - Plausibilité biologique: bonne
  - Précision statistique: bonne
    - selon la mesure de la variance
  - Cohérence des résultats: bonne
    - selon deux tests statistiques de mesure de l'hétérogénéité ( $X^2$  et  $I^2$ )
  - Validité (diapo suivante)

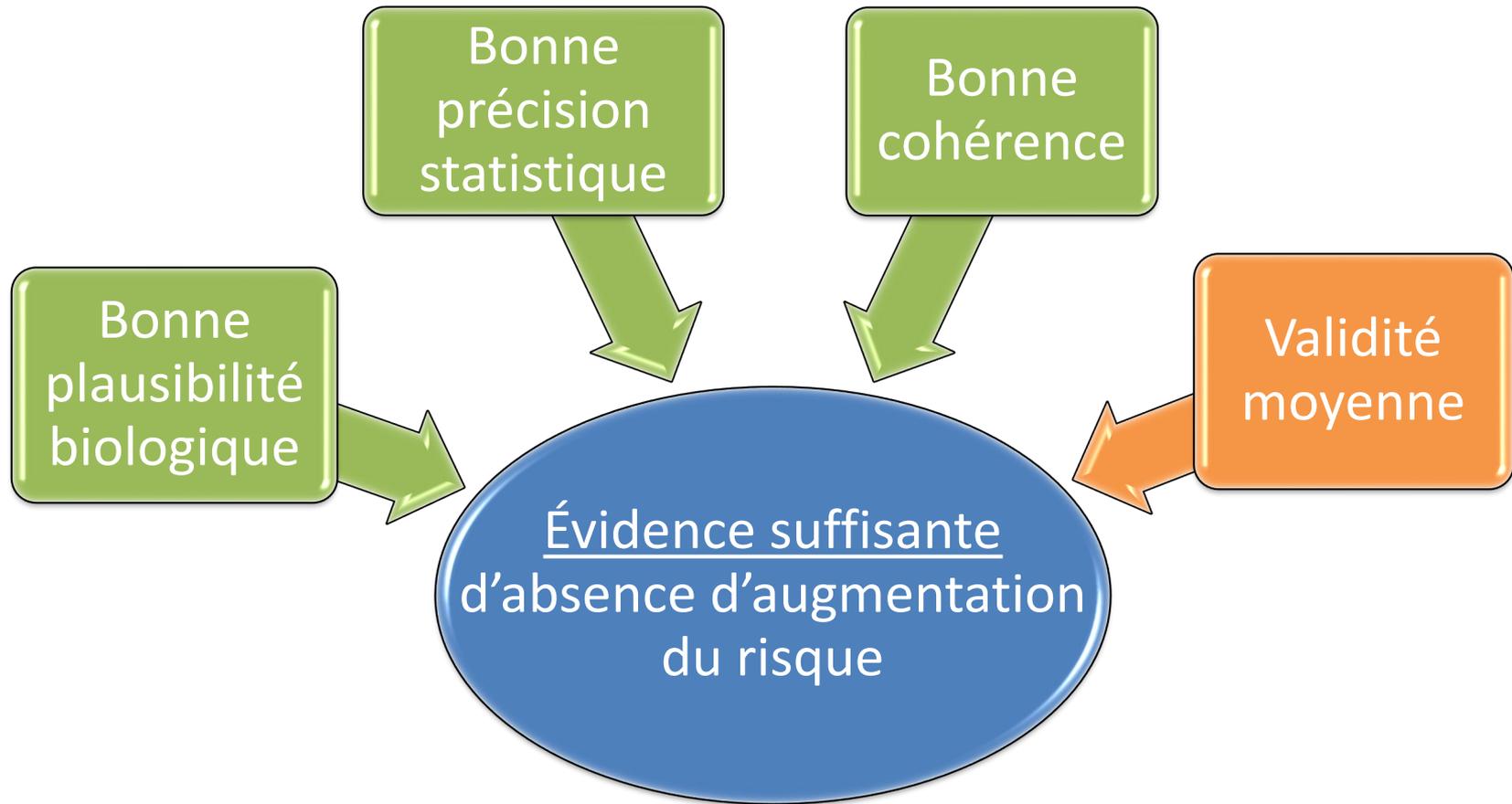
# Validité des résultats pour les décès par cancer du poumon chez les femmes

## Validité: moyenne

- Selon la qualité méthodologique des études, leur score de validité et certaines analyses permettant d'évaluer l'influence des faiblesses méthodologiques

	#	Validité externe	Population	Effet sur la santé	Exposition	Confusion	Financement	Score de validité
Boice 2010	1	B	M	B	M	M	F	12,5
Boice 2007a	2	M	B	B	B	M	F	15
Boice 2007b	3	M	M	B	M	B	F	12,5
Lopez-Abente 2001	4	B	M	B	F	B	B	13,5

# Cancer du poumon chez les femmes : Force de l'évidence: Crédibilité accordée



# Résultats des 13 méta-analyses pour les décès par cancers

Type de cancer	Augmentation du risque ?	Plausibilité biologique	Précision statistique	Validité	Cohérence	Force de l'évidence
Poumon (chez les femmes)	Non	Bonne	Bonne	Moyenne	Bonne	Évidence suffisante
Colorectal	Non	Bonne	Bonne	Très faible	Faible	Non concluant
Œsophage	Oui 14 %	Bonne	Moyenne	Très faible	Bonne	Non concluant
Estomac	Non	Bonne	Bonne	Très faible	Bonne	Non concluant
Os	Oui 29 %	Bonne	Moyenne	Très faible	Bonne	Non concluant
Sein	Non	Bonne	Bonne	Faible	Bonne	Suspicion
Ovaires	Non	Bonne	Bonne	Faible	Bonne	Suspicion
Vessie	Non	Bonne	Bonne	Faible	Faible	Non concluant
Rein	Non	Bonne	Bonne	Faible	Moyenne	Suspicion
Lymphome non hodgkinien	Non	Bonne	Bonne	Faible	Bonne	Suspicion
Lymphome hodgkinien	Oui 24 %	Bonne	Faible	Très faible	Moyenne	Non concluant
Myélome multiple	Non	Bonne	Bonne	Très faible	Bonne	Non concluant
Leucémie	Oui 7 %	Bonne	Moyenne	Faible	Bonne	Suspicion



# Sommaire des résultats pour les décès par cancer

## Méta-analyses pour 13 types de cancer

- Cancer du poumon:
  - Augmentation du risque chez les hommes (travail minier)
  - Évidence suffisante d'absence d'augmentation du risque chez les femmes
- Leucémie: une faible augmentation est suspectée mais non démontrée
- Pour les 11 autres cancers: soit suspicion d'absence d'augmentation du risque, soit les données ne permettent pas de conclure

# Incidence des cancers

## Quatre études, pas de méta-analyse

- Nouveau Mexique: seul le cancer du poumon (hommes) montre un excès statistiquement significatif
- Niger: incidence annuelle des tumeurs malignes  $\approx$  taux de l'Afrique
- Elliot Lake, Ontario: leucémie infantile, 1964-1986, 4 cas observés vs 5 cas attendus
- Deux villes ukrainiennes exposées: excès statistiquement significatifs des cancers du poumon, du sein, du rein et de la leucémie
  - effet du travail minier
  - faiblesse des normes de sécurité pour la radioactivité dans l'ex-URSS

# Décès par causes non cancéreuses

## Trois études, pas de méta-analyse

- Excès statistiquement significatifs pour 3 causes de décès: tuberculose, accidents autres que par véhicule motorisé et suicide
  - Résultats non concluants
    - Plausibilité biologique faible, problèmes habituellement liés aux inégalités sociales
    - Faiblesses méthodologiques
    - Cohérence faible

# Autres effets

## Aberrations chromosomiques

- Les résultats d'une étude suggèrent une réponse anormale de la réparation de l'ADN chez 24 sujets exposés à moins de 800 m du site minier

## Issues de grossesses

- Communauté Navajo, NM, 1964-1982
- Plusieurs catégories d'exposition: professionnelle du père, résidentielle du père et résidentielle de la mère ( $\leq 800$  m)
- Seul excès statistiquement significatif : certaines issues défavorables (principalement dysplasies de la hanche et décès infantiles) lorsque la mère réside près d'un site de déchets miniers ou de concassage

## Données insuffisantes pour conclure

# Conclusions

Les études sur des populations résidant à proximité d'un site minier n'ont pas démontré d'effet néfastes sur la santé

- Méta-analyses pour 13 types de décès par cancer: une faible augmentation du risque de leucémie est suspectée
- On ne peut associer le fait de résider à proximité d'un site minier avec un risque accru de cancer ou d'autres problèmes de santé
- Cependant, à l'exception des décès par quelques types de cancer, les données disponibles ne permettent pas de conclure et d'autres recherches sont nécessaires

Merci de votre attention!

Des questions?

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

**INSPQ**

INSTITUT NATIONAL  
DE SANTÉ PUBLIQUE  
DU QUÉBEC

Centre d'expertise  
et de référence

santé

recherche

innovation

centre d'expertise et de référence

infectieuses

promotion de sair

santé environnementale

# Les enjeux de la filière uranifère au Québec

## Thématique santé - Pistes de gestion

Septembre 2014

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

microbiologie

prom

urité et prévention des traumatismes

recherche

santé au tra

Institut national  
de santé publique

Québec



# Cadre de gestion des risques en santé publique

## Approche globale



2 RÉFÉRENCE: Ricard, S. (2003) *Cadre de référence en gestion des risques pour la santé dans le réseau québécois de la santé publique*. Québec: INSPQ. 85 p.



# Principes directeurs du Cadre de référence...

1. Protection de la santé
2. Prudence
3. Rigueur scientifique
4. Équité
5. Transparence
6. Ouverture
7. « Empowerment » (appropriation de ses pouvoirs)

# Pistes de gestion – Volet épidémiologie

Les études sur des populations résidant à proximité d'un site minier n'ont pas démontré d'effet néfaste sur la santé, cependant l'incertitude rencontrée justifie:

- D'autres recherches
- La surveillance de la santé de la population avoisinante advenant l'installation d'une mine d'uranium

# Pistes de gestion – Volet MH



# Pistes de gestion – Volets social et psychologique

Les études montrent que les mines d'uranium ont des conséquences psychologiques et sociales sur les populations avoisinantes, et proposent notamment:

- Plus de recherches (représentations sociales et perceptions, politiques publiques, dialogue, Autochtones);
- Des approches *ex ante* multidisciplinaires, holistiques et participatives;
- Des stratégies participatives de gestion des risques;
- Des mesures pour la santé psychologique

Merci de votre attention!

Des questions?

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

## BAPE sur les enjeux relatifs à l'exploitation de l'uranium

### Réponse à deux questions du BAPE adressées lors de l'audience du 4 septembre en soirée

#### Avant propos

Les réponses présentées par les professionnels de l'INSPQ concernés s'appuient sur un nombre limité d'éléments tirés d'un rapide survol de la littérature jugée pertinente. Il ne s'agit donc pas d'une revue de la littérature exhaustive révisée par des pairs portant sur le sujet identifié ci-haut. Ces réponses ont été uniquement articulées pour les fins du BAPE, dans les délais accordés par les commissaires.

#### Question 1

#### **Quel est l'effet combiné du radon, de la cigarette et du diesel sur la santé humaine. Y a-t-il un effet synergique?**

##### Risque cancérigène associé au radon

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le radon et ses descendants, à l'instar de tous les autres émetteurs de particules alpha, dans le groupe 1 (cancérigène pour l'humain), (CIRC, 2009). À l'instar de tous les autres radionucléides, la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) considère également le radon comme un cancérigène reconnu chez l'humain ou un contaminant de classe « A » (US EPA, 1999).

Le risque cancérigène associé à l'inhalation des produits de dégradation du radon et, dans une moindre mesure, de radon lui-même a été évalué à partir d'études épidémiologiques qui regroupaient des cohortes de mineurs d'uranium ainsi que des populations exposées dans leur résidence (NRC, 1988, BEIR VI, 1999; UNSCEAR, 2009; CIPR, 2010; OMS, 2010). En 1999, le *Committee on Health Risks of Exposure to Radon* du *Biological Effects of Ionizing Radiations VI* (BEIR VI) du *National Research Council* (NRC) américain a publié la méta-analyse la plus complète à ce sujet en regroupant les données provenant de 11 cohortes, intégrant 68 000 travailleurs œuvrant dans des mines souterraines situées en Chine, en République-Tchèque, aux États-Unis, au Canada, en Suède, en Australie ainsi qu'en France, dont 2 700 sont décédés du cancer du poumon (BEIR VI, 1999). Depuis, d'autres études effectuées chez les mineurs ont été publiées. Celles-ci concernent des doses d'exposition rapportées relativement faibles, des périodes de suivi plus longues et des informations plus précises sur les expositions individuelles (CIPR, 2010; UNSCEAR, 2009).

Des populations d'Amérique du nord (Krewski *et al.*, 2005 ; 2006), d'Europe (Darby *et al.*, 2005; 2006) et d'Asie (Lubin *et al.*, 2004) exposées au radon présent en milieu résidentiel ont également fait l'objet d'analyses combinées. Parmi celles-ci, l'étude cas-témoin de Darby *et al.* (2005; 2006) constitue la plus large en terme de sujets étudiés. Elle regroupe 7 148 cas et 14 208 témoins provenant de 13 études épidémiologiques ayant évalué l'association entre l'exposition au radon et le cancer du poumon. Pour toutes ces études, les informations sur les habitudes de tabagisme des sujets ainsi que sur les concentrations en radon dans la maison qu'ils avaient occupée pour une période minimale de 15 ans ont été colligées par les auteurs. Les concentrations de radon mesurées dans les résidences des individus considérés ont été pondérées pour tenir compte de la variabilité temporelle; la durée d'exposition moyenne était de 23 ans.

L'ensemble de ces analyses combinées ont montré l'existence d'une relation « linéaire sans seuil » entre l'exposition à de faibles concentrations de radon et le risque de développer un cancer du poumon. En accord donc avec ce modèle, l'OMS précise qu'il n'y a pas de seuil

connu sous lequel il y aurait absence de risque (OMS, 2010). Ainsi, le risque est proportionnel à la dose, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la quantité d'énergie déposée à long terme dans les tissus pulmonaires (Steck et Field, 2006).

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a récemment revu son évaluation sur les risques aux faibles doses d'exposition au radon et à ses descendants (CIPR, 2010). Tout en ayant évalué les données propres aux études résidentielles, qu'elle juge concordantes avec les données obtenues chez les mineurs, la Commission a recommandé, pour la population générale, un nouveau coefficient de risque fondé sur la méta-analyse des 11 cohortes de mineurs d'uranium (BEIR VI, 1999), ainsi que sur les plus récentes études réalisées en milieu de travail, (CIPR, 2010). Ce coefficient équivaut à un excès de risque de mortalité vie entière par cancer du poumon de  $15 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$  (fumeurs et non-fumeurs confondus), en considérant un facteur d'équilibre de 0,4 et une durée de temps passée à l'intérieur de 7 000 heures par année pendant 70 ans. De même, le NRC (1999) ainsi que la US EPA (1999; 2003), ont obtenu, toujours à partir des risques observés par le BEIR VI (1999) et des mêmes conditions d'exposition, pratiquement le même coefficient, soit  $16 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$ .

#### Effet synergique découlant de l'exposition au radon et à la fumée de tabac

Certains facteurs peuvent moduler les effets associés à une exposition aux radiations ionisantes émises par le radon et ses produits de filiation. L'état chimique et physique de ces produits de filiation ainsi que leur concentration dans l'environnement, l'anatomie du système respiratoire, la manière de respirer et le style de vie (sédentaire ou non, tabagisme, etc.) sont autant de facteurs qui doivent être considérés lors de l'évaluation des effets sur la santé (Girard, 1992). Par ailleurs, l'habitude de vie ayant le plus d'impact sur le risque de développer un cancer du poumon est sans contredit le tabagisme. En effet, on assume que près de 90 % des décès liés au cancer du poumon sont causés par le tabac (MSSS, 2014).

De façon plus spécifique, il existerait une synergie submultiplicative (plus qu'additive, mais moins que multiplicative) entre l'exposition au radon et le tabagisme. En effet, les études épidémiologiques ont montré que l'effet combiné du radon et du tabagisme augmente les risques de cancer du poumon de façon importante (CCSN, 2012).

À cet effet, le comité BEIR VI (1999) a défini (à partir de la méta-analyse portant sur les études chez les mineurs) des coefficients d'excès de risque de mortalité vie entière pour une exposition continue durant toute la vie à  $1 \text{ Bq/m}^3$  de radon et ses descendants et ce, tant pour les fumeurs que pour les non fumeurs. Chez les fumeurs, le coefficient de risque moyen (hommes et femmes combinés) est de  $26 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$  et il est de  $5 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$  chez les non-fumeurs (NRC, 1999; US EPA, 1999).

L'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2010) a également dérivé ce type de coefficients de risque, mais cette fois à partir des résultats obtenus par le biais des études d'exposition résidentielles réalisées par Darby *et al.* (2005; 2006). Le coefficient de mortalité est de  $15 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$  pour les fumeurs consommant de 15-24 cigarettes par jour et de  $0,6 \times 10^{-5} \text{ (Bq/m}^3\text{)}^{-1}$  pour les non-fumeurs (OMS, 2010). C'est dans ce contexte que l'exposition à long terme au radon est considérée comme la première cause en importance de cancer du poumon chez les non-fumeurs et la seconde chez les fumeurs (Santé Canada, 2014).

### Excès de risque engendrés par l'exposition au radon pour les fumeurs et les non-fumeurs en fonction de la concentration de radon

Le tableau ci-dessous présente, pour diverses concentrations de radon dans l'air intérieur, les excès de risque vie entière associés tels que calculés à partir des coefficients de risque ((Bq/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>) rapportés ci-dessus par le NRC (1999), à partir des données chez les travailleurs et l'OMS (2010), à partir des données chez les populations résidentielles. L'excès de risque vie entière représente ici le nombre de cas de décès par cancer du poumon attribuables à une exposition continue au radon pendant toute la vie (fixée à 70 ans). Par exemple, pour une population de 100 000 personnes (fumeurs et non-fumeurs confondus) exposées durant toute leur vie à une concentration de radon dans l'air intérieur de 34,6 Bq/m<sup>3</sup>, il y aurait, par rapport au nombre de cancers mortels attendus dans cette population, 554 cancers du poumon mortels de plus qui seraient strictement attribuables à cette exposition.

### **Excès de risque de mortalité vie entière (pour 100 000 personnes) selon diverses concentrations de radon dans l'air intérieur de résidences, calculées à partir des coefficients de risque du NRC (1999) et de l'OMS (2010)**

Concentrations (Bq/m <sup>3</sup> )	Excès de risque (non fumeurs)		Excès de risque (fumeurs)		Excès de risque (toute la population)
	NRC, 1999	OMS, 2010	NRC, 1999	OMS, 2010	NRC, 1999
1	5	0,6	26	15	16
11,4*	57	6,8	296	171	182
34,6 **	173	20,8	900	519	554
100	500	60	2 600	1 500	1 600
200***	1 000	120	5 200	3 000	3 200
400	2 000	240	10 400	6 000	6 400

\* Moyenne dans l'air intérieur au Canada (mesures prises surtout au sous-sol; Grasty et LaMarre, 2004)

\*\* Moyenne dans l'air intérieur au Québec (mesures prises surtout au sous-sol; Lévesque *et al.*, 1995)

\*\*\* Directive canadienne sur le radon

### Effet synergique entre l'exposition au radon, à la fumée de tabac et au diesel

Bien que la synergie radon-tabac-diesel soit moins bien documenté que la synergie radon-tabac, le diesel demeure un cancérigène reconnu chez l'humain (contaminant de classe 1 ; CIRC, 2012). Il est ainsi raisonnable de poser l'hypothèse prudente que l'exposition simultanée au diesel et au duo radon-tabac pourrait engendrer un effet combiné à tout de moins additif. Cette hypothèse a d'ailleurs été avancée par le NRC (2011) au regard des risques cancérigènes pouvant être observés chez les travailleurs œuvrant dans les mines d'uranium. Cet organisme avance également la possibilité d'une interaction synergique plus qu'additive.

Le BEIR VI (1999) va dans le même sens tout en réitérant le besoin d'initier des études épidémiologiques spécifiques afin de mieux caractériser ce risque. Le BEIR VI (1999) pose l'hypothèse que l'ampleur du risque combiné serait fonction d'abord fonction du niveau d'exposition au produit de filiation du radon puis des habitudes tabagique et ensuite de l'exposition au diesel. En dépit de ce manque de données quantitatives spécifiques, les études épidémiologiques menées sur des travailleurs miniers confirment l'importance de considérer l'exposition au diesel à titre de facteur confondant (au même titre que la silice, la poussière ou l'arsenic) dans l'évaluation du risque associé à l'exposition au radon (NRC, 2011).

## **Question 2**

### **Quel est le risque cancérigène que la population juge acceptable?**

L'appréciation du risque, ou le jugement que peut poser une population au regard d'un risque cancérigène, n'est pas uniforme d'une collectivité à l'autre. De façon générale, les collectivités établissent le niveau d'acceptabilité d'un risque sur la base de la somme des effets bénéfiques et des effets néfastes que peut occasionner une situation susceptible d'engendrer une augmentation du risque de cancer au sein de celle-ci. Bien que la perception de ces effets demeurent variable, la connaissance de certains éléments clés (tels le statut général de l'emploi, de l'économie, de l'environnement, du climat social et commercial, de la santé, etc.) est susceptible d'influencer cette dernière. Divers considérations de faisabilité technique sont également à prendre en considération dans cette équation.

Par ailleurs, les organismes réglementaires tant au Canada qu'ailleurs dans le monde ont statué sur le risque négligeable en lien avec la présence d'une substance cancérigène dans l'environnement (INSPQ, 2012). Par exemple, Santé Canada stipule qu'un risque négligeable ne devrait pas engendrer plus d'un excès de cas de cancer pour 100 000 ( $10^{-5}$ ) personnes exposées durant toute leur vie à des cancérigènes dans l'eau potable. Au Québec, le ministère de l'environnement a fixé le risque négligeable à  $10^{-6}$ , quelque soit le compartiment environnemental étudié (eau, air, sol). Aux États-Unis, l'agence américaine de protection de l'environnement (U.S. EPA) considère que dans certaines circonstances, la plage d'excès de cancer associée à un risque négligeable ne doit pas excéder  $10^{-4}$ .

Rédigé le 15 septembre 2014 par :  
Marie-Hélène Bourgault &  
Patrick Poulin

## Références

BEIR VI (Committee on Health Risks of Exposure to Radon) (1999) [Health effects of exposure to radon – BEIR VI](#). Washington DC, National, Academy Press.

CCSN (Commission canadienne de sûreté nucléaire) (2012) [Le radon et la santé](#). Info-0813, Révision 2. Ottawa, Canada. No de cat : CC172-67/2011F-PDF. ISBN 978-1-100- 96509-3.

CIPR (Commission internationale de protection radiologique) (2010) [Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon](#). ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) (2012) [Diesel engine exhaust carcinogenic](#).

CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) (2009). [IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100D \(2011\)](#). A Review of Human Carcinogens: Radiation. Lyon, France.

Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Falk R, Farchi S, Figueiras A, Hakama M, Heid I, Hunter N, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruosteenoja E, Rosario AS, Tirmarche M, Tomásek L, Whitley E, Wichmann HE, Doll R. (2006) Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*;32 Suppl 1:1-83.

Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Rosario, A.S., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E. et Doll, R. (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*. 330:223-227.

Girard, J. (1992). *Le radon dans les maisons, Essai (M. Env.)*, Université de Sherbrooke, 79 p.

Grasty, R.L. et Lamarre, J.R. (2004) The annual effective dose from natural sources of ionising radiation in Canada. *Radiation Protection Dosimetry*. 108(3):215-26.

Krewski, D., Lubin JH., Zielinski J.M., Alavanja M., Catalan VS., Field R.W., Klotz J.B., Létourneau E.G., Lynch C.F., Lyon J.L., Sandler D.P., Schoenberg J.B., Steck D.J., Stolwijk .JA., Weinberg C. et Wilcox H.B. (2006) A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. 69:533-597.

Krewski, D., Lubin J.H., Zielinski J.M., Alavanja M., Catalan V.S., Field R.W., Klotz J.B., Létourneau E.G., Lynch C.F., Lyon J.L., Sandler D.P., Schoenberg J.B., Steck D.J., Stolwijk J.A., Weinberg C. et Wilcox H.B. (2005) Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*. 16:137-145.

Lévesque, B., Gauvin, D., McGregor, R.G., Martel, R. Gingras, S., Dontigny, A., Walker, W.B. et Lajoie, P. (1995) Étude d'exposition au radon<sup>222</sup> dans les résidences de la province de Québec. Centre de santé publique de Québec, Société canadienne d'hypothèques et de logement.

Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, J.D., Jr., Xu, Z.Y., Blot, W.J., De Wang, L. et Kleinerman, R.A. (2004) Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *International Journal of Cancer*. 109: 132-137.

MSSS (Ministère de la Santé et des Services Sociaux ) (2014) [Le radon domiciliaire](#).

NRC (National Research Council) (2011) [Uranium Mining in Virginia: Scientific, Technical, Environmental, Human Health and Safety, and Regulatory Aspects of Uranium, Mining and Processing in Virginia](#), Committee on Uranium Mining in Virginia; Committee on Earth Resources; National Research Council. Washington, DC: National Academy Press.

NRC (National Research Council) (1999) [Risk assessment of radon in drinking water, Committee on the Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water](#), Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press.

NRC (National Research Council) (1988) [Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters](#). BEIR VI, Washington, DC, National Academy Press.

OMS (Organisation mondiale de la santé) (2010) [WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants](#), Copenhagen. ISBN 978 92 890 0213 4.

Santé Canada (2014) [Le radon – Une autre raison d'arrêter](#).

Steck, D.J. et Field, R.W. (2006) Dosimetric challenges for residential radon epidemiology. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 69(7):655-64.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2009). [UNSCEAR 2006, Report to the General Assembly, with scientific annexes](#), New York.

US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2003) [EPA Assessment of Risks from Radon in Homes](#). Office of Radiation and Indoor Air. EPA 402-R-03-003. Washington DC.

US EPA (United States Environmental Protection Agency) (1999) [Federal guidance No. 13. Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides](#) EPA 402-R-99-0. Oak Ridge National Laboratory.

# Évaluation générique des expositions et des risques associés aux substances chimiques présentes dans les régions uranifères

Marie-Hélène Bourgault, M. Sc., Patrick Poulin, Ph.  
Denise Phaneuf, M. Sc.

Le 17 septembre 2014

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

# Plan de la présentation

- Objectifs
- Méthodologie
- Variabilité des risques
- Contribution des mines
- Faits saillants

# Objectifs

santé  
recherche  
innovation  
centre d'expertise et de référence  
maladies infectieuses  
promotion de saine  
santé environnementale  
se  
toxicologie  
prévention des maladies chroniques  
impact des politiques pub  
santé au travail  
développement des personnes et des communautés

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

sur l'état de santé de la population  
microbiologie  
prom  
sécurité et prévention des traumatismes  
recherche  
santé au tra

**Institut national  
de santé publique**  
**Québec** 

# Évaluation générique

- À partir de données sur les concentrations de substances chimiques présentes dans l'environnement de régions uranifères, assujetties ou non à l'exploitation, au Canada et ailleurs dans le monde:
  1. présenter la variabilité des expositions et des risques encourus par une hypothétique population avoisinante
  2. évaluer la contribution théorique de l'activité minière uranifère

# Plan de la présentation

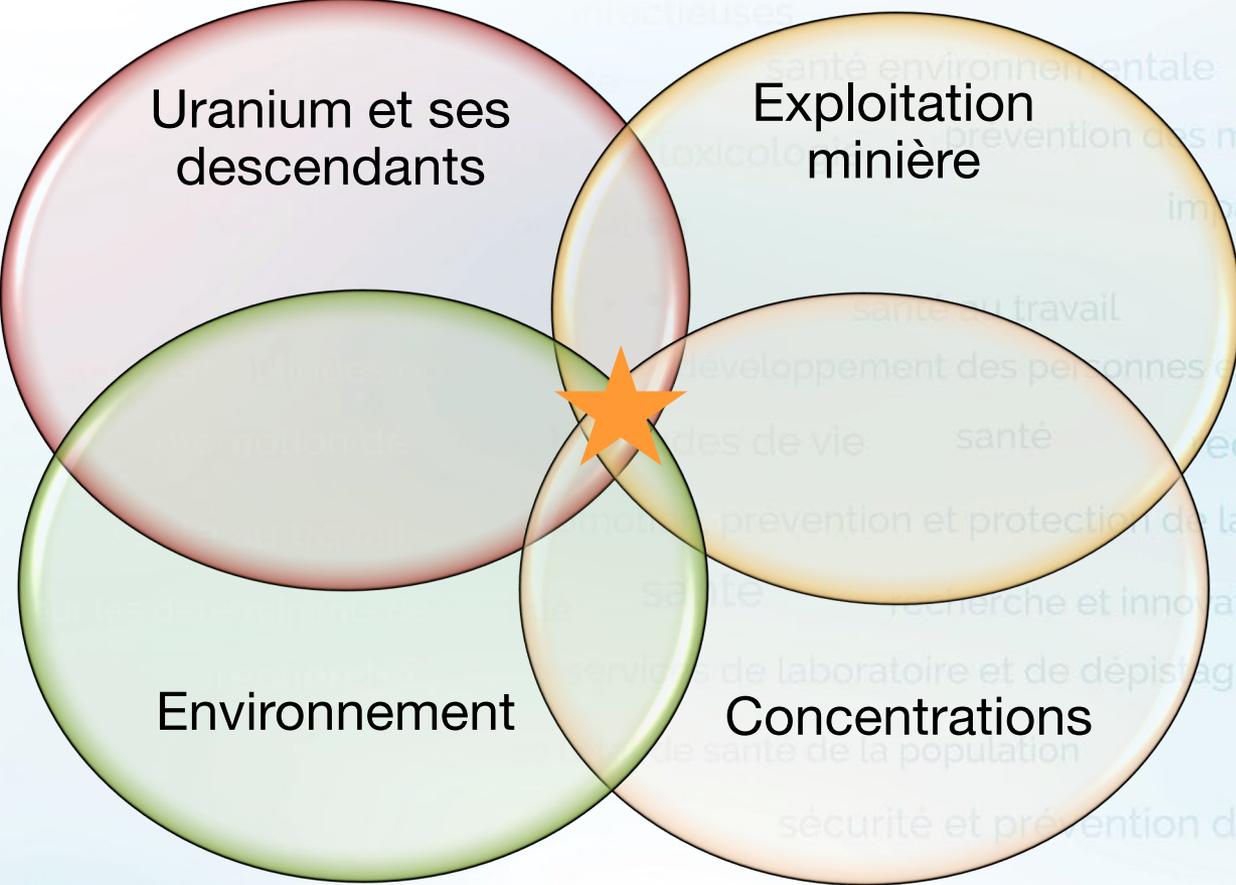


- Objectifs
- Méthodologie
- Variabilité des risques
- Contribution des mines
- Faits saillants

# Méthodologie

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

# Revue de la littérature



# Sélection des articles scientifiques

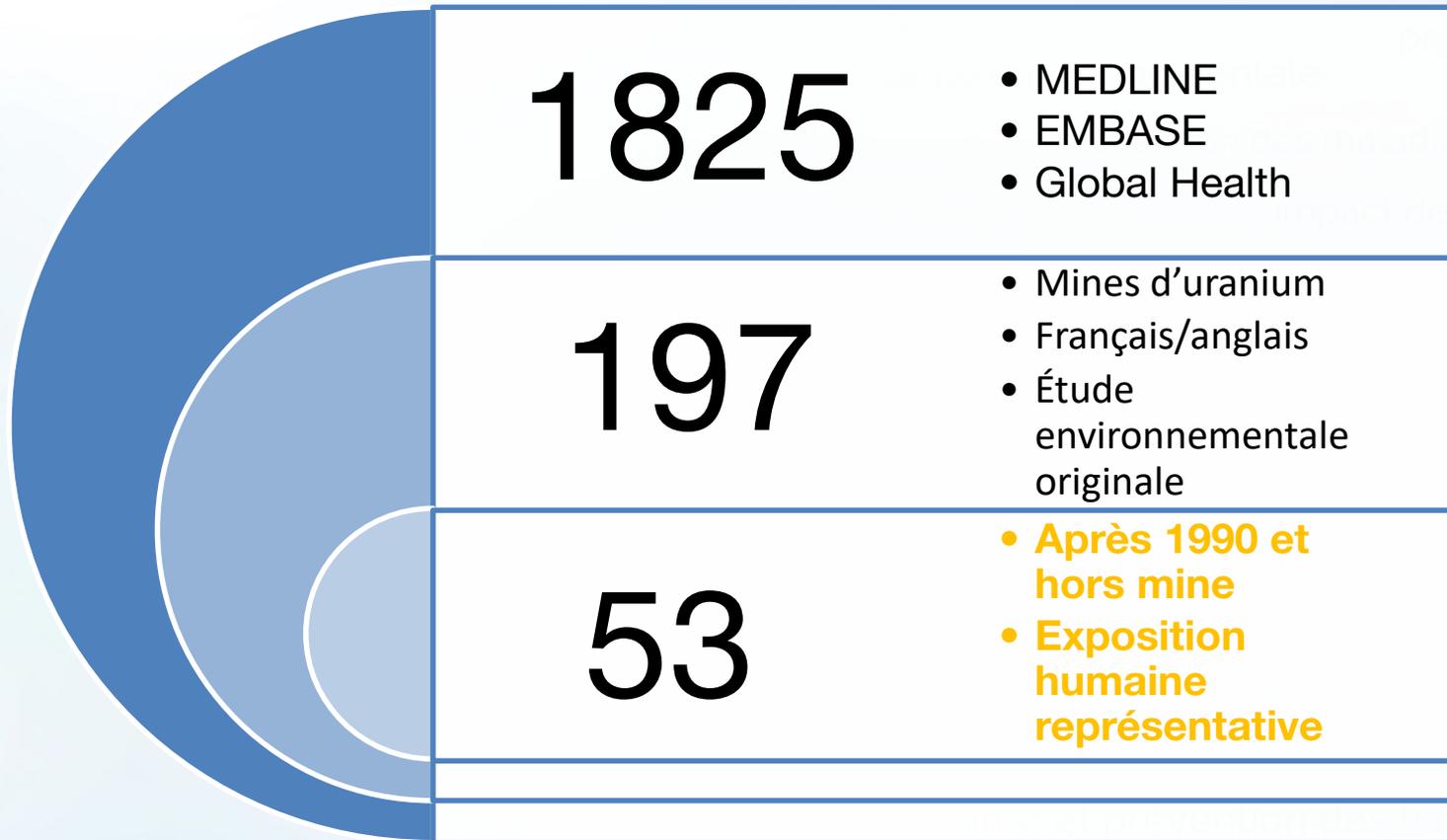
1825

- MEDLINE
- EMBASE
- Global Health

197

- Mines d'uranium
- Français/anglais
- Étude  
environnementale  
originale

# Sélection des articles scientifiques



# Trois scénarios d'exposition utilisés

Variables	Types d'occupation du territoire		
	Urbain	Utilisateur de la ressource	Autochtone
Temps quotidien passé à l'extérieur (été)	2,4 h	4,8 h	7,2 h
Temps quotidien passé à l'extérieur (hiver)	0,5 h	1,0 h	1,5 h
Temps quotidien passé à l'intérieur (été)	21,6 h	19,2 h	16,8 h
Temps quotidien passé à l'intérieur (hiver)	23,5 h	23,0 h	22,5 h
Fraction de fruits d'origine locale	10 %	10 %	100 %
Fraction de légumes racines d'origine locale	10 %	10 %	10 %
Fraction d'autres légumes d'origine locale	10 %	10 %	10 %
Fraction de viandes d'origine locale	0 %	15 %	100 %
Fraction de poissons d'origine locale	0 %	5 %	100 %

# Évaluation de l'exposition et du risque

Doses d'exposition:

mSv/an  
 $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.c-jour



Valeurs de référence:

1 mSv/an  
 $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.c-jour



Indices de risque:

IR

Uranium:  
0,6  $\mu\text{g}/\text{kg}$  p.c-jour  
toxicité rénale

# Plan de la présentation

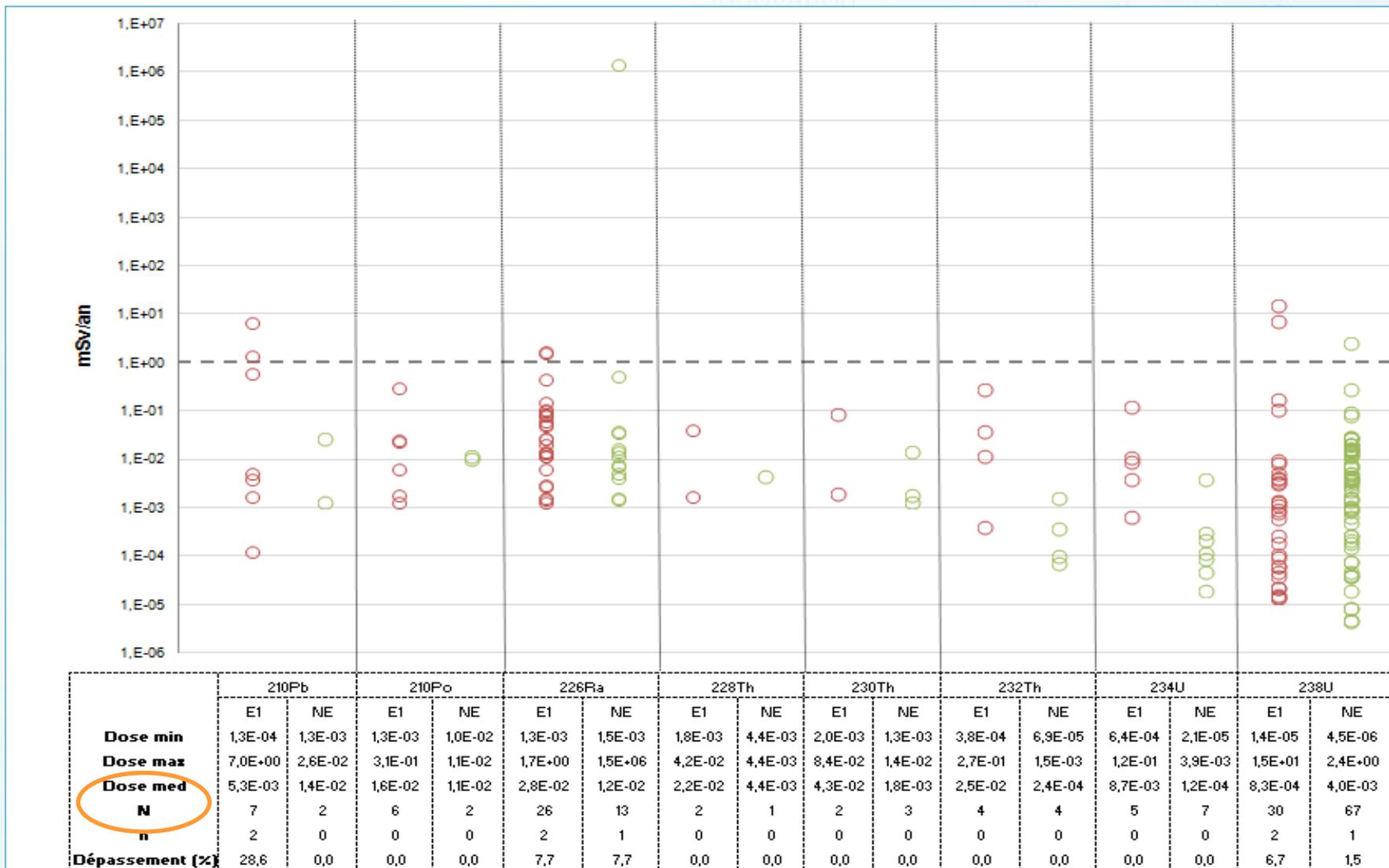


- Objectifs
- Méthodologie
- Variabilité des risques
- Contribution des mines
- Faits saillants

# Variabilité des risques

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

# Étendue des IR radiologique - ingestion d'eau























# Valeurs médianes des IR radiol.

	<sup>222</sup> Rn	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Po	Gm	<sup>210</sup> Pb	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>234</sup> U	<sup>232</sup> Th
<b>AI</b>											
<b>P&amp;FM</b>	-	<b>8,9</b> <b>(10)</b>	<b>1,2</b> <b>(10)</b>	<b>0,5</b> <b>(81)</b>	<b>0,35</b> <b>(41)</b>	-	0,06 (43)	0,008 (18)	0,09 (4)	-	<b>0,001</b> <b>(4)</b>
<b>Fruits</b>	-	-	-	<b>0,45</b> <b>(12)</b>	-	-	0,16 (6)	<b>0,003</b> <b>(11)</b>	<b>0,006</b> <b>(4)</b>	-	-
<b>AE</b>											
<b>LR</b>	-	-	-	0,01 (3)	-	-	0,08 (3)	<b>&lt;&lt; (2)</b>	<b>&lt;&lt; (2)</b>	-	-
<b>Eau</b>	-	-	0,004 (3)	0,02 (43)	0,06 (12)	-	0,01 (14)	0,003 (97)	<b>&lt;&lt; (10)</b>	<b>&lt;&lt; (16)</b>	<b>&lt;&lt; (13)</b>
<b>SRRM</b>	-	0,006 (7)	<b>&lt;&lt; (4)</b>	0,002 (25)	-	-	0,001 (13)	<b>&lt;&lt; (27)</b>	-	-	<b>&lt;&lt; (8)</b>
<b>AL</b>	-	-	-	<b>0,003 (3)</b>	-	-	<b>&lt;&lt; (3)</b>	<b>&lt;&lt; (3)</b>	<b>0,001 (2)</b>	-	-
<b>V&amp;O</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,003 (12)	-	-	-

# Valeurs médianes des IR radiol.

	<sup>222</sup> Rn	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Po	Gm	<sup>210</sup> Pb	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>234</sup> U	<sup>232</sup> Th
<b>AI</b>	<b>9,5</b> <b>(21)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>P&amp;FM</b>	-	<b>8,9</b> <b>(10)</b>	<b>1,2</b> <b>(10)</b>	<b>0,5</b> <b>(81)</b>	<b>0,35</b> <b>(41)</b>	-	0,06 (43)	0,008 (18)	0,09 (4)	-	<b>0,001</b> <b>(4)</b>
<b>Fruits</b>	-	-	-	<b>0,45</b> <b>(12)</b>	-	-	0,16 (6)	<b>0,003</b> <b>(11)</b>	<b>0,006</b> <b>(4)</b>	-	-
<b>AE</b>	<b>0,30</b> <b>(19)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>LR</b>	-	-	-	0,01 (3)	-	-	0,08 (3)	<< (2)	<< (2)	-	-
<b>Eau</b>	-	-	0,004 (3)	0,02 (43)	0,06 (12)	-	0,01 (14)	0,003 (97)	<< (10)	<< (16)	<< (13)
<b>SRRM</b>	-	0,006 (7)	<< (4)	0,002 (25)	-	-	0,001 (13)	<< (27)	-	-	<< (8)
<b>AL</b>	-	-	-	<b>0,003</b> <b>(3)</b>	-	-	<< (3)	<< (3)	<b>0,001</b> <b>(2)</b>	-	-
<b>V&amp;O</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,003 (12)	-	-	-

# Valeurs médianes des IR radiol.

	<sup>222</sup> Rn	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Po	Gm	<sup>210</sup> Pb	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>234</sup> U	<sup>232</sup> Th
<b>AI</b>	<b>9,5</b> <b>(21)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>P&amp;FM</b>	-	<b>8,9</b> <b>(10)</b>	<b>1,2</b> <b>(10)</b>	<b>0,5</b> <b>(81)</b>	<b>0,35</b> <b>(41)</b>	-	0,06 (43)	0,008 (18)	0,09 (4)	-	<b>0,001</b> <b>(4)</b>
<b>Fruits</b>	-	-	-	<b>0,45</b> <b>(12)</b>	-	-	0,16 (6)	<b>0,003</b> <b>(11)</b>	<b>0,006</b> <b>(4)</b>	-	-
<b>AE</b>	<b>0,30</b> <b>(19)</b>	-	-	-	-	<b>0,17</b> <b>(19)</b>	-	-	-	-	-
<b>LR</b>	-	-	-	0,01 (3)	-	-	0,08 (3)	<< (2)	<< (2)	-	-
<b>Eau</b>	-	-	0,004 (3)	0,02 (43)	0,06 (12)	-	0,01 (14)	0,003 (97)	<< (10)	<< (16)	<< (13)
<b>SRRM</b>	-	0,006 (7)	<< (4)	0,002 (25)	-	-	0,001 (13)	<< (27)	-	-	<< (8)
<b>AL</b>	-	-	-	<b>0,003</b> <b>(3)</b>	-	-	<< (3)	<< (3)	<b>0,001</b> <b>(2)</b>	-	-
<b>V&amp;O</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,003 (12)	-	-	-

# Valeurs médianes des IR radiol.

	<sup>222</sup> Rn	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Po	Gm	<sup>210</sup> Pb	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>234</sup> U	<sup>232</sup> Th
AI	9,5 (21)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P&FM	-	8,9 (10)	1,2 (10)	0,5 (81)	0,35 (41)	-	0,06 (43)	0,008 (18)	0,09 (4)	-	0,001 (4)
Fruits	-	-	-	0,45 (12)	-	-	0,16 (6)	0,003 (11)	0,006 (4)	-	-
AE	0,30 (19)	-	-	-	-	0,17 (19)	-	-	-	-	-
LR	-	-	-	0,01 (3)	-	-	0,08 (3)	<< (2)	<< (2)	-	-
Eau	-	-	0,004 (3)	0,02 (43)	0,06 (12)	-	0,01 (14)	0,003 (97)	<< (10)	<< (16)	<< (13)
SRRM	-	0,006 (7)	<< (4)	0,002 (25)	-	-	0,001 (13)	<< (27)	-	-	<< (8)
AL	-	-	-	0,003 (3)	-	-	<< (3)	<< (3)	0,001 (2)	-	-
V&O	-	-	-	-	-	-	-	0,003 (12)	-	-	-

# Valeurs médianes des IR chimiques

	As	Cd	U	Se	Mo	Hg	Pb
<b>Eau</b>	<b>8,1</b> <b>(15)</b>	0,16 (4)	<b>1,2</b> <b>(97)</b>	<b>0,02</b> <b>(16)</b>	0,78 (5)	0,68 (4)	<b>0,18</b> <b>(4)</b>
<b>Poissons &amp; fruits de mer</b>	<b>6,1</b> <b>(4)</b>	<b>7,9</b> <b>(4)</b>	<b>1,0</b> <b>(18)</b>	<b>1,0</b> <b>(23)</b>	-	-	<b>0,08</b> <b>(4)</b>
<b>Fruits</b>	-	-	0,72 (11)	-	-	-	-
<b>Viande &amp; Os</b>	-	-	0,028 (12)	-	-	-	-
<b>Sol-Roc-Résidus-Minerais</b>	-	-	0,02 (27)	-	-	-	-
<b>Légumes racines</b>	-	-	<b>0,01</b> <b>(3)</b>	-	-	-	-
<b>Autres légumes</b>	-	-	<b>0,004</b> <b>(3)</b>	-	-	-	-

# Plan de la présentation



- Objectifs
- Méthodologie
- Variabilité des risques
- Contribution des mines
- Faits saillants

# Contribution des mines

santé

recherche

Innovation

centre d'expertise et de référence

maladies infectieuses

promotion de sair

santé environnementale

prévention des maladies chroniques

impact des politiques pub

Toxicologie

santé au travail

développement des personnes et des communautés

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

sur l'état de santé de la population

microbiologie

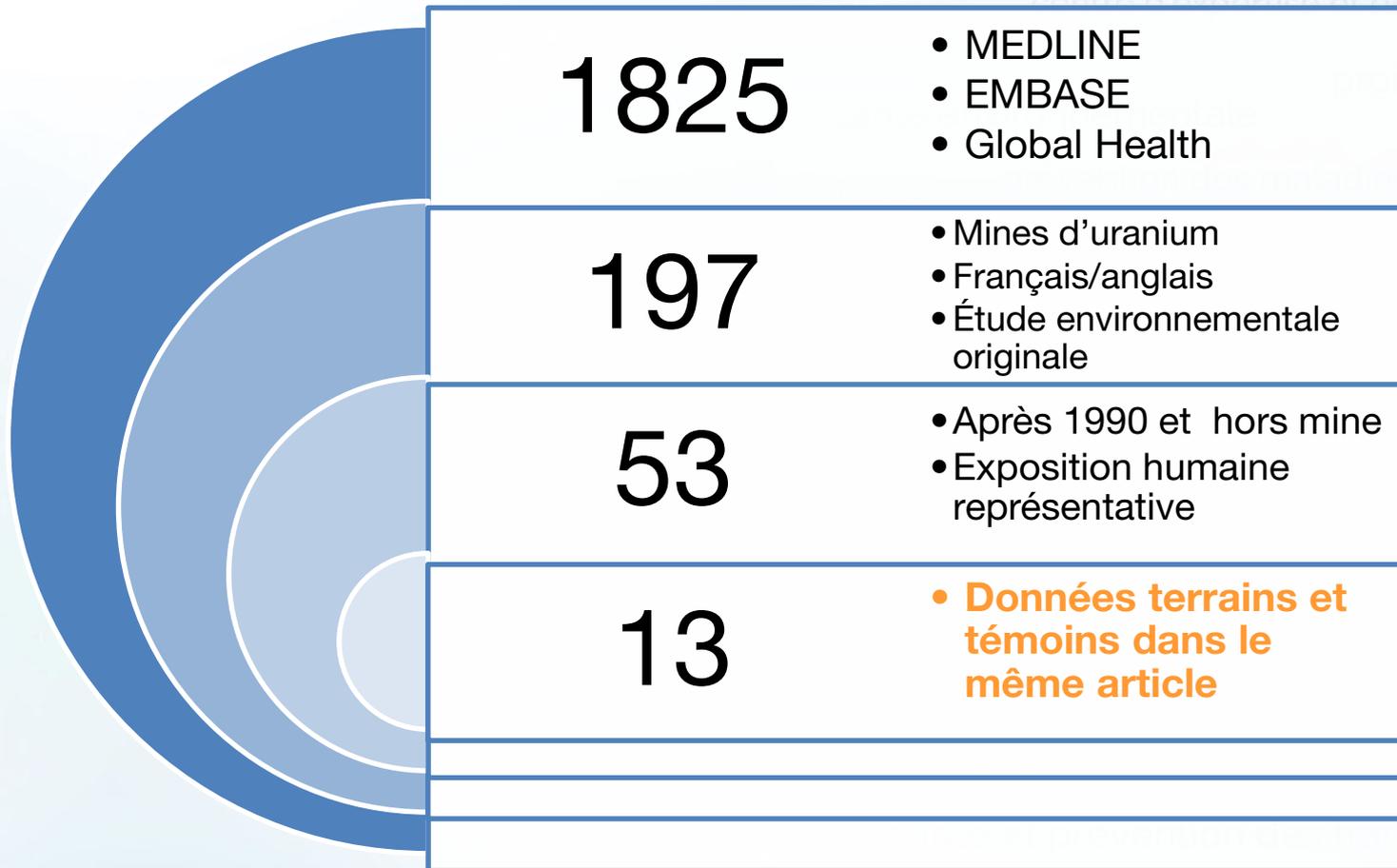
sécurité et prévention des traumatismes

recherche

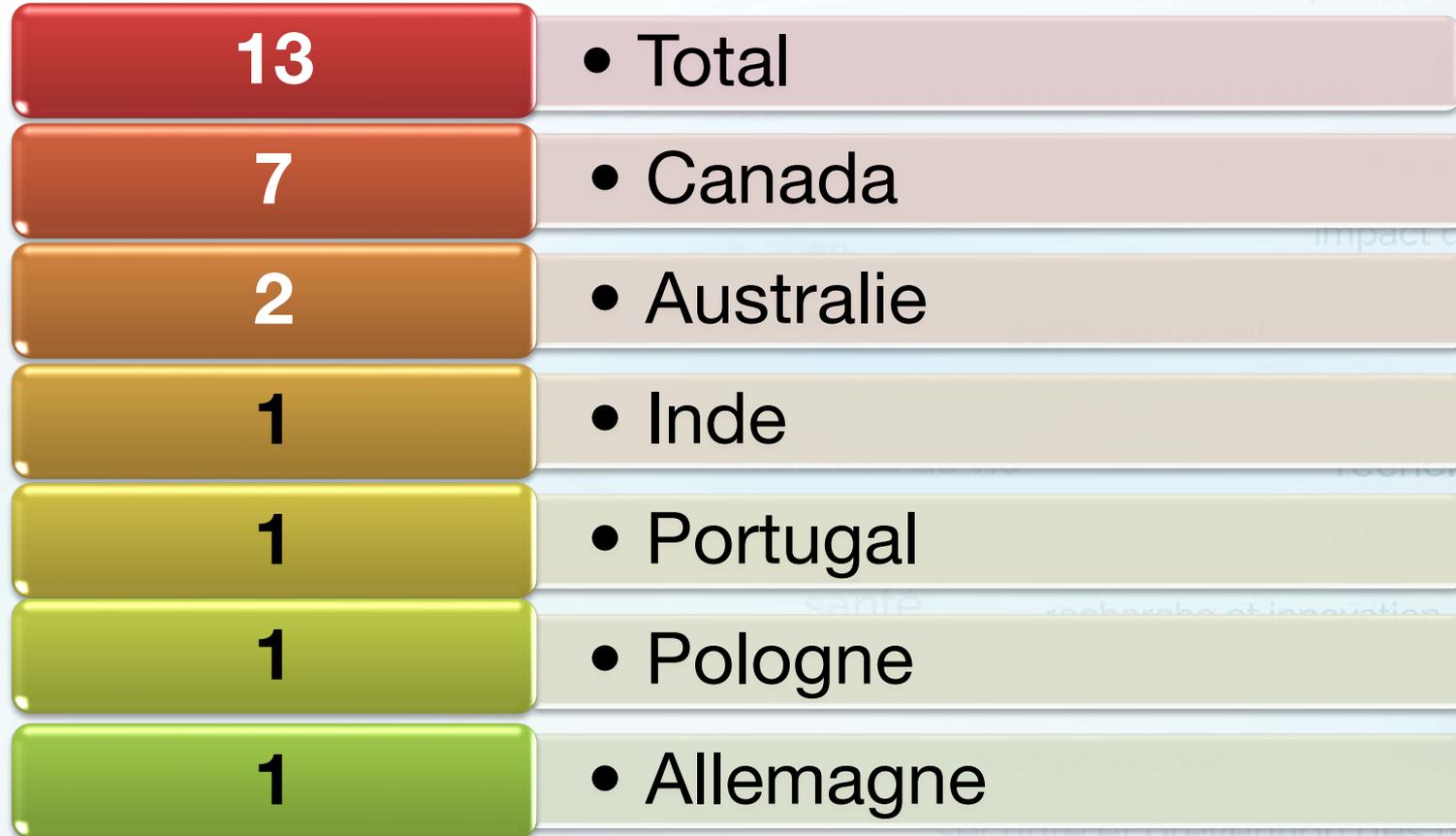
santé au tra

**Institut national  
de santé publique**  
Québec 

# Sélection des articles scientifiques



# Répartition des études par pays



# Contribution de la mine

IR Terrain

IR Témoin

Max



Min

$$\Delta IR > 0$$

Max



Min

Institut national  
de santé publique

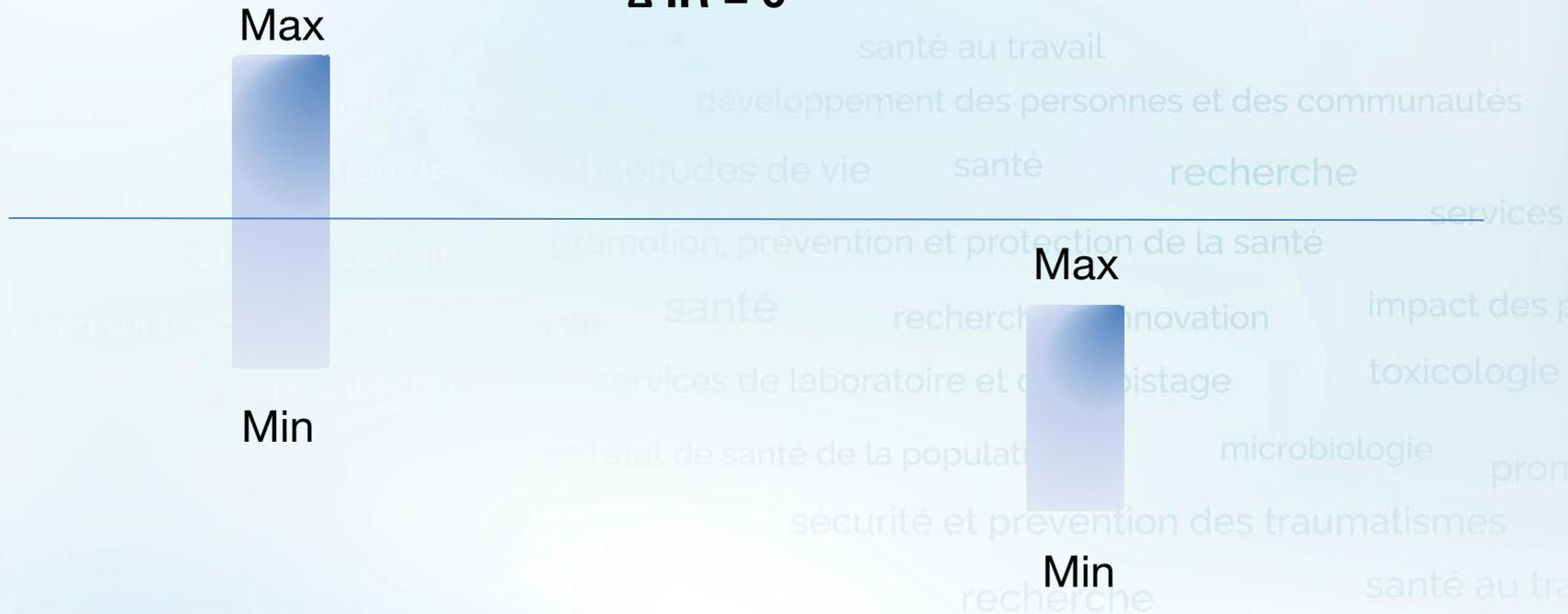
Québec 

# Absence de contribution de la mine

IR Terrain

IR Témoin

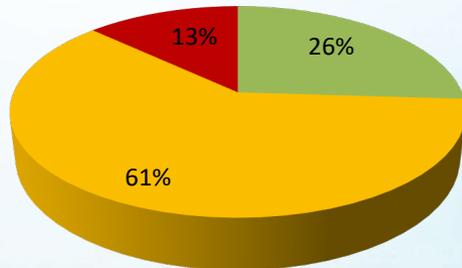
$$\Delta IR = 0$$



# Répartition $\Delta$ IR obtenus

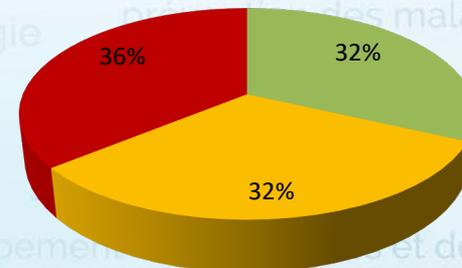
## Eau de surface (n=89)

■  $\Delta$  IR = 0   ■  $0 < \Delta$  IR  $\leq$  1   ■  $\Delta$  IR > 1



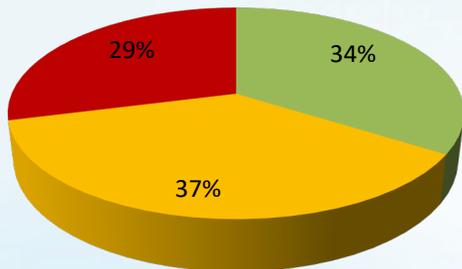
## Os de poissons (n=28)

■  $\Delta$  IR = 0   ■  $0 < \Delta$  IR  $\leq$  1   ■  $\Delta$  IR > 1



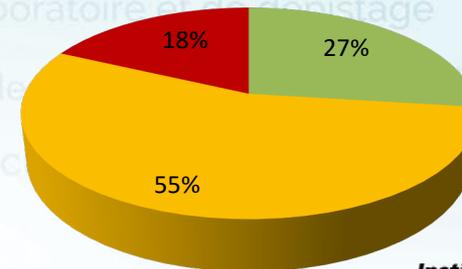
## Poissons (n=38)

■  $\Delta$  IR = 0   ■  $0 < \Delta$  IR  $\leq$  1   ■  $\Delta$  IR > 1



## Moules (n=22)

■  $\Delta$  IR = 0   ■  $0 < \Delta$  IR  $\leq$  1   ■  $\Delta$  IR > 1



# Dépassements des IR pour l'eau de surface

Pays	Type de site	Élément	n>1	Étendue	Référence
Canada (Ontario)	inactif	U	2	2,28-5,54	Clulow et coll. (1998a)
Portugal	inactif	210Po U	4 7	1,08-1,55 2,29-28,60	Carvalho et coll. (2009)
Pologne	inactif	226Ra	1	1,20	Chrusciel et coll. (1996)

# Dépassements des IR pour les poissons

Pays	Type de site	Élément	n>1	Étendue	Référence
Canada (Sask)	inactif	U	2	1,01-78,87	Muscatello et Janz (2009ab)
		Sélénium	1	2,01	
		Arsenic	1	5,78	
		Cadmium	1	14,64	
Canada (Sask)	actif	Sélénium	8	1,70-6,33	Mucscatello et coll. (2006;2008) Phibbs et coll. (2011)

# Dépassements des IR pour les os de poissons

Pays	Type de site	Élément	n>1	Étendue	Référence
Canada (Ontario)	inactif	$^{210}\text{Po}$ ,	6	2,24-13,47	Clulow et coll. (1998ab)
		$^{210}\text{Pb}$ ,	3	4,28-51,84	
		$^{226}\text{Ra}$			
		U			
Canada (Sask)	inactif	U	1	302,63	Muscattello et Janz (2009a)
Canada (Sask)	actif	Sélénium	2	1,60-4,01	Muscattello et coll. (2006)

# Dépassements des IR pour les moules

Pays	Type de site	Élément	n>1	Étendue	Référence
Australie	actif	$^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$	2 1	1,23-1,27 1,64	Bollhoger et coll. (2012)
Australie	inactif	$^{226}\text{Ra}$	1	2,27	Ryan et Janz (2008)

# Plan de la présentation



- Objectifs
- Méthodologie
- Variabilité des risques
- Contribution des mines
- **Faits saillants**

# Faits saillants

santé recherche  
innovation centre d'expertise et de référence  
maladies infectieuses promotion de saine  
santé environnementale se  
toxicologie prévention des maladies chroniques  
innovation impact des politiques pub  
santé au travail  
développement des personnes et des communautés

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)

sur l'état de santé de la population microbiologie prom  
sécurité et prévention des traumatismes  
recherche santé au tra

**Institut national  
de santé publique**  
Québec 

# Variabilité des expositions et des risques

- Variabilité importante du bruit de fond régional
- Données canadiennes < internationales
- Risques théoriques les plus élevés :
  - inhalation de radon
  - ingestion d'eau, de poissons et moules
- Contribution des mines non différenciée à partir des distributions obtenues

# Contribution des mines



- Données limitées dans l'eau, les poissons et les moules
- Les mines d'U contribuent à l'exposition de la population notamment pour:
  - Uranium, Radium, Polonium, Plomb, Sélénium, Arsenic et le Cadmium

# Contribution des mines



- Cette contribution, dans des circonstances spécifiques :
  - pourrait engendrer des dépassements des valeurs de référence
  - pourrait s'étendre de 2 km jusqu'à 15 km au-delà de la mine, selon les données canadiennes

Merci!  
Des questions?

# Dose d'exposition radiologique

**Activité  
(Bq/L)**

**x**

**Taux  
d'ingestion  
(L/an)**

**x**

**Facteur de  
conversion  
(mSv/Bq)**



**Dose annuelle  
(mSv/an)**

# Dose d'exposition chimique

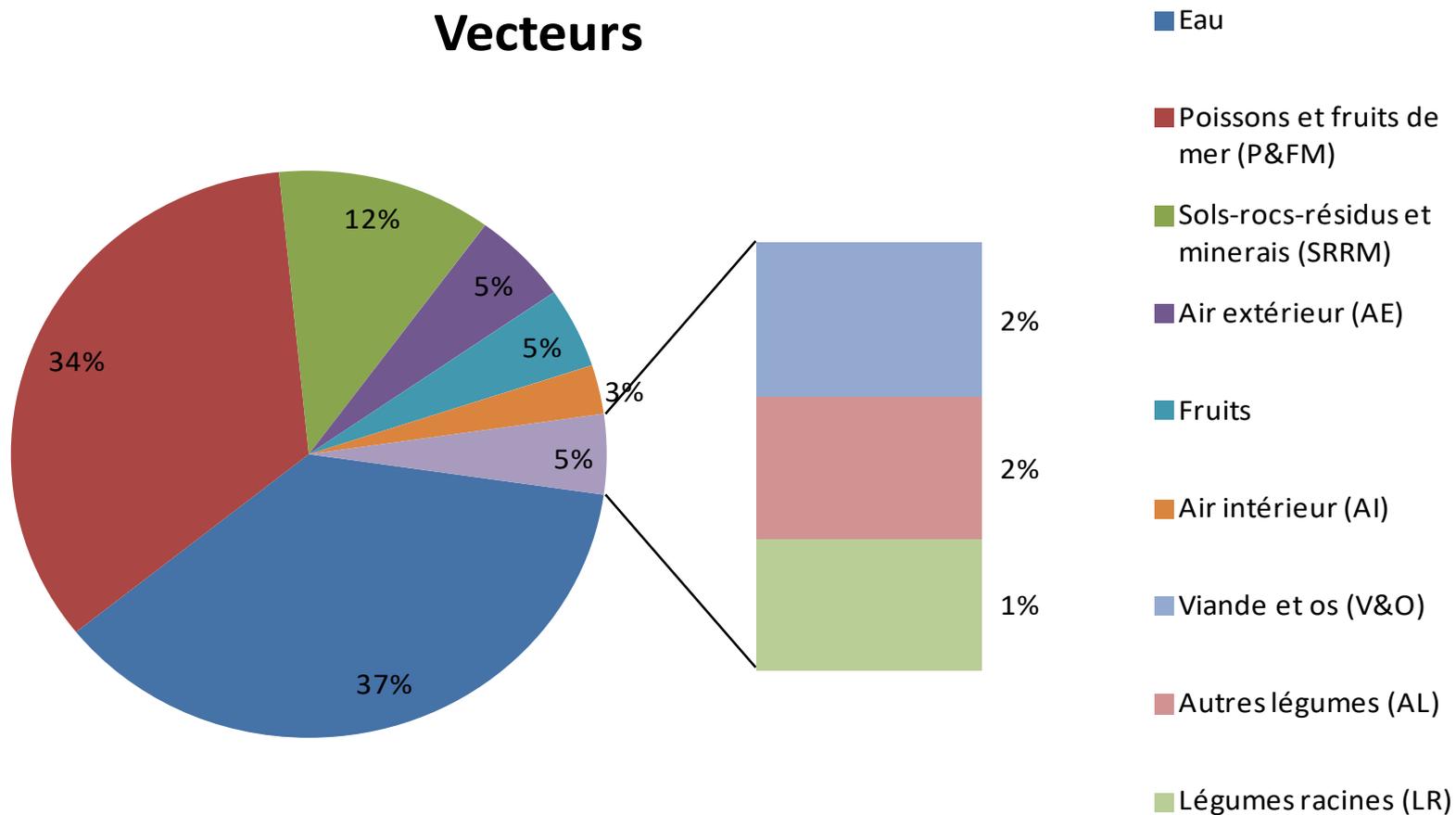
$$\text{Concentration } (\mu\text{g/L}) \times \text{Taux d'ingestion } (\text{L/jour}) \times \text{Poids corporel } (\text{Kg p.c.})$$



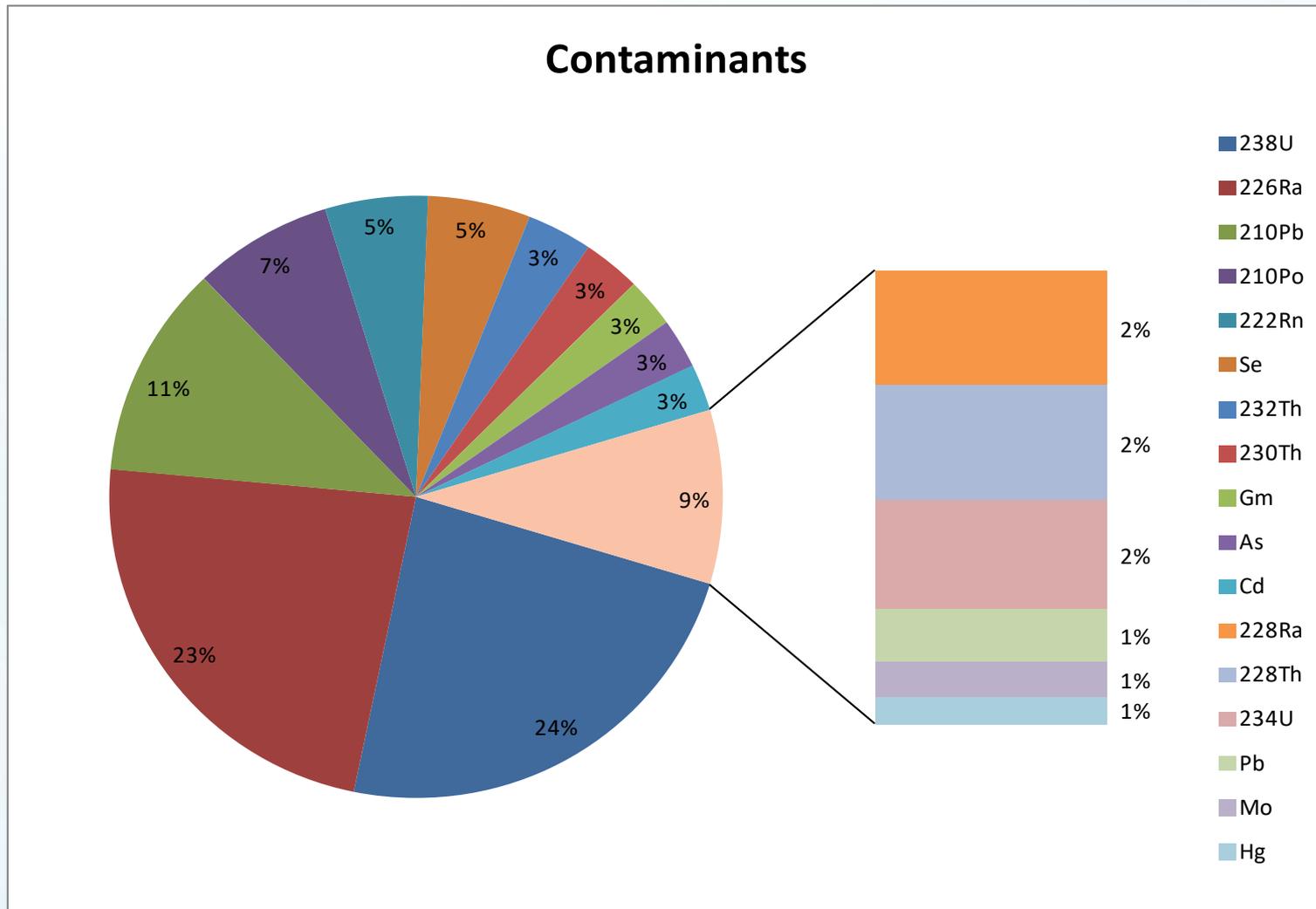
**Dose quotidienne**  
 **$\mu\text{g/kg p.c-jour}$**

# Description des données retenues

## Vecteurs



# Description des données retenues

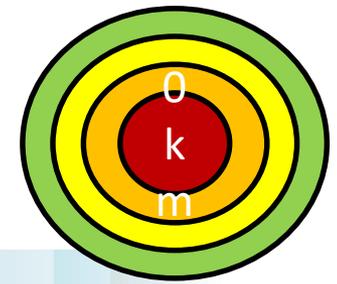


# Sélection des articles scientifiques



1825	<ul style="list-style-type: none"><li>• MEDLINE</li><li>• EMBASE</li><li>• Global Health</li></ul>
197	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mines d'uranium</li><li>• Français/anglais</li><li>• Étude environnementale originale</li></ul>
53	<ul style="list-style-type: none"><li>• Après 1990 et hors mine</li><li>• Exposition humaine représentative</li></ul>
13	<ul style="list-style-type: none"><li>• Données terrains et témoins dans le même article</li></ul>
5	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Évaluation par rapport à la distance de la mine</b></li></ul>

# Variabilité spatiale



- Sélénium (Se) dans l'eau et les poissons au Canada
  - Concentrations significativement > au bruit de fond aux distances évaluées (entre 2 et 15 km)
- Plusieurs radionucléides dans l'eau au Portugal
  - Pas de tests statistique; influence de la mine s'étend jusqu'à 7 km
- Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) dans l'eau et les moules en Australie
  - Pas de tests statistique; pas d'influence dans l'eau au delà de 1 km
  - Témoins plus élevés que les terrains pour les moules

## Question adressée par le groupe Eau au groupe d'évaluation du risque toxicologique et radiologique

**Est-ce que l'utilisation d'une eau de consommation présentant une concentration en uranium correspondant à la norme québécoise de 20 µg/L est susceptible d'engendrer des concentrations de radon dans l'air intérieur supérieures à la ligne directrice fédérale de 200 Bq/m<sup>3</sup>?**

En postulant que l'uranium présent dans l'eau de consommation est constitué à 99.27% d'<sup>238</sup>U (ATSDR, 2013) et que cet isotope (dont la concentration est de 19,855 µg/L) est à l'équilibre séculaire avec l'ensemble de ses descendants radiogéniques dans cette eau, on obtient une activité volumique en radon dissous de 0,25 Bq/L. Lorsqu'on applique le coefficient de transfert air : eau établi par le NRC (1999) pour le radon (soit 1/10 000), on obtient un apport incrémentiel théorique de radon dans l'air intérieur inférieur à 1 Bq/m<sup>3</sup> (c'est-à-dire 0,025 Bq/m<sup>3</sup>).

Bien entendu, le postulat de départ présenté n'est que très rarement observé dans les eaux naturelles. En effet, certains processus géochimiques d'enrichissement et d'appauvrissement préférentiels sont susceptibles d'affecter la charge d'isotopes fils de la chaîne de décroissance radioactive de l'<sup>238</sup>U (ex : radium 226), sans pour autant modifier celle de l'uranium (Campbell, 2006). Ainsi, la charge de radon dissous et, subséquemment l'apport incrémentiel de radon vers l'air intérieur, n'est généralement pas directement associée à la charge en uranium dans l'eau.

### Références

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2013), Toxicological profile for uranium, Accessible à: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=440&tid=77>

Campbell, T. R. (2006). Radon 222 and other occurring radionuclides in private drinking water wells and radon in indoor air in Buncombe, Henderson and Transylvania Counties, North Carolina. N.C. Department of Environment and Natural Resources, Swannanoa, NC 28778.

NRC (National Research Council) (1999). Risk assessment of radon in drinking water, Committee on the Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press.