# Le gaz radioactif Radon en France et dans le Monde : Un problème majeur de Santé publique

---

Ce travail ne constitue pas un mémoire universitaire officiel. Il s'agit d'une recherche indépendante réalisée dans un objectif d'information et de sensibilisation sur les problèmes environnementaux et sanitaires en France et dans le Monde liés au gaz radioactif Radon.
Toute ressemblance éventuelle avec un format académique vise uniquement à favoriser la clarté et la rigueur de l'exposé.

# Le gaz radioactif Radon en France et dans le Monde : Un problème majeur de Santé publique


Introduction ..... 4
1.1 Objectifs de la recherche ..... 5
1.2 Question de recherche et hypothèses ..... 6
1.3 Contexte et problématique ..... 8
1.4 Structure du mémoire ..... 9
Revue de la littérature ..... 10
2.1 État de l'art sur le sujet ..... 10
2.2 Analyse critique des travaux existants ..... 14
2.3 Cadre théorique ..... 18
Méthodologie ..... 23
3.1 Collecte des données ..... 23
3.2 Limites de la méthodologie ..... 26
3.3 Analyse des données ..... 27
3.4 Approche de recherche ..... 31
Analyse et présentation des résultats ..... 33
4.1 Interprétation des résultats ..... 34
4.2 Description des données recueillies ..... 39
4.3 Analyse des résultats ..... 42
Discussion ..... 47
5.1 Comparaison avec la littérature existante ..... 48
5.2 Synthèse des principaux résultats ..... 52
5.3 Implications théoriques et pratiques ..... 54
5.4 Limites de l'étude et pistes pour de futures recherches ..... 57
Conclusion ..... 59
6.1 Rappel de la problématique et des objectifs ..... 60
6.2 Réponse à la question de recherche ..... 61
6.3 Ouverture ..... 63
6.4 Apports et originalité du travail ..... 64
Bibliographie ..... 66

# Introduction

Le radon ($^{222}Rn$), gaz radioactif d'origine naturelle, constitue un enjeu de santé publique majeur et paradoxal. Invisible, inodore et insipide, il est issu de la désintégration de l'uranium présent dans la croûte terrestre et représente la principale source d'exposition de la population aux rayonnements ionisants d'origine naturelle (Tirmarche, p. 16). Bien qu'omniprésent dans l'environnement, c'est dans l'air confiné des bâtiments, où les individus passent en moyenne 90 % de leur temps, qu'il peut s'accumuler jusqu'à des concentrations présentant un risque sanitaire significatif (Pirard- p. 128). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) le classe comme la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme, et la première chez les non-fumeurs (Ippolito-2017, p. 1).

La reconnaissance de sa dangerosité est le fruit d'un long processus historique et scientifique. Dès le XVIe siècle, une pathologie pulmonaire mortelle affectant les mineurs d'Europe était décrite, laquelle fut bien plus tard identifiée comme un cancer du poumon dont le lien causal avec l'inhalation de radon a été formellement établi (Masse- p. 84). Malgré ces observations précoces, la radioactivité naturelle a longtemps été perçue comme un simple bruit de fond de référence, servant à évaluer l'acceptabilité des expositions d'origine artificielle et occultant ainsi son propre risque intrinsèque (Tymen- p. 16). Cette perception a été radicalement remise en cause lorsque des études épidémiologiques robustes, menées d'abord sur les mineurs puis étendues à la population générale, ont fourni des preuves concluantes de son potentiel cancérigène. Ces travaux ont conduit le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) à le classer comme « cancérogène certain pour l'homme » (Groupe 1) (Pirard- p. 128).

Cette consolidation du consensus scientifique a catalysé une réponse réglementaire structurée, notamment en Europe avec l'adoption de la directive 2013/59/EURATOM, qui a formalisé la gestion du risque radon au même titre que celle des sources artificielles de rayonnements (Kulka- 2022, p. 1). Le défi contemporain n'est donc plus tant de démontrer la nocivité du radon, mais de traduire ce corpus de connaissances en stratégies de prévention efficaces et appliquées à grande échelle.

Toutefois, un décalage persistant subsiste entre la gravité du risque, scientifiquement avéré et réglementairement encadré, et sa faible appropriation sociétale. La nature invisible et naturelle du radon constitue un obstacle majeur à sa perception comme une menace tangible. En conséquence, les efforts de sensibilisation, bien que nécessaires comme en témoignent certaines initiatives (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/), peinent à instaurer une culture du risque partagée. Le présent mémoire a pour ambition d'analyser en profondeur cette problématique complexe, en examinant les stratégies de gestion du radon en France et dans le monde. Il s'agira de dépasser le simple constat pour identifier les leviers techniques, politiques et sociologiques permettant de transformer la connaissance scientifique en une protection effective des populations.

Cette introduction posera les fondements de notre analyse en définissant d'abord le contexte et la problématique, avant de formuler la question de recherche et les hypothèses qui guideront ce travail. Elle présentera ensuite les objectifs spécifiques de l'étude et, enfin, la structure globale du mémoire.

## 1.1 Objectifs de la recherche

1.2 Objectifs de la recherche

Au regard du contexte et de la problématique préalablement définis, ce mémoire poursuit un objectif principal : analyser de manière critique et multidimensionnelle les stratégies de gestion du risque radon, afin de formuler des recommandations visant à réduire l'écart entre les connaissances scientifiques et leur application effective en santé publique. Au-delà de la simple réitération du constat de la dangerosité du radon, classé comme cancérogène pulmonaire certain pour l'homme, ce travail ambitionne d'explorer les facteurs limitants et les leviers d'action pour une prévention plus efficace, engageant ainsi une analyse systémique du risque et de sa gouvernance.

**Pour atteindre cet objectif général, notre recherche s'articule autour de cinq objectifs spécifiques et complémentaires :**

1. Synthétiser et consolider l'état des connaissances sur les déterminants de l'exposition. Le premier objectif est de fournir une base factuelle robuste sur la nature du risque. Cela implique de définir les facteurs géologiques et géochimiques qui contrôlent la distribution et la concentration du radon dans l'environnement. Il s'agira ensuite d'examiner comment ce potentiel géologique se traduit en une exposition effective dans l'habitat, en étudiant l'évolution des concentrations de radon en fonction des caractéristiques architecturales des bâtiments et des paramètres microclimatiques tels que la température et l'humidité. Cet objectif vise à établir un diagnostic rigoureux des déterminants physiques de l'exposition.

2. Évaluer de manière critique le cadre réglementaire et normatif. Le deuxième objectif consiste en un examen critique du cadre législatif et normatif mis en place aux niveaux international, européen et national. Une attention particulière sera portée à la directive 2013/59/EURATOM et à sa transposition en droit français. L'analyse dépassera la simple description des textes pour en évaluer la portée opérationnelle et les limites, en s'interrogeant sur l'efficacité des dispositifs actuels et en identifiant les lacunes, particulièrement pour l'habitat privé qui demeure la principale source d'exposition pour la population générale.

3. Analyser les freins socio-économiques et les enjeux de perception du risque. Le troisième objectif explore les dimensions sociocognitives et économiques qui conditionnent l'appropriation du risque par le public. Il s'agit de comprendre les obstacles à la prise de conscience et à l'action, tels que l'invisibilité du radon, le coût des mesures correctives, et la complexité de la communication sur un risque probabiliste et à long terme. L'analyse portera sur la manière dont les considérations sociales peuvent être mieux intégrées afin de promouvoir une radioprotection efficace et acceptée.

4. Examiner les synergies et les antagonismes avec les politiques de performance énergétique.

Le quatrième objectif analyse les interactions entre la gestion du risque radon et les politiques de rénovation énergétique. L'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments, lorsqu'elle n'est pas accompagnée d'une ventilation mécanique contrôlée et adaptée, peut générer une accumulation accrue des polluants intérieurs. Cet objectif vise à mettre en évidence ce risque d'effet paradoxal et à évaluer le degré d'intégration des enjeux de qualité de l'air intérieur dans les stratégies de construction et de rénovation durable.

5. Formuler des recommandations pour l'optimisation des politiques publiques. L'objectif final et conclusif est de synthétiser les analyses précédentes pour proposer des axes d'amélioration opérationnels. En se fondant sur l'identification des forces et faiblesses du système de gouvernance actuel, il s'agira de définir des recommandations stratégiques pour les politiques publiques, articulées autour du renforcement de la sensibilisation, de la mise en place d'incitations financières, de la formation des professionnels et d'une meilleure intégration du risque radon dans une approche globale de la santé-environnement.

## 1.2 Question de recherche et hypothèses

1.1 Question de recherche et hypothèses

Le contexte précédemment exposé, qui souligne le paradoxe d'un risque sanitaire majeur, scientifiquement avéré mais socialement sous-estimé, conduit à formuler une question de recherche centrale. Cette interrogation vise à dépasser le simple constat de la dangerosité du radon pour explorer les dynamiques et les leviers d'une gestion efficace de ce risque.

**Question de recherche principale :**

Face au décalage persistant entre la reconnaissance scientifique et réglementaire du radon comme un cancérigène certain et la faible appropriation de ce risque par le public, comment les stratégies actuelles de gestion du risque radon, aux échelles française et internationale, peuvent-elles être optimisées pour réduire de manière tangible et durable le fardeau sanitaire associé à l'exposition domestique ?

Cette question principale se décline en plusieurs sous-questions qui guideront l'analyse :

1. Sur le plan technique et scientifique : Quels sont les déterminants géologiques, architecturaux et comportementaux qui modulent le plus significativement l'exposition au radon dans l'habitat ? Les outils de mesure et les techniques de remédiation actuel sont-ils suffisamment accessibles et performants pour maîtriser cette exposition dans la diversité du parc immobilier ?

2. Sur le plan politico-réglementaire : Le cadre normatif en vigueur, notamment en France suite à la transposition de la directive EURATOM 2013/59, est-il suffisant pour impulser une dynamique de prévention à la hauteur des enjeux sanitaires, ou présente-t-il des lacunes structurelles, en particulier dans son application à l'habitat privé, qui en limitent l'impact ?

3. Sur le plan socio-économique et communicationnel : Quels sont les principaux freins sociologiques (perception du risque), économiques (coût des actions correctives) et informationnels (complexité du message) qui entravent la prise de conscience et l'adoption de comportements préventifs par la population ?

Pour répondre à ces interrogations, nous formulons une hypothèse principale, étayée par des hypothèses secondaires.

**Hypothèse principale (H1) :**

L'efficacité de la politique de gestion du risque radon est aujourd'hui freinée non pas par une insuffisance des connaissances scientifiques ou des solutions techniques, mais par une approche majoritairement descendante et réglementaire. Cette dernière ne répond que partiellement aux barrières socio-économiques et au profond déficit de perception du risque au sein de la société. Une réduction significative de l'exposition ne pourra être atteinte qu'en complétant le cadre normatif par des stratégies proactives et intégrées, alliant sensibilisation ciblée, incitations financières et accompagnement technique des particuliers.

Cette hypothèse centrale est soutenue par les hypothèses secondaires suivantes :

**Hypothèse 2 (H2) :**

Bien que la cartographie du potentiel radon constitue un outil de priorisation essentiel, sa traduction en actions préventives concrètes se heurte à l'hétérogénéité des contextes locaux et à la complexité du parc immobilier. L'application effective des solutions de remédiation dépend moins de leur disponibilité technique que de la capacité des acteurs (professionnels du bâtiment, collectivités) à les adapter aux spécificités de chaque habitation.

**Hypothèse 3 (H3) :**

Les politiques publiques de rénovation énergétique, axées sur l'amélioration de l'étanchéité à l'air, génèrent un risque d'effet paradoxal. En l'absence d'une articulation systématique avec la problématique du radon, notamment par l'intégration d'une ventilation mécanique performante, ces politiques peuvent involontairement exacerber l'exposition des occupants et transformer des bâtiments à haute performance énergétique en « pièges à radon. »

**Hypothèse 4 (H4) :**

La nature invisible, naturelle et chronique du risque radon entrave sa perception et sa hiérarchisation par les individus face à des menaces plus médiatisées. Comme le suggèrent des initiatives de sensibilisation (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/),
la communication doit évoluer d'une approche technique vers une démarche pédagogique, localisée et responsabilisante, axée sur les bénéfices d'un habitat sain plutôt que sur la seule menace statistique.

La vérification de ces hypothèses constituera le fil conducteur de ce mémoire. Elle permettra de procéder à une analyse critique des stratégies en place, d'identifier les points de blocage et, in fine, de proposer des pistes d'amélioration pour que la gestion du risque radon passe d'une préoccupation d'experts à une véritable culture de la prévention en santé-environnement.

## 1.3 Contexte et problématique

1.2 Contexte et problématique

Le radon ($^{222}Rn$), gaz radioactif d'origine naturelle issu de la désintégration de l'uranium présent dans la croûte terrestre, constitue un enjeu de santé publique majeur et complexe. Incolore, inodore et insipide, il est imperceptible par les sens humains et s'infiltre depuis le sol dans les espaces clos, notamment les habitations et les lieux de travail, où il peut s'accumuler jusqu'à atteindre des concentrations présentant un risque sanitaire significatif. L'inhalation du radon et de ses descendants radioactifs à vie courte représente la source prépondérante d'exposition de la population aux rayonnements ionisants d'origine naturelle, surpassant les autres sources cosmiques ou telluriques.

La problématique du radon est marquée par un paradoxe historique. Pendant longtemps, la radioactivité naturelle a été considérée comme un bruit de fond inoffensif, servant de point de référence pour évaluer l'acceptabilité des expositions artificielles d'origine anthropique.

Cette perception d'une « naturalité » bénigne a durablement occulté le risque sanitaire et freiné la prise de conscience collective et politique. Toutefois, ce caractère naturel et ubiquitaire ne diminue en rien sa dangerosité avérée.

La reconnaissance du radon comme agent cancérigène majeur repose sur un long processus d'observations historiques et de validations scientifiques. Dès 1556, Agricola décrivait un excès de maladies pulmonaires mortelles chez les mineurs d'Europe de l'Est. Ce n'est qu'au XXe siècle que cette « maladie des mineurs » fut formellement identifiée comme un cancer du poumon et son lien causal avec l'inhalation de radon scientifiquement établi, notamment grâce aux études épidémiologiques menées sur des cohortes de mineurs d'uranium.

Ces données, obtenues à des niveaux d'exposition élevés, ont soulevé une question fondamentale pour la santé publique : quel est le risque pour la population générale, exposée à des concentrations plus faibles mais sur des durées beaucoup plus longues ? Cette interrogation renvoie à la complexité de l'évaluation des risques liés aux faibles doses d'exposition. Les données épidémiologiques et radiobiologiques convergent vers une relation dose-effet linéaire sans seuil (LNT), impliquant une augmentation du risque proportionnelle à l'exposition cumulée, sans niveau sécuritaire. Sur la base de ces preuves consolidées, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé le radon comme un cancérigène certain pour l'homme (Groupe 1) dès 1988.

Ce consensus scientifique a servi de fondement à l'action réglementaire. L'adoption de la Directive 2013/59/EURATOM a marqué une étape décisive en Europe, en étendant le champ de la radioprotection aux expositions aux sources naturelles de rayonnements ionisants. Cette directive impose aux États membres de l'Union européenne d'établir des plans d'action nationaux, de cartographier les zones à potentiel radon et de fixer un niveau de référence national pour la concentration dans l'air intérieur, qui ne doit pas excéder 300 $Bq/m^3$. Ce cadre législatif a ainsi institutionnalisé la gestion du radon comme un risque sanitaire maîtrisable.

Malgré ces avancées, la problématique du radon demeure largement sous-estimée. Le fardeau sanitaire est considérable : le radon serait responsable d'au moins 3 000 décès par cancer du poumon chaque année en France, ce qui le positionne comme la deuxième cause de cette pathologie après le tabagisme, et la première chez les non-fumeurs. La nature invisible du risque rend sa perception et sa communication particulièrement difficiles. En outre, une tension notable existe entre les impératifs de santé publique et les politiques de transition énergétique (si c'est encore possible). La recherche d'une meilleure isolation thermique conduit à une étanchéité à l'air accrue des bâtiments, laquelle, en l'absence de système de ventilation mécanique adapté, peut exacerber l'accumulation de radon et transformer des bâtiments à haute performance énergétique en environnements à risque accru.

Enfin, la France, après une prise de conscience jugée tardive, a renforcé son cadre réglementaire. Cependant, la mise en œuvre effective de cette politique se heurte à des obstacles persistants : un faible taux de mesurage dans le parc immobilier privé, le coût des travaux de remédiation comme frein à l'action pour les particuliers, et la difficulté de traduire les connaissances scientifiques en une culture généralisée de la prévention, un enjeu déjà souligné dans des travaux de sensibilisation tels que (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/) .

En somme, la problématique du radon se situe à l'intersection de la géologie, de la physique des rayonnements, du génie civil, de la santé publique et de la sociologie du risque. Le temps n'est plus à démontrer sa dangerosité, mais à concevoir et déployer des stratégies efficaces pour protéger la population contre ce risque naturel, invisible et omniprésent. Cette étude se propose d'analyser en profondeur les multiples facettes de cet enjeu sanitaire et environnemental, à l'échelle nationale et internationale.

## 1.4 Structure du mémoire

Afin d'élucider le paradoxe central de cette étude – un risque sanitaire majeur, scientifiquement établi mais socialement sous-estimé – le présent mémoire s'articule en six chapitres. Cette structure a été conçue pour guider le lecteur selon une progression logique, depuis la consolidation des savoirs scientifiques jusqu'à la formulation de perspectives critiques et opérationnelles, offrant ainsi une analyse intégrée des enjeux multidimensionnels du radon.

Le parcours débute par une revue de la littérature (chapitre 2) qui établit le socle de connaissances. Ce chapitre synthétise l'état de l'art sur la genèse du radon, ses mécanismes de toxicité et les preuves épidémiologiques de sa cancérogénicité. Il y est également exposé le cadre théorique qui sous-tend l'évaluation du risque, notamment le modèle linéaire sans seuil (LNT) (Tymen- p. 10), tout en menant une analyse critique des travaux existants.

La méthodologie (chapitre 3) est ensuite détaillée, justifiant le choix d'une revue systématique à approche transdisciplinaire. Cette section explicite la pertinence de cette démarche qualitative pour analyser les causes systémiques du décalage entre le savoir expert et son application en santé publique. Le cœur du travail réside dans le chapitre 4, consacré à l'analyse et à la présentation des résultats. S'appuyant sur un corpus de données hétérogènes (scientifiques, réglementaires, institutionnelles), ce chapitre identifie les freins à une prise en charge efficace du risque radon, en structurant l'analyse selon trois axes : les solutions techno-scientifiques, le cadre politico-réglementaire et les barrières socio-communicationnelles.

La discussion (chapitre 5) met en perspective les résultats obtenus. Elle confronte nos conclusions à la littérature existante afin d'en souligner l'originalité, examine les limites de l'étude et explore les implications théoriques et pratiques du diagnostic. Ce chapitre a pour ambition de transformer l'analyse critique en une base de réflexion pour un renouvellement de l'action publique. Enfin, la conclusion (chapitre 6) synthétise les apports du mémoire, répond de manière explicite à la question de recherche et propose des pistes d'action et de recherche futures. Cette démarche structurée a pour finalité de démontrer que la gestion du radon ne relève plus seulement de l'expertise technique, mais constitue un enjeu de politique de santé environnementale à part entière.

# Revue de la littérature

La reconnaissance du radon comme un enjeu majeur de santé publique s'appuie sur un siècle de recherches pluridisciplinaires, dont la maîtrise est indispensable pour appréhender les défis contemporains de sa gestion. Ce chapitre propose une revue structurée, synthétique et critique du corpus scientifique qui définit cette problématique. L'objectif est de fournir une grille de lecture rigoureuse permettant d'élucider le paradoxe entre un risque solidement établi par la science et sa faible appropriation par la société et les pouvoirs publics.

Le parcours débutera par l'établissement de l'état de l'art, qui synthétise le consensus scientifique actuel. Cette première partie retrace la chaîne de causalité, depuis l'identification des sources géologiques du radon et son comportement dans l'environnement bâti, jusqu'à l'élucidation des mécanismes radiobiologiques de sa toxicité (Tymen- p. 48). Elle souligne la convergence des preuves expérimentales et épidémiologiques, notamment celles issues des études sur les mineurs d'uranium, qui ont permis de classer le radon comme un cancérogène certain pour l'homme (Tymen- p. 84, Tymen- p. 63).

Le chapitre s'attachera ensuite à exposer le cadre théorique qui structure ces savoirs et modélise le risque. Cette section examinera les paradigmes biophysiques fondamentaux, en particulier le modèle linéaire sans seuil (LNT), qui postule l'absence de dose inoffensive et constitue la pierre angulaire de la radioprotection pour les faibles expositions (Tymen- p. 10). Seront également détaillés les modèles épidémiologiques d'évaluation quantitative du risque, incluant l'interaction synergique avec le tabagisme, ainsi que les principes socio-réglementaires comme l'optimisation de la protection (ALARA), qui guident la gestion de ce risque naturel.

Toutefois, une compréhension mature du sujet impose une analyse critique des travaux existants. Cette troisième partie abordera les débats méthodologiques et les incertitudes qui jalonnent la recherche. Elle évaluera la robustesse des différentes approches épidémiologiques – cohortes professionnelles, études écologiques et études cas-témoins résidentielles (Tymen- p. 82) – en portant une attention particulière aux défis inhérents à l'extrapolation de la relation dose-effet des fortes vers les faibles expositions, un enjeu central pour l'évaluation du risque en population générale (Tymen- p. 116).

À travers ce triple mouvement de synthèse, de conceptualisation et de critique, ce chapitre établit les fondements scientifiques nuancés de la problématique du radon. Il constitue une étape indispensable pour éclairer la suite de ce mémoire, en fournissant les clés d'analyse nécessaires pour comprendre le décalage persistant entre la certitude du danger et les difficultés de sa prise en charge effective.

## 2.1 État de l'art sur le sujet

2.1 État de l'art sur le sujet

Le corpus des connaissances scientifiques relatives au radon est le fruit de plus d'un siècle de recherche multidisciplinaire, aboutissant à un socle de savoirs solide et mature. Il repose sur la convergence de données issues de la physique nucléaire, de la géologie, de la radiobiologie, de la toxicologie expérimentale et, de manière décisive, de l'épidémiologie. Cette section a pour objectif de synthétiser ce socle de connaissances, en partant de la caractérisation physico-chimique du risque jusqu'à la modélisation de son impact sur la santé humaine. Elle vise à établir le consensus scientifique qui sert de fondement aux actions de santé publique et de socle de référence pour l'analyse critique des politiques menées.

## Origine, Comportement et Métrologie du Radon

La compréhension du risque radon débute par l'identification de sa source et de son comportement dans l'environnement. Le radon-222 ($^{222}$Rn), l'isotope d'intérêt majeur en santé publique, est un gaz noble radioactif, produit de la chaîne de désintégration de l'uranium-238 ($^{238}$U), un radionucléide primordial présent en concentrations variables dans la croûte terrestre. Sa formation s'effectue au sein des roches et des sols, où son précurseur direct, le radium-226 ($^{226}$Ra), se désintègre. Sa nature gazeuse lui confère une mobilité que ne possèdent pas ses précurseurs solides, lui permettant de migrer à travers la porosité et les fissures du sol par diffusion moléculaire ou par convection, un transport souvent amplifié par les gradients de pression.

Dans l'air extérieur, les concentrations de radon demeurent généralement faibles en raison d'une dilution rapide dans l'atmosphère. L'enjeu sanitaire provient de son accumulation dans les espaces clos, notamment les bâtiments. En raison de leur contact avec le sol et de la dépression qu'ils génèrent fréquemment (effet de cheminée), les bâtiments agissent comme des zones de confinement où le gaz est aspiré depuis le sol à travers les imperfections de l'interface bâtiment-sol (fissures, passages de canalisations). La concentration intérieure résulte ainsi d'une triple interaction : la composition géologique du sous-sol (les terrains granitiques étant les plus émissifs), sa perméabilité, et les caractéristiques architecturales du bâtiment (type de fondation, étanchéité, système de ventilation).

Bien que la littérature scientifique ait identifié quatre compartiments d'exposition — l'eau potable, l'air intérieur, l'air extérieur et le sol — l'inhalation d'air intérieur dans l'habitat et sur les lieux de travail constitue la voie d'exposition prépondérante. Des études menées internationalement ont quantifié les concentrations dans les habitations et les édifices publics, révélant des niveaux pouvant varier de quelques becquerels par mètre cube (Bq/m$^3$) à plusieurs milliers, dépassant parfois largement les seuils d'action recommandés.

La quantification de cette exposition invisible repose sur des techniques de mesure éprouvées. Une revue de la littérature a identifié trois principales approches métrologiques : les détecteurs solides de traces nucléaires (SSNTD), la spectrométrie (alpha et gamma), et la scintillation liquide. Parmi ces dispositifs, les dosimètres passifs à base de polymère CR-39 (Columbia Resin-39) sont les plus représentatifs et les plus déployés pour les campagnes nationales de mesurage, en raison de leur faible coût, de leur simplicité et de leur capacité à fournir une mesure intégrée sur une longue période (plusieurs mois), lissant ainsi les variations temporelles significatives. Ces outils ont été fondamentaux pour passer de la suspicion de risque à une quantification précise de l'exposition des populations, condition indispensable à l'évaluation épidémiologique.

## Mécanismes de Toxicité et Preuves Expérimentales

La toxicité du radon ne provient pas du gaz lui-même, mais de ses descendants radioactifs à vie courte : le polonium-218 ($^{218}$Po), le plomb-214 ($^{214}$Pb), le bismuth-214 ($^{214}$Bi) et le polonium-214 ($^{214}$Po). Ces descendants, à l'état de particules solides, s'adsorbent sur les aérosols atmosphériques. Une fois inhalés, ces aérosols contaminés se déposent préférentiellement sur l'épithélium des voies respiratoires. C'est au niveau de ce tissu que se manifeste l'essentiel de la toxicité radiobiologique.

Le mécanisme d'action est de nature physique : lors de leur désintégration, les isotopes de polonium émettent des particules alpha (noyaux d'hélium). Ces particules, très énergétiques mais dotées d'un parcours très court (quelques dizaines de micromètres), délivrent une dose d'énergie très localisée et intense aux cellules qu'elles traversent.

Les cellules basales de l'épithélium bronchique, cellules souches assurant le renouvellement tissulaire et particulièrement radiosensibles, constituent les cibles critiques.

Cette irradiation alpha induit des lésions complexes de l'ADN, notamment des cassures double-brin, difficiles à réparer et fortement mutagènes. L'accumulation de ces dommages génétiques au cours d'une exposition chronique peut déclencher une instabilité génomique, une caractéristique fondamentale des cellules cancéreuses. Ce processus, qualifié de « phénotype mutateur », se caractérise par une accélération de la fréquence des mutations, augmentant la probabilité d'altération d'oncogènes ou de gènes suppresseurs de tumeurs. Des études moléculaires ont même permis d'identifier des signatures mutationnelles potentielles, telle une fréquence accrue de la transversion G-T au codon 249 du gène p53 dans les cancers du poumon radio-induits. La cancérogenèse apparaît ainsi comme un processus stochastique multi-étapes, initié par des lésions physiques de l'ADN.

Ces mécanismes, déduits de la radiobiologie, ont été validés et étudiés par des modèles expérimentaux, principalement chez le rat. L'exposition de rongeurs par inhalation a permis de reproduire la cancérogenèse pulmonaire observée chez l'homme. Ces études ont apporté plusieurs confirmations cruciales :

1. Relation dose-effet : Elles ont démontré une augmentation de l'incidence des cancers pulmonaires avec l'exposition cumulée, suivant une tendance similaire à celle observée chez les mineurs d'uranium, et ce même à de faibles expositions.

2. Histopathologie : Les types histologiques de tumeurs induites (carcinomes épidermoïdes, adénocarcinomes) sont comparables à ceux observés chez l'homme.

3. Rôle des conditions d'exposition : Les modèles animaux ont montré que, pour une même exposition cumulée, un étalement de l'exposition dans le temps (faible débit de dose) pouvait augmenter l'incidence des cancers, un phénomène pertinent pour l'exposition résidentielle chronique.

4. Synergie avec le tabagisme : Ces expériences ont confirmé l'interaction synergique entre le radon et la fumée de cigarette. Des rats exposés au tabac *après* une exposition au radon ont développé une incidence de cancers pulmonaires jusqu'à quatre fois supérieure à celle des rats exposés au radon seul, validant le rôle promoteur du tabac sur les lésions initiées par le radon.

La recherche expérimentale a ainsi fourni des preuves biologiques robustes de la causalité, élucidé les mécanismes sous-jacents et permis de quantifier les relations dose-effet dans des conditions contrôlées, offrant un support indispensable aux conclusions épidémiologiques.

**La Quantification du Risque : Les Données Épidémiologiques Humaines**

Si l'expérimentation établit la plausibilité biologique du danger, l'épidémiologie a fourni la preuve irréfutable du risque pour l'homme et a permis sa quantification. L'état de l'art repose sur deux piliers complémentaires : les études de cohortes de mineurs et les études cas-témoins en population générale.

**Les Études Fondatrices : Les Cohortes de Mineurs**

Historiquement, la reconnaissance du risque radon est indissociable de l'exploitation minière. Dès le XVIe siècle, une « maladie des mineurs » était décrite, mais elle ne fut identifiée comme un cancer du poumon lié au radon qu'au XXe siècle. À partir des années 1950, des études de cohortes ont suivi des milliers de mineurs d'uranium et d'autres minerais à travers le monde (États-Unis, France, République Tchèque, Chine), populations exposées à des concentrations de radon très élevées.

Ces études ont collectivement permis d'établir des conclusions d'une grande robustesse : * Lien de causalité : Elles ont démontré de manière univoque un lien de causalité entre l'exposition cumulée aux descendants du radon et une surmortalité par cancer du poumon. * Relation dose-effet linéaire : L'une des observations les plus constantes est que l'excès de risque relatif de cancer pulmonaire augmente de façon linéaire avec l'exposition cumulée. * Modélisation du risque : La richesse des données a permis de modéliser l'influence de cofacteurs, montrant que le risque diminue avec le temps écoulé depuis l'exposition et qu'il est modulé par l'âge et le tabagisme.

Une analyse conjointe de 11 de ces cohortes, portant sur 65 000 mineurs, a permis de consolider ces résultats et d'affiner les estimations du risque. Ces données constituent encore aujourd'hui la principale source d'information pour les modèles de risque des organismes internationaux.

**L'Extrapolation à la Population Générale : Les Études Résidentielles**

Une question centrale pour la santé publique consistait à déterminer si le risque observé à de fortes expositions en milieu minier était transposable aux expositions plus faibles, mais chroniques, de la population générale. Cette extrapolation impliquait de lever plusieurs incertitudes liées aux différences de conditions d'exposition et à la validité du modèle linéaire à faibles doses.

Pour y répondre, de nombreuses études cas-témoins ont été menées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine, comparant l'exposition au radon résidentiel entre des personnes atteintes de cancer du poumon (« cas ») et des personnes indemnes (« témoins »). Une avancée méthodologique décisive a consisté en la réalisation de méta-analyses combinant les données individuelles de ces études. Les deux plus importantes, l'analyse « poolée » européenne (Darby) et nord-américaine (Krewski), ainsi que des synthèses ultérieures, abouti à des conclusions convergentes et fondamentales :

1. Démonstration d'un risque significatif aux niveaux d'exposition domestique : Elles ont prouvé une augmentation statistiquement significative du risque de cancer du poumon associée à l'exposition au radon dans l'habitat.

2. Validation du modèle linéaire sans seuil (LNT) : Les résultats sont compatibles avec un modèle de risque linéaire sans seuil apparent, indiquant une augmentation du risque proportionnelle à la concentration. L'étude européenne a estimé cette augmentation à 16 % pour chaque incrément de 100 Bq/m³ de la concentration moyenne.

3. Cohérence avec les données des mineurs : Il est à noter que les estimations du risque issues de ces études résidentielles se sont révélées cohérentes avec celles extrapolées des données des mineurs les moins exposés. Cette convergence a solidifié la base scientifique de l'évaluation des risques en population générale.

Ce corpus de preuves a conduit les institutions sanitaires internationales (CIRC, OMS, BEIR VI, CIPR) à un consensus fort. Le radon est classé comme un cancérogène certain pour l'homme (Groupe 1 du CIRC). Le modèle de référence pour la gestion du risque est la relation linéaire sans seuil (LNT), considérée comme l'hypothèse la plus prudente et la plus plausible en l'absence de preuve d'un seuil d'innocuité.

**Modulateurs du Risque et Synergies**

L'état de l'art a également permis de caractériser les principaux facteurs modulant le risque de cancer du poumon radio-induit.

**L'Interaction avec le Tabagisme**

Le tabagisme est le principal modulateur du risque. Les données épidémiologiques indiquent une interaction synergique, proche d'un modèle multiplicatif. L'exposition au radon multiplie le risque de base de cancer du poumon, qui est déjà 10 à 20 fois plus élevé chez un fumeur. En conséquence, bien que le risque *relatif* lié au radon soit légèrement plus élevé chez les non-fumeurs, la majorité des décès par cancer du poumon attribuables au radon survient chez les fumeurs, en raison de leur risque absolu beaucoup plus élevé. Le radon se positionne ainsi comme la deuxième cause de cancer du poumon après le tabac, et la première chez les non-fumeurs.

**Influence du Débit de Dose**

Un paramètre d'influence notable est l'effet inverse du débit de dose, ou effet de protraction. Pour une même exposition cumulée, une exposition à de faibles concentrations sur une longue durée (faible débit de dose) pourrait être biologiquement plus efficace pour induire un cancer qu'une exposition à de fortes concentrations sur une courte période. Cette observation, issue des études sur les mineurs et des expériences animales, corrobore l'hypothèse selon laquelle l'exposition chronique à de faibles niveaux, typique de l'habitat, constitue un risque significatif qui ne doit pas être sous-estimé.

En conclusion, l'état de l'art sur le risque radon repose sur une base scientifique d'une solidité et d'une cohérence remarquables. De sa genèse géologique à ses mécanismes d'action moléculaire, en passant par la validation expérimentale et la quantification épidémiologique, tous les maillons de la chaîne de causalité ont été établis. Le consensus scientifique international reconnaît le radon comme un agent cancérogène majeur et évitable. Cette certitude scientifique, qui contraste avec la perception souvent limitée du risque par la société — un enjeu souligné dans certains travaux de sensibilisation — est au cœur de la problématique de cette recherche. Le défi contemporain n'est plus de prouver le danger, mais de traduire ce corpus de connaissances en stratégies de prévention efficaces.

## 2.2 Analyse critique des travaux existants

2.1 Analyse critique des travaux existants

Si l'état de l'art et le cadre théorique précédemment exposés dessinent les contours d'un consensus scientifique solide quant à la dangerosité du radon, ce savoir ne s'est pas construit sans débats méthodologiques ni controverses. La maturité d'un corpus scientifique se mesure en effet à sa capacité à identifier, discuter et intégrer ses propres limites et les incertitudes inhérentes à ses méthodes. Cette section propose une analyse critique des travaux qui fondent le consensus actuel. L'objectif n'est pas de contester le caractère cancérogène du radon, mais d'examiner la robustesse des fondations sur lesquelles repose la quantification du risque, afin de mieux en saisir la portée et les incertitudes résiduelles. Nous analyserons successivement les trois piliers de la preuve épidémiologique — études sur les mineurs, études écologiques et études cas-témoins résidentielles — avant d'aborder les débats persistants relatifs aux modèles de risque.

**Les cohortes de mineurs : un socle robuste mais une extrapolation délicate**

Les études de cohortes de mineurs d'uranium constituent la pierre angulaire de la démonstration du lien causal entre radon et cancer du poumon. Leur apport est triple : elles ont fourni la preuve irréfutable du risque chez l'homme, établi une relation dose-effet de forme linéaire, et permis une première quantification de ce risque. L'analyse conjointe de onze de ces cohortes, portant sur plus de 65 000 travailleurs, confère à ces conclusions une puissance statistique considérable et représente un jalon de l'épidémiologie professionnelle.

Toutefois, la transposition de ces résultats à l'évaluation du risque en population générale, bien que validée *a posteriori* par les études résidentielles, impose une analyse critique de ses hypothèses et de ses limites. Le premier enjeu est celui de la généralisation. Les mineurs forment une population très spécifique : majoritairement des hommes, adultes, bénéficiant d'une relative bonne santé (l'effet du « travailleur sain »), et dont les habitudes de vie, notamment tabagiques, ne sont pas nécessairement superposables à celles de la population générale.

L'application des coefficients de risque dérivés de ces cohortes à des femmes, des enfants ou des populations aux statuts de santé variés constitue une première étape d'extrapolation qui requiert une justification rigoureuse.

Le deuxième défi majeur réside dans les différences de conditions d'exposition. L'environnement d'une mine diffère radicalement de celui d'une habitation. Les mineurs étaient soumis à des expositions intenses sur des durées journalières limitées, avec un effort physique induisant des débits ventilatoires élevés. Inversement, l'exposition domestique est chronique, de faible intensité et survient majoritairement au repos. De surcroît, l'atmosphère des mines est chargée en poussières et autres aérosols, ce qui modifie la fraction libre des descendants du radon et la granulométrie des particules inhalées. La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a reconnu la nécessité d'appliquer des facteurs de correction dosimétriques pour tenir compte de ces différences, mais ces facteurs de conversion comportent eux-mêmes une part d'incertitude notable.

Le troisième point critique concerne les Co-expositions et les facteurs de confusion potentiels. L'environnement minier expose à d'autres agents cancérogènes pulmonaires, tels que la silice, les métaux lourds et surtout l'arsenic. La corrélation étroite entre les niveaux d'exposition au radon et à l'arsenic dans certaines cohortes, comme celle des mineurs d'étain en Chine, a rendu particulièrement ardu le démêlage de leurs effets respectifs. Il a été démontré que la prise en compte de l'exposition à l'arsenic réduisait de manière significative le coefficient de risque attribué au radon dans cette cohorte spécifique. Bien que l'analyse « poolée » des 11 cohortes ait conclu que l'ajustement global pour ces Co-expositions ne modifiait que légèrement l'estimation du risque, cette problématique rend la généralisation à l'environnement domestique, plus simple de ce point de vue, « problématique ».

En somme, si les études sur les mineurs établissent de manière robuste la causalité et la forme de la relation dose-effet, la transposition quantitative de leurs résultats à la population générale demeure une extrapolation complexe, dont la validité dépend de plusieurs hypothèses et facteurs de correction qui sont autant de sources d'incertitude.

**Les études écologiques : une approche séduisante mais méthodologiquement inadaptée**

Aux premières étapes de la recherche sur le risque résidentiel, une approche a consisté à mener des études dites « écologiques ». Celles-ci comparent des données agrégées à l'échelle d'une population, en corrélant la concentration moyenne de radon mesurée dans une région géographique avec le taux de mortalité par cancer du poumon observé dans cette même région. Ces études, bien que d'apparence simples, se sont avérées non seulement peu informatives mais également trompeuses, et ont fait l'objet de critiques méthodologiques rédhibitoires.

La critique la plus fondamentale est le biais écologique. Ce type d'étude suppose que la moyenne d'exposition d'une région est un indicateur pertinent de l'exposition des individus qui y développent un cancer. Or, cette supposition est invalide. La variabilité des concentrations de radon à l'intérieur d'une même région est souvent bien plus importante que la variabilité entre les moyennes régionales. Corréler des moyennes agrégées masque complètement la distribution des expositions individuelles et peut conduire à des conclusions erronées.

La deuxième faiblesse majeure est l'incapacité à prendre en compte la mobilité des populations et le long temps de latence du cancer. Le cancer du poumon se développant sur plusieurs décennies, les individus qui décèdent dans une région donnée n'y ont pas nécessairement vécu durant toute la période pertinente d'exposition, soit 10 à 20 ans avant le diagnostic. Ce décalage spatio-temporel entre l'exposition causale et le lieu d'enregistrement du décès invalide l'approche.

Enfin, et c'est le point dirimant, ces études sont extrêmement vulnérables à l'effet des facteurs de confusion non contrôlés, au premier rang desquels figure le tabagisme. Le tabac est un facteur de risque si puissant (multipliant le risque par 5 à 10) que de faibles variations régionales dans sa prévalence peuvent complètement masquer, voire inverser, la relation recherchée avec le radon, dont le surrisque attendu est bien plus faible (de l'ordre de 1,2 à 1,5). C'est ce qui explique le résultat paradoxal de certaines études écologiques, notamment celle de Cohen aux États-Unis, qui a observé une corrélation *inverse* entre les niveaux de radon et la mortalité par cancer du poumon. Cette observation s'explique très probablement par un facteur de confusion, comme une prévalence tabagique plus faible dans les zones rurales et montagneuses (souvent à plus fort potentiel radon) que dans les zones urbaines. La communauté scientifique s'accorde donc aujourd'hui pour considérer que les études écologiques sont inadaptées et « n'apportent donc pas... une information précise pour établir une estimation du risque ».

**Les études cas-témoins résidentielles : l'approche de référence et ses défis inhérents**

Face aux limites des autres approches, l'étude cas-témoins s'est imposée comme la méthode de référence pour quantifier le risque en population générale. En comparant rétrospectivement l'exposition au radon d'individus atteints de cancer du poumon (« cas ») à celle d'un groupe d'individus similaires mais indemnes (« témoins »), ces études permettent une analyse au niveau individuel. Les méta-analyses combinant les données de plusieurs de ces études (« pooled analyses ») en Europe et en Amérique du Nord ont été décisives pour confirmer l'existence d'un risque aux niveaux domestiques et pour attester de la cohérence avec les données des mineurs. Néanmoins, cette approche, la plus rigoureuse disponible, n'est pas exempte de défis.

Le premier est un manque de puissance statistique au niveau des études individuelles. Le surrisque lié au radon domestique étant faible (risque relatif estimé à 1,14 pour une exposition de 150 $Bq.m^{-3}$ sur 25 ans), sa détection requiert des effectifs très importants. Par conséquent, de nombreuses études cas-témoins prises isolément n'ont pas atteint la signification statistique, même si leur tendance suggérait un risque accru. Le regroupement de ces études en méta-analyses a donc été une nécessité méthodologique pour obtenir la puissance requise.

Le talon d'Achille de ces études demeure la qualité de la reconstitution de l'exposition passée. L'objectif est d'estimer l'exposition cumulée d'un individu sur les 30 années précédant le diagnostic. Cet exercice est semé d'embûches : biais de mémorisation, logements inaccessibles, impossibilité de connaître les conditions de vie passées, etc. Cette reconstitution est donc une estimation affectée par une incertitude considérable et une « proportion importante de données manquantes ». Cette erreur de mesure dans l'évaluation de l'exposition tend, par nature, à diluer l'association réelle et donc à sous-estimer le risque.

Une autre critique a porté sur la variabilité des résultats entre les études. Bien que l'estimation combinée soit significative, il existe une « grande variabilité des estimations de risque d'une étude à l'autre ». Il a été souligné que le résultat de la première méta-analyse européenne était fortement influencé par une étude suédoise (Pershagen). Si cette dépendance s'est atténuée depuis, elle illustre la sensibilité de l'estimation quantitative à la sélection des études incluses.

En définitive, bien que l'estimation du risque issue des études résidentielles soit « très proche de celle obtenue à partir de l'analyse des mineurs faiblement exposés », attestant d'une remarquable cohérence, il faut reconnaître que l'épidémiologie atteint ici ses limites. Discerner avec confiance un risque relatif de 1,15 représente un tour de force méthodologique qui révèle autant la puissance de la discipline que ses frontières.

**Les modèles de risque : entre pragmatisme réglementaire et incertitudes scientifiques**

La construction d'une relation exposition-risque à des fins réglementaires n'est pas une simple lecture des données épidémiologiques. Elle implique une série de choix de modélisation et d'extrapolation qui sont autant de points de débat.

Le premier concerne le modèle Linéaire Sans Seuil (LNT). Ce paradigme de la radioprotection est soutenu par la plausibilité radiobiologique (une seule particule alpha peut initier une lésion cancéreuse) et par sa compatibilité avec les données épidémiologiques, qui ne montrent pas de seuil d'innocuité apparent. Cependant, il demeure un modèle, une extrapolation dans le domaine des très faibles doses où la preuve épidémiologique directe est inaccessible. Des critiques, bien que minoritaires et provenant notamment du milieu pro nucléaire, questionnent cette linéarité en invoquant l'existence potentielle de mécanismes de réparation cellulaire plus efficaces à bas débit de dose. La pathologie expérimentale suggère également qu'il y a un « excès de simplification à considérer que la probabilité d'apparition d'un clone malin est constante », la cancérogenèse étant un processus tissulaire complexe. Néanmoins, en l'absence de preuve d'un seuil, le modèle LNT demeure l'hypothèse la plus prudente pour la santé publique.

Le second enjeu est la modélisation de l'interaction entre radon et tabac. Le consensus est clair sur la nature synergique de cette interaction, qui est plus qu'additive mais moins que multiplicative. Toutefois, sa modélisation précise est complexe. Le comité BEIR VI est le seul à l'avoir formellement intégrée dans ses modèles, conduisant à des estimations de risque différenciées selon le statut tabagique. Cette approche, plus raffinée, repose cependant sur l'hypothèse forte que le comportement tabagique des mineurs des cohortes historiques est transposable à la population générale contemporaine, ce qui « n'est probablement pas le cas ». L'évolution des habitudes, notamment l'augmentation du tabagisme féminin, pourrait ainsi conduire à une sous-estimation des cancers attribuables au radon dans cette population si l'on se base sur des modèles anciens.

Enfin, le processus même d'élaboration des coefficients de risque par les instances internationales (CIPR, BEIR) est un exercice complexe où de multiples choix peuvent faire varier le résultat final. Ces comités doivent décider quelle(s) étude(s) privilégier (cohorte unique ou méta-analyse), comment transporter le risque d'une population à l'autre, comment prendre en compte l'effet du débit de dose et comment projeter le risque dans le temps. La « variabilité des résultats proposés est notable », et les différentes approches mènent à des coefficients qui ne sont pas toujours directement comparables.

En conclusion, l'analyse critique des travaux sur le radon révèle un paysage scientifique nuancé. Le socle de preuves établissant le lien causal entre radon et cancer du poumon est exceptionnellement solide. Cependant, la quantification précise de ce risque à l'échelle de la population générale, bien qu'essentielle à l'action publique, est un exercice confronté à des défis méthodologiques et à des incertitudes irréductibles. Ces incertitudes ne diminuent en rien la légitimité du radon comme un enjeu majeur de santé publique. Au contraire, elles justifient l'application rigoureuse du principe de précaution et fondent les politiques visant à réduire les expositions au niveau le plus bas que raisonnablement possible (principe ALARA).

## 2.3 Cadre théorique

2.1 Cadre théorique

L'analyse d'un enjeu de santé publique aussi complexe que le radon requiert la construction d'un cadre théorique multidimensionnel, capable d'articuler des savoirs issus de la physique des rayonnements, de la radiobiologie, de l'épidémiologie, ainsi que des sciences sociales et politiques. Ce chapitre vise à établir ce socle conceptuel, non pas comme une simple réitération de l'état de l'art, mais comme une structuration des modèles et principes qui serviront de grille de lecture pour l'ensemble du mémoire. Ce cadre permettra de saisir la nature du danger, les logiques qui sous-tendent sa gestion, les obstacles à sa perception par la société et les leviers d'action pertinents.

Nous organiserons cette analyse en trois axes complémentaires. Le premier se concentrera sur le modèle biophysique du risque, en explicitant les concepts fondamentaux qui décrivent le passage de l'exposition à un gaz radioactif à la cancérogenèse. Le deuxième axe portera sur le cadre épidémiologique de l'évaluation quantitative du risque, en élucidant les modalités par lesquelles les modèles théoriques sont validés et quantifiés à l'échelle des populations. Enfin, le troisième axe abordera le cadre socio-réglementaire, en exposant les principes de radioprotection qui guident l'action publique et les modèles de perception du risque qui expliquent le décalage entre le savoir expert et l'appropriation citoyenne, un élément central de notre problématique.

**Le Modèle Biophysique du Risque : De l'Atome à la Cellule**

Au cœur de la compréhension du risque radon se trouve une chaîne de causalité partant d'un événement physique à l'échelle subatomique pour aboutir à une pathologie macroscopique. Ce processus est appréhendé à travers deux modèles théoriques fondamentaux : celui de la relation dose-effet, qui quantifie le risque, et le modèle mécanistique de la cancérogenèse, qui en explique le processus biologique.

### 2.1.1 Le Modèle de la Relation Dose-Effet : Le Paradigme Linéaire Sans Seuil (LNT)

La gestion de tout risque sanitaire repose sur la modélisation de la relation entre le niveau d'exposition à un agent toxique et la probabilité d'un effet délétère. Pour les agents cancérogènes génotoxiques comme les rayonnements ionisants, le paradigme de référence, adopté par les instances internationales de radioprotection (CIPR, UNSCEAR, BEIR), est le modèle Linéaire Sans Seuil (LSS, ou LNT pour *Linear No-Threshold*). Ce modèle postule que la probabilité d'occurrence d'un effet stochastique, tel un cancer, est directement proportionnelle à la dose de rayonnement reçue, et qu'il n'existe pas de dose en deçà de laquelle le risque serait nul.

Ce postulat, loin d'être anodin, emporte des implications profondes pour la santé publique. Il se fonde sur l'hypothèse radiobiologique qu'une seule particule ionisante — en l'occurrence, une particule alpha issue d'un descendant du radon — est théoriquement capable, en traversant le noyau d'une cellule, de provoquer une lésion de l'ADN potentiellement initiatrice d'un processus cancéreux. Dans cette perspective, chaque exposition, aussi faible soit-elle, contribue de manière additive au risque cumulé tout au long de la vie.

La validité du modèle LNT pour les faibles doses et les faibles débits de dose, caractéristiques de l'exposition résidentielle au radon, a fait l'objet de débats scientifiques. Néanmoins, les méta-analyses des études cas-témoins en population générale ont produit des résultats compatibles avec cette hypothèse linéaire, sans qu'un seuil d'innocuité puisse être mis en évidence. En l'absence de preuves contraires robustes, le modèle LNT demeure le fondement du principe de précaution en radioprotection. Il justifie la mise en place de politiques visant non pas à atteindre un niveau de « sécurité » absolue, mais à réduire les expositions au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (principe ALARA). C'est ce modèle qui sous-tend l'établissement de niveaux de référence plutôt que de limites de dose strictes, ces dernières étant inapplicables pour une source d'exposition naturelle et ubiquitaire.

### 2.1.2 Le Modèle Mécanistique de la Cancérogenèse Radio-induite

Si le modèle LNT quantifie le risque, le modèle de la cancérogenèse radio-induite en décrit les étapes biologiques. Il ne s'agit pas d'un événement unique, mais d'un processus multi-étape complexe, initié par un dommage physique à l'ADN.

- L'Initiation : La Lésion Physique de l'ADN

Le mécanisme initiateur est une interaction physique entre les rayonnements et la matière vivante. La toxicité du radon est principalement imputable à ses descendants à vie courte ($^{218}$Po et $^{214}$Po), émetteurs de particules alpha. Ces particules se distinguent par un Transfert d'Énergie Linéique (TEL) élevé, signifiant qu'elles déposent une densité d'énergie considérable sur une très courte distance.

Lorsqu'une particule alpha traverse une cellule de l'épithélium bronchique, elle génère des ionisations denses le long de sa trajectoire, créant des dommages complexes et clustérisés à l'ADN, notamment des cassures double-brin (CDB) multiples et localisées. Contrairement aux lésions simples, ces dommages complexes sont difficilement réparables par les systèmes cellulaires, ce qui accroît la probabilité de mutations, de réarrangements chromosomiques ou de mort cellulaire. Le modèle « K » suggère que les ionisations des couches internes des atomes de l'ADN pourraient jouer un rôle prépondérant dans l'induction de ces lésions difficilement réparables.

- La Promotion : L'Instabilité Génétique Radio-induite

Au-delà de cette lésion initiale, le processus de promotion est dominé par le concept d'instabilité génétique, une avancée conceptuelle majeure dans la compréhension de la cancérogenèse radio-induite. La lésion initiale de l'ADN ne se contente pas de provoquer une mutation ponctuelle ; elle peut déclencher un état d'instabilité chronique du génome, transmissible aux cellules filles sur de nombreuses générations. Cette instabilité se manifeste par une augmentation persistante du taux de mutations et d'aberrations chromosomiques, bien après la fin de l'exposition.

Vérifié expérimentalement chez le rat exposé au radon, ce phénomène est postulé comme jouant un rôle déterminant dans l'accumulation des altérations génétiques requises pour la transformation maligne. Il conduit à l'émergence d'un « phénotype mutateur », où la cellule et sa lignée acquièrent une propension à l'erreur génétique, accélérant ainsi la progression tumorale. Ce modèle explique le long temps de latence entre l'exposition et l'apparition clinique du cancer : l'irradiation initie un processus de déstabilisation génomique qui évolue silencieusement sur des décennies.

- La Progression : Accumulation des Altérations Moléculaires

Dans ce contexte d'instabilité, des mutations peuvent affecter des gènes clés du contrôle cellulaire, tels que les oncogènes (ex : K-Ras) ou les gènes suppresseurs de tumeurs (ex : p53). Bien qu'il soit difficile d'identifier une « signature moléculaire » univoque des cancers radio-induits, certaines altérations sont retrouvées plus fréquemment, telle la transversion G-T au codon 249 du gène p53 dans les cancers du poumon liés au radon. L'accumulation séquentielle de ces altérations conduit à la perte des mécanismes de régulation du cycle cellulaire, à une prolifération incontrôlée, et finalement au développement d'une tumeur maligne. Les types histologiques observés, notamment les « tumeurs à petites cellules » et les carcinomes épidermoïdes, semblent être préférentiellement induits par l'irradiation pulmonaire.

Ce cadre théorique biophysique établit une chaîne de causalité robuste, justifiant l'application du modèle LNT pour l'évaluation du risque.

**Le Cadre Épidémiologique et l'Évaluation Quantitative du Risque**

Les modèles biophysiques décrivent les mécanismes plausibles, mais seule l'épidémiologie permet de confirmer et de quantifier le risque à l'échelle des populations humaines. Le cadre théorique de cette évaluation repose sur des concepts clés qui ont permis de traduire les observations sur des groupes très exposés en une estimation du fardeau sanitaire pour la population générale.

### 2.1.3 Le Modèle d'Extrapolation du Risque : Des Mineurs à la Population Générale

Historiquement, les preuves les plus solides du lien entre radon et cancer du poumon proviennent des études de cohortes de mineurs d'uranium. Ces populations ont permis d'établir une relation dose-effet claire. Un défi épistémologique et méthodologique majeur consistait à déterminer si ces résultats étaient transposables aux faibles expositions chroniques de la population générale.

La validation de cette extrapolation représente une avancée significative de l'épidémiologie environnementale. Elle fut rendue possible par la conduite de vastes études cas-témoins, suivies de méta-analyses combinant les données individuelles (études « poolées »). Ces analyses ont non seulement confirmé l'existence d'un risque significatif aux niveaux d'exposition domestique, mais elles ont aussi démontré que les coefficients de risque dérivés étaient quantitativement cohérents avec ceux extrapolés des données des mineurs les moins exposés. Cette convergence a conféré une légitimité scientifique décisive à l'application du modèle LNT en population générale et a solidifié les estimations de l'impact sanitaire du radon résidentiel.

### 2.1.4 Le Modèle de Risque Synergique : L'Interaction avec le Tabagisme

L'évaluation du risque d'un agent environnemental doit intégrer ses interactions avec d'autres modulateurs du risque. Dans le cas du radon, l'interaction avec le tabac est un élément théorique central. Les données épidémiologiques révèlent une interaction synergique qui s'écarte d'un modèle additif au profit d'un modèle quasi multiplicatif.

Cela signifie que le radon multiplie le risque de base de cancer du poumon, déjà considérablement accru par le tabagisme. Ce modèle synergique a des conséquences majeures en santé publique : il explique pourquoi la majorité absolue des décès par cancer du poumon attribuables au radon survient chez les fumeurs ou anciens fumeurs. Le radon se positionne ainsi comme un Co-cancérogène puissant sur un terrain prédisposé. Ce cadre théorique impose une double stratégie de prévention : la réduction de l'exposition au radon pour tous, et une information particulièrement ciblée sur les fumeurs, qui constituent le groupe le plus vulnérable.

### 2.1.5 Le Modèle de l'Effet Inverse du Débit de Dose

Un autre concept théorique pertinent, issu des études sur les mineurs et des expériences animales, est celui de l'effet inverse du débit de dose, ou effet de protraction. Ce modèle suggère que, pour une même exposition cumulée, une exposition étalée sur une longue période à de faibles concentrations pourrait être biologiquement plus efficace pour induire un cancer qu'une exposition concentrée sur une courte période. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait qu'une irradiation chronique à faible bruit de fond permettrait à des cellules légèrement endommagées mais viables de survivre et de propager leur instabilité génomique, alors qu'une forte irradiation aiguë déclencherait des mécanismes de réparation ou d'apoptose plus efficaces. Ce modèle renforce l'idée que l'exposition résidentielle, bien que de faible intensité, ne doit pas être sous-estimée en raison de son caractère chronique.

**Le Cadre Socio-Réglementaire : De la Science à l'Action**

La reconnaissance scientifique d'un risque ne se traduit pas automatiquement par une action publique efficace. La gestion du risque radon est encadrée par des principes réglementaires et se heurte à des barrières sociocognitives qui doivent être analysées à l'aide de modèles théoriques spécifiques.

### 2.1.6 Les Principes de la Radioprotection : Le Pilier de l'Optimisation (ALARA)

La gestion des risques liés aux rayonnements ionisants est gouvernée par un système doctrinal développé par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), reposant sur trois principes : la justification, la limitation de dose et l'optimisation. Pour le radon, qui constitue une « situation d'exposition existante » et subie, les principes de justification et de limitation de dose sont largement inopérants.

C'est donc le troisième principe, celui de l'optimisation de la protection (ou principe ALARA - *As Low As Reasonably Achievable*), qui constitue le pilier théorique de la gestion du risque radon. L'objectif n'est pas d'éliminer le risque, mais d'engager un processus continu de réduction des expositions au niveau le plus bas que raisonnablement possible, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux. La traduction opérationnelle de ce principe est l'établissement de niveaux de référence (par ex., 300 Bq/m³ en Europe). Ces niveaux ne sont pas des seuils de sécurité, mais des déclencheurs d'action : au-dessus, des actions de remédiation sont jugées « raisonnables » et doivent être entreprises. L'ensemble de la politique publique de gestion du radon découle de ce cadre théorique de l'optimisation.

### 2.1.7 Le Cadre de la Perception du Risque : Le Paradoxe du Danger Invisible et Naturel

L'obstacle majeur à l'efficacité des politiques publiques, et le cœur de notre problématique, réside dans la dissonance cognitive entre l'évaluation experte du risque et sa perception par le public.

La psychologie sociale et la sociologie du risque permettent d'analyser ce fossé. Le profil de risque du radon cumule plusieurs caractéristiques qui entravent son appréhension par les schémas cognitifs courants : * L'invisibilité sensorielle : Inodore, incolore et insipide, il n'active aucun mécanisme de vigilance. * L'origine naturelle : Les risques perçus comme « naturels » sont souvent jugés moins menaçants que les risques artificiels, un biais cognitif puissant. * Les effets différés et stochastiques : Le long temps de latence rompt le lien de causalité perçu, et la nature probabiliste du risque peut encourager le déni. * Le caractère chronique et domestique : La familiarité avec le lieu d'exposition – le foyer, perçu comme un sanctuaire – tend à émousser la perception du danger.

Ces caractéristiques font du radon un risque « froid », à faible saillance médiatique et émotionnelle. Le cadre théorique de la perception des risques indique que la communication ne peut se limiter à une transmission descendante d'informations techniques. Pour être efficace, elle doit surmonter ces biais en rendant le risque plus concret et personnel, en évoluant d'une approche anxiogène vers une démarche d'autonomisation axée sur les bénéfices d'un habitat sain, comme le suggèrent certaines initiatives de sensibilisation (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/).

En conclusion, ce mémoire s'ancre dans un cadre théorique intégré où les modèles biophysique et épidémiologique établissent la certitude et la gravité du danger, les principes de la radioprotection fournissent la logique de la réglementation, et les modèles de la perception du risque éclairent les défis sociétaux. C'est à l'intersection de ces cadres que se loge notre question de recherche : comment aligner l'action publique et la mobilisation citoyenne sur la réalité d'un risque scientifiquement avéré mais socialement sous-estimé ?

# Méthodologie

Pour élucider le paradoxe d'un risque sanitaire scientifiquement avéré mais socialement sous-estimé, la présente recherche ne vise pas à produire des données primaires, mais à analyser les raisons du décalage entre la connaissance experte et son application en santé publique. La méthodologie adoptée est donc celle d'une revue systématique de la littérature, couplée à une méta-analyse qualitative. Son objectif est de diagnostiquer les causes systémiques de l'inefficacité relative des politiques de gestion du risque radon. Ce chapitre expose la démarche rigoureuse de collecte, d'analyse et d'interprétation d'un corpus documentaire multidisciplinaire, indispensable pour construire une compréhension intégrée de la problématique.

La nature du risque radon, à l'intersection de la géologie, de la physique des rayonnements, de l'épidémiologie, du génie civil, du droit de l'environnement et de la sociologie du risque, impose une approche transdisciplinaire. Une perspective monodisciplinaire serait en effet inapte à saisir la complexité des freins à une gestion efficace. C'est pourquoi l'approche de recherche, présentée en premier lieu, structure l'ensemble de l'analyse autour de trois axes complémentaires : une synthèse des savoirs et solutions techno-scientifiques, une analyse critique du cadre politico-réglementaire, et une exploration des barrières socio-économiques et communicationnelles.

La mise en œuvre de cette approche repose sur une stratégie de collecte des données visant à constituer un corpus exhaustif de sources secondaires. Ce corpus agrège des publications scientifiques validées par les pairs, des rapports et avis d'institutions de référence (OMS, AIEA, IRSN, ANSES), les textes réglementaires nationaux et internationaux, ainsi que des sources alternatives documentant les initiatives citoyennes. La diversité de ce corpus est le fondement de la méthode d'analyse des données. Celle-ci, également détaillée, s'appuie sur la triangulation des informations et une synthèse critique pour identifier les convergences, les points aveugles et les contradictions qui caractérisent la gestion de ce risque.

Enfin, toute démarche scientifique se doit de reconnaître ses propres bornes. Ce chapitre s'achèvera par une discussion sur les limites de la méthodologie. En s'appuyant sur des sources secondaires, notre analyse hérite des incertitudes inhérentes aux études épidémiologiques et aux campagnes de mesure de l'exposition. Ces limites ne sont pas considérées comme des faiblesses, mais comme des éléments constitutifs de la problématique. Elles soulignent la complexité de l'action publique, qui doit se déployer face à un risque avéré mais dont la quantification précise conserve une marge d'incertitude.

## 3.1 Collecte des données

1.2 Collecte des données

Conformément à l'approche de recherche, qui s'apparente à une revue systématique et une méta-analyse qualitative, la collecte des données a consisté en la constitution d'un corpus documentaire exhaustif et multidisciplinaire. L'objectif était de compiler un ensemble de sources secondaires, hétérogènes mais complémentaires, afin d'alimenter les trois axes analytiques de l'étude. Cette démarche est fondamentale pour construire une analyse systémique du décalage observé entre le savoir scientifique sur le risque radon et son application effective en santé publique. La stratégie de collecte a été rigoureusement structurée pour acquérir les informations nécessaires à la vérification des hypothèses de recherche, en s'appuyant exclusivement sur des sources fiables et validées par la communauté scientifique ou les institutions compétentes.

La constitution du corpus a été réalisée via une recherche systématique dans plusieurs bases de données académiques (PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar), les portails de publication d'organismes nationaux et internationaux (OMS, AIEA, CIPR, IRSN, Anses, ASN), ainsi que les archives réglementaires. Les mots-clés utilisés, en français et en anglais, incluaient : « radon », « indoor radon », « radon exposure », « lung cancer », « santé publique », « public health », « radon policy », « réglementation radon », « risk perception », « radon mitigation », « radon mapping », « géologie radon ». La revue documentaire couvre la période s'étendant des années 1980, qui marquent la reconnaissance du radon comme un risque sanitaire domestique, jusqu'à nos jours, avec un focus particulier sur les publications des dix dernières années pour refléter l'état de l'art le plus actuel.

**Collecte pour l'Axe 1 : La synthèse techno-scientifique du risque et de sa maîtrise**

Ce premier volet de la collecte a visé à rassembler les données factuelles et techniques qui objectivent le risque radon et démontrent la maturité des solutions existantes, étayant ainsi l'hypothèse (H1) selon laquelle la persistance du problème ne découle pas d'une lacune de connaissances ou de technologies.

4. Données géologiques et cartographiques : Le corpus intègre les publications et rapports décrivant les méthodologies d'évaluation de l'aléa radon. Les documents de l'IRSN sur la cartographie du potentiel radon en France ont été collectés, ainsi que des études internationales illustrant des approches complémentaires. Celles-ci incluent l'utilisation de données de spectrométrie gamma aéroportée pour estimer les concentrations de surface en radium-226, précurseur du radon (Gundersen-Wanty-2020, p. 179), et les approches dites « radio-géo-lithologiques » qui corrèlent les mesures de radon intérieur aux unités géologiques sous-jacentes après une caractérisation radiométrique approfondie des sols et des roches ( Chiaberto 2022, p. 7). Les études modélisant la migration du radon par diffusion et convection dans le sous-sol ont également été incluses pour analyser les facteurs de son transport vers les bâtiments (Gundersen-Wanty-2020, p. 57).

5. Données de métrologie et d'exposition : Cette section du corpus est centrée sur les campagnes de mesure du radon dans l'habitat. Les données des enquêtes nationales menées en France par l'IRSN depuis les années 1980 constituent une base essentielle, fournissant des distributions statistiques des concentrations et des moyennes nationales et départementales (Robé- p. 5, Tymen- p. 128, Masse- p. 128, Tirmarche- p. 128,). Des enquêtes internationales, menées au Canada (Henderson et al., 2012, p. 1) ou aux États-Unis (Pirard- p. 92, Tymen- p. 92), ont été collectées à des fins comparatives. Parallèlement, la littérature scientifique décrivant les techniques de mesure a été compilée, avec un accent sur les détecteurs passifs intégrateurs à traces nucléaires (SSNTD), privilégiés pour les enquêtes à grande échelle car ils permettent d'obtenir une estimation moyennée sur le long terme, représentative de l'exposition annuelle (Cinelli-2022, p. 5). Les descriptions de méthodes actives (chambres d'ionisation (Andriampanarivo p. 1), spectrométrie (Zinsou-2023, p. 2) complètent ce panorama des outils de diagnostic.

6. Données épidémiologiques et toxicologiques : le corpus intègre les études fondatrices établissant le lien causal entre l'exposition au radon et le cancer du poumon. Il s'agit en premier lieu des études de cohortes de mineurs d'uranium, puis, de manière centrale, des grandes méta-analyses d'études cas-témoins en population générale qui ont confirmé le risque à des niveaux d'exposition domestique. Le principe de ces études, qui reconstituent l'historique résidentiel des cas et des témoins sur une trentaine d'années pour y mesurer rétrospectivement le radon, est documenté en détail (Tymen- p. 78, Pirard- p. 78).

7. Ces travaux de référence ont permis de quantifier la relation dose-réponse et de valider l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil (Tymen- p. 80, Tirmarche- p. 80, Pirard- p. 80). Les publications traitant de l'interaction synergique avec le tabagisme ont également été incluses.

8. Données sur les solutions techniques : Enfin, la littérature technique (guides de bonnes pratiques, normes, publications scientifiques) décrivant l'efficacité, le coût et les modalités de mise en œuvre des méthodes de prévention pour les constructions neuves et de remédiation pour l'habitat existant a été systématiquement collectée.

**Collecte pour l'Axe 2 : L'analyse politico-réglementaire et comparative**

Le deuxième axe de collecte a visé à constituer un corpus juridique, réglementaire et institutionnel pour permettre une analyse critique des politiques publiques de gestion du risque radon.

9. Textes réglementaires nationaux et internationaux : La base de cette collecte est constituée des textes officiels, avec au niveau européen la Directive 2013/59/EURATOM. Pour la France, l'ordonnance de 2016 et les décrets et arrêtés de 2018, qui définissent le cadre normatif actuel (seuils, obligations, cartographie), ont été compilés, ainsi que les textes antérieurs pour une analyse diachronique. Les cadres réglementaires d'autres pays (États-Unis, Canada, Suisse) ont été collectés pour l'analyse comparative.

10. Rapports institutionnels et littérature grise : Ce corpus a été enrichi par la collecte de la « littérature grise » : rapports, avis, guides et bilans publiés par les organisations compétentes. Les publications de l'OMS (notamment le « WHO Handbook on Indoor Radon »), de la CIPR, de l'ASN, de l'Anses et de l'IRSN sont primordiales, car elles contiennent des évaluations critiques des politiques menées et identifient les obstacles à leur mise en œuvre.

11. Données sur l'articulation avec les politiques énergétiques : Pour investiguer l'hypothèse H3, une recherche ciblée a permis d'identifier les publications documentant les effets de la rénovation énergétique (notamment l'amélioration de l'étanchéité à l'air) sur l'accumulation du radon intérieur, ainsi que les guides de bonnes pratiques intégrant conjointement les enjeux de performance énergétique et de qualité de l'air.

**Collecte pour l'Axe 3 : L'analyse des barrières socio-économiques et communicationnelles**

Le troisième axe de collecte, de nature plus qualitative, a rassemblé des données permettant d'analyser les freins à l'appropriation du risque par le public et les professionnels, en lien avec les hypothèses H1 et H4.

12. Données sur la perception du risque et la sensibilisation : Le corpus inclut des enquêtes de sciences sociales (sociologie, psychologie) et des analyses de la communication sur les représentations sociales du risque radon. Ces documents permettent de caractériser les obstacles cognitifs spécifiques (invisibilité, naturalité, latence des effets) à la prise de conscience.

13. Matériels de communication publique : Les supports d'information produits par les pouvoirs publics (brochures, sites web, campagnes) ont été archivés. Ce matériel a pour vocation de faire l'objet d'une analyse de contenu afin d'évaluer les stratégies discursives et les modèles de communication mobilisés.

14. Sources non institutionnelles et initiatives citoyennes : Une attention particulière a été portée à des sources alternatives, qui offrent une perspective complémentaire sur la perception du risque. Le travail de documentation mené par des initiatives comme le blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/ est ainsi considéré comme une donnée qualitative pertinente. Il constitue un cas d'étude pour analyser des modèles de communication profane et évaluer l'hypothèse H4 sur l'efficacité d'une communication plus incarnée et responsabilisante.
15. Données socio-économiques : Les études estimant le coût des travaux de remédiation et documentant l'existence ou l'absence de dispositifs d'aide financière pour les particuliers ont été recensées. Ces données, mises en regard des caractéristiques socio-démographiques des zones à risque, permettent de contextualiser les freins structurels à l'action.

En conclusion, cette phase méthodique de collecte a permis de construire un corpus de données secondaires riche et diversifié. La nature composite de ce corpus, alliant données quantitatives des sciences exactes, textes juridiques, rapports institutionnels et matériaux qualitatifs des sciences sociales, est le fondement de l'approche transdisciplinaire de ce mémoire. C'est le croisement et l'articulation de ces différentes sources qui autoriseront, dans la phase d'analyse, un diagnostic systémique de la problématique.

## 3.2 Limites de la méthodologie

1.2 Limites de la méthodologie

La portée de cette étude, fondée sur une revue systématique et une méta-analyse qualitative, est intrinsèquement conditionnée par la qualité et les limites des sources primaires mobilisées. Ce mémoire ne produisant pas de données nouvelles, il hérite par conséquent des incertitudes inhérentes au corpus documentaire existant.

Premièrement, les données d'exposition de la population, bien qu'issues de campagnes de mesure d'envergure, comportent des biais reconnus. Le recours au volontariat est susceptible d'induire une surreprésentation des habitations perçues comme à risque, et ainsi une surestimation de l'activité volumique moyenne (Masse- p. 133). De surcroît, la réalisation préférentielle des mesures en période de chauffe introduit un biais saisonnier qui, malgré l'application de facteurs correctifs, n'est pas intégralement neutralisé (Tymen- p. 133).

Deuxièmement, l'analyse des risques sanitaires doit composer avec les difficultés propres aux études épidémiologiques. Un écueil méthodologique majeur réside dans l'« illusion écologique » (*ecological fallacy*), où des études de corrélation géographique peuvent livrer des résultats contradictoires en raison de facteurs de confusion non maîtrisés, tel le tabagisme (Pirard- p. 92, Masse- p. 9). Bien que notre analyse privilégie les études cas-témoins et de cohortes, celles-ci sont également limitées par la complexité de l'estimation rétrospective de l'exposition individuelle sur plusieurs décennies. Cette reconstitution, nécessairement imprécise, tend à atténuer la pente de la relation dose-effet et, par conséquent, à sous-estimer le risque réel (Verger-1998, p. 7).

Troisièmement, la quantification du fardeau sanitaire repose sur des modèles d'extrapolation dont les marges d'incertitude demeurent considérables. Le transfert des coefficients de risque, dérivés principalement des cohortes de mineurs, à la population générale exposée de manière chronique à de faibles débits de dose, constitue une source de débat scientifique (Masse- p. 5). L'analyse du comité BEIR VI illustre l'ampleur de cette incertitude, estimant que le nombre de décès attribuables au radon aux États-Unis se situe dans un intervalle de confiance à 95 % allant de 3 000 à 32 000 (Tymen- p. 143).

En conscience de ces limites, ce mémoire ne prétend pas les résoudre, mais les intègre comme un élément structurant de la problématique. Notre approche consiste donc à analyser comment l'action publique se déploie face à un risque avéré, mais dont la quantification précise demeure entachée d'incertitudes notables.

## 3.3 Analyse des données

1.2 Analyse des données

L'analyse des données adoptée dans ce mémoire s'articule comme une revue systématique doublée d'une méta-analyse qualitative. Son objectif n'est pas la production de données primaires, mais l'exploitation critique et la synthèse du corpus documentaire exhaustif constitué lors de la phase de collecte. Conformément à l'approche de recherche, l'analyse est structurée selon les trois axes définis: techno-scientifique, politico-réglementaire, et socio-communicationnel. Cette démarche de triangulation permet de croiser des informations de natures hétérogènes afin de construire une interprétation systémique du décalage persistant entre la connaissance scientifique consolidée du risque radon et l'insuffisance de sa prise en charge en santé publique. La finalité est d'extraire des relations causales, d'identifier des points de rupture et de valider les hypothèses de recherche.

**Analyse de l'Axe 1 : La consolidation de la preuve scientifique et technique**

L'analyse des données de ce premier axe vise à démontrer la maturité et la robustesse des connaissances sur le risque radon, afin de vérifier l'hypothèse (H1) selon laquelle la persistance du problème ne découle ni d'une incertitude scientifique majeure, ni d'une lacune technologique. Cette analyse procède par une synthèse critique des données géologiques, métrologiques, épidémiologiques et techniques.

16. Analyse des données géologiques et d'exposition : la cartographie d'un risque spatialisé. L'examen des données cartographiques et des campagnes de mesure nationales atteste d'une maîtrise avancée de la quantification de l'aléa et de l'exposition. Les cartographies du potentiel radon, telles que celle produite par l'IRSN, résultent d'une analyse croisée entre la lithologie des formations géologiques et des milliers de mesures *in situ*. L'analyse des méthodologies sous-jacentes confirme que si la concentration en uranium du substratum rocheux est un indicateur primaire, des facteurs secondaires comme la perméabilité du sol ou la présence de réseaux de failles sont critiques pour le transport du gaz, expliquant la corrélation parfois imparfaite entre radioactivité du sous-sol et concentrations mesurées en surface (Gundersen-Wanty-2020, p. 93).

L’analyse statistique des résultats des campagnes de mesure révèle de manière constante une distribution des concentrations intérieures de type log-normale (Chiaberto- 2022, p. 2). Ce constat est fondamental, car il implique qu’une large majorité de bâtiments présente des niveaux faibles, mais qu’une fraction non négligeable atteint des concentrations très élevées, justifiant ainsi des politiques de dépistage ciblées sur les zones à risque. Pour affiner la granularité de ces cartes, notamment dans les secteurs peu documentés, des méthodes d’inférence statistique sont mobilisées. L’analyse de ces techniques, en particulier l’inférence bayésienne, montre comment le modèle statistique peut être enrichi en intégrant des informations issues de zones géologiquement similaires, permettant d’estimer une probabilité de dépassement de seuil pour chaque unité administrative avec une incertitude maîtrisée (Palermi-Pasculli-2008, p. 4,). L’ensemble de ce corpus démontre la disponibilité d’outils performants pour identifier les territoires à risque avec une précision suffisante pour guider l’action publique.

17. Analyse des données épidémiologiques : l'établissement d'une relation causale robuste. L’analyse du corpus épidémiologique permet de reconstituer la chaîne de preuves ayant conduit à la classification du radon comme cancérigène avéré pour l’Homme. L’analyse comparative entre les études de cohortes de mineurs d’uranium et les études cas-témoins en population générale est ici centrale. Les premières ont établi le lien causal pour de fortes expositions professionnelles, mais le transfert de ce risque aux faibles concentrations domestiques constituait l’enjeu majeur de santé publique.

L’analyse des grandes méta-analyses européennes et nord-américaines confirme la validité de cette extrapolation. En agrégeant les données de milliers de participants, ces études ont atteint la puissance statistique nécessaire pour mettre en évidence une augmentation significative du risque de cancer du poumon, même pour des expositions inférieures aux seuils réglementaires actuels. Le traitement statistique de ces données a permis de modéliser une relation dose-effet de type « linéaire sans seuil » (LNT), dont l’analyse confirme que chaque Bq/m³ d’exposition chronique contribue au risque cumulé, fournissant une base scientifique solide aux recommandations de l’OMS visant des niveaux aussi bas que raisonnablement possible.

La quantification du risque pour la population générale repose sur des modèles de transposition dérivés des cohortes de mineurs. L’analyse de ces modèles, notamment ceux des rapports BEIR (Tymen- p. 135, Pirard- p. 135, Masse- p. 135), révèle une sophistication croissante, intégrant des facteurs modulant le risque tels que l’âge à l’exposition, le temps écoulé et le débit de dose (Tymen- p. 120, Masse- p. 120). Des approches plus récentes, comme les modèles bayésiens de régression sur profils d’exposition, affinent l’analyse en gérant la multi colinéarité entre les différentes expositions professionnelles (radon, poussières, rayonnement gamma) et en isolant plus précisément le risque attribuable au radon (Professionnelles situation de Co-expositions- p. 3). Ces modélisations ont permis d’identifier des profils d’exposition à très haut risque. Si les études écologiques peuvent présenter des résultats contre-intuitifs en raison de biais méthodologiques inhérents (Tymen- p. 96), elles ne remettent pas en cause les conclusions robustes des études individuelles (Hystad- 2014, p. 1).

18. Analyse de la quantification du fardeau sanitaire : la Fraction de Risque Attribuable (FRA). L’analyse se concentre ensuite sur les méthodes d’évaluation de l’impact sanitaire du radon. Le calcul de la Fraction de Risque Attribuable (FRA) est central. L’analyse de sa mise en œuvre (Pirard- p. 137, Tymen- p. 137, Masse- p. 137, Tirmarche- p. 137,) montre qu’il s’agit de croiser la relation dose-effet (issue de l’épidémiologie) avec la distribution des expositions au sein de la population (issue des campagnes de mesure).

Un élément crucial de cette analyse est l'intégration de l'interaction synergique avec le tabagisme. En appliquant la FRA distinctement aux fumeurs, ex-fumeurs et non-fumeurs, l'analyse des résultats met en lumière un paradoxe fondamental : bien que le radon soit la première cause de cancer du poumon chez les non-fumeurs, la majorité absolue des décès attribuables au radon survient chez les fumeurs, du fait de cette synergie et de l'incidence bien plus élevée du cancer pulmonaire dans cette population (Tymen- p. 138, Pirard- p. 138, Masse- p. 138, Tirmarche- p. 138,). Cette analyse quantitative objective le fardeau sanitaire (environ 3 000 décès annuels en France) et positionne la lutte contre le radon comme un levier pertinent de la politique anti-tabac.

19. Analyse des solutions techniques. Enfin, l'analyse du corpus sur les techniques de mesure et de remédiation confirme leur maturité, leur fiabilité et leur accessibilité. Les dosimètres passifs, en particulier, offrent une méthode de mesure intégrée simple et peu coûteuse. Les solutions de remédiation sont éprouvées et leur efficacité est documentée.

En conclusion, l'analyse des données de cet axe converge pour étayer l'hypothèse H1. La chaîne de la connaissance est complète : de la source géologique du risque à son impact sanitaire, en passant par les outils de diagnostic et de correction, le risque radon est identifié, quantifié, localisé et techniquement maîtrisable. Le déficit d'action ne peut donc être imputé à une lacune scientifique ou technique.

**Analyse de l'axe 2 : Les paradoxes et les points aveugles de l'action publique**

Cette section adopte une approche d'analyse des politiques publiques pour décrypter les logiques, forces et faiblesses du cadre d'action normatif, en vue de tester les hypothèses H2 et H3.

20. Analyse diachronique et comparative du cadre normatif. L'analyse des textes réglementaires, de la directive EURATOM 2013/59 à sa transposition en droit français (2016-2018), révèle le passage d'une logique de recommandation à une logique d'obligation. Toutefois, une analyse fine montre que ces obligations restent ciblées sur les lieux de travail et certains Établissements Recevant du Public (ERP) en zone 3. L'habitat privé, principal lieu d'exposition, demeure en dehors du champ de l'obligation de mesure et de travaux, relevant essentiellement d'une obligation d'information lors des transactions immobilières.
21.

La comparaison avec d'autres contextes nationaux (Canada, États-Unis) met en exergue des choix politiques distincts. Le niveau d'action français (300 Bq/m³) se situe dans la fourchette haute des recommandations de l'OMS (100-300 Bq/m³), tandis que d'autres pays ont adopté des seuils plus bas (200 Bq/m³ au Canada, 148 Bq/m³ aux États-Unis). L'analyse révèle des philosophies d'action contrastées : une approche réglementaire descendante en France, face à des stratégies nationales de sensibilisation et d'incitation à la mesure dans l'habitat privé au Canada. Cette analyse comparative suggère que le cadre français, bien que renforcé, reste en deçà de l'ampleur du risque, ce qui conforte l'hypothèse H2 d'une réponse politique partielle.

22. Analyse critique de l'articulation avec les politiques énergétiques. L'analyse des référentiels techniques sur la rénovation énergétique valide l'hypothèse H3. Les politiques de performance énergétique, en visant une étanchéité à l'air accrue, peuvent induire une augmentation des concentrations de polluants intérieurs, dont le radon. L'analyse révèle que l'intégration du risque radon dans les cahiers des charges des rénovations est lacunaire et non systématique. Les dispositifs d'aide financière à la rénovation (ex : « MaPrimeRénov ») n'intègrent pas de volet dédié à la gestion du radon. Il s'agit d'un point aveugle notable des politiques publiques, où deux objectifs de santé (lutte contre la précarité énergétique et l'exposition au radon) ne sont pas articulés et peuvent s'avérer contradictoires.

**Analyse de l'Axe 3 : Les freins socio-économiques et les impensés de la communication**

Cette analyse, de nature plus qualitative, vise à élucider les raisons de la faible appropriation du risque en examinant les barrières cognitives, communicationnelles et économiques, en lien avec les hypothèses H1 et H4.

23. Analyse de la perception du risque et des obstacles cognitifs. L'analyse des enquêtes en sciences sociales met en évidence des freins cognitifs puissants : le caractère invisible et inodore du gaz le rend abstrait ; son origine naturelle est faussement perçue comme un gage d'innocuité ; et la longue latence des effets sanitaires dilue la perception d'un lien de causalité direct. Le déficit d'action ne relève donc pas d'un simple manque d'information mais d'un enjeu de représentation mentale du risque.

24. Analyse critique des stratégies de communication. L'analyse de contenu des supports de communication institutionnels révèle une approche factuelle, technique et descendante, centrée sur le discours d'expert. Si cette information est nécessaire, son potentiel mobilisateur apparaît limité.

À ce titre, l'analyse du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/ comme cas d'étude de communication non-institutionnelle est éclairante. Traité comme une donnée qualitative, son discours marque une rupture. Le risque y est incarné via le témoignage personnel, mobilisant un registre émotionnel et un appel direct à la responsabilité. Ce mode de communication, fondé sur le savoir expérientiel et l'interpellation, s'oppose au modèle expert et distant. Cette analyse comparative valide l'hypothèse H4: la communication publique sur le radon souffre d'un déficit d'incarnation et de stratégies favorisant l'appropriation citoyenne (*empowerment*).

25. Analyse des barrières socio-économiques. Enfin, l'analyse du coût des travaux de remédiation, couplée à l'absence de dispositifs d'aide financière dédiés aux particuliers, met en lumière une barrière structurelle. La charge financière de la remédiation, reposant exclusivement sur les propriétaires, peut constituer un obstacle rédhibitoire pour les ménages modestes, créant ainsi une inégalité sociale de santé environnementale.

En conclusion, l'analyse triangulée des données des trois axes dresse un tableau cohérent du paradoxe du radon : un risque scientifiquement maîtrisé et techniquement gérable (Axe 1) qui demeure un enjeu sanitaire majeur mais sous-estimé, en raison d'une action politique incomplète (Axe 2) et de l'incapacité à surmonter les barrières psychologiques, communicationnelles et économiques qui entravent le passage de la connaissance à l'action préventive (Axe 3). Cette analyse multifactorielle jette les bases de la discussion et de la formulation de recommandations.

## 3.4 Approche de recherche

1.2 Approche de recherche

Pour répondre à la question de recherche et vérifier les hypothèses formulées, ce mémoire adopte une approche qualitative, structurée comme une revue systématique et une analyse critique de la littérature multidisciplinaire. Le socle de connaissances scientifiques sur la dangerosité du radon étant solidement établi, l'enjeu principal ne réside pas dans la production de données primaires, mais dans la compréhension du décalage entre ce savoir expert et son application effective en santé publique. La méthodologie retenue est donc une méta-analyse qualitative visant à synthétiser, articuler et interpréter les savoirs existants pour identifier les leviers d'une gestion optimisée du risque.

Cette démarche transdisciplinaire est indispensable pour appréhender un risque à l'interface de la géologie, de la physique des rayonnements, du génie civil, de la radiobiologie, de l'épidémiologie, des politiques publiques et de la sociologie du risque. La recherche se déploiera selon trois axes analytiques complémentaires, chacun conçu pour évaluer de manière structurée les différentes facettes de la problématique.

**Axe 1 : La synthèse techno-scientifique du risque et de sa maîtrise**

Le premier axe établit un état de l'art rigoureux des connaissances et des solutions techniques, afin de vérifier la prémisse de notre hypothèse principale (H1) : l'inefficacité relative de la politique de gestion du risque ne provient pas d'une lacune de savoirs ou de technologies. Cette synthèse s'articule autour de trois domaines clés :

26. Caractérisation de l'aléa géologique et de la migration : Nous analyserons la littérature scientifique portant sur la genèse et le transport du radon, depuis les roches sources jusqu'aux bâtiments. Une attention particulière sera accordée aux méthodes de cartographie du potentiel radon, notamment les approches « radio-géo-lithologiques » qui couplent des données géologiques à des mesures spectrométriques de l'uranium (Chiaberto 2022, p. 3, Chiaberto- 2022, p. 7). L'examen des modèles de migration dans le sous-sol (Gundersen-Wanty-2020, p. 57) permettra de saisir la complexité des facteurs d'exposition et d'évaluer la robustesse des outils prédictifs, un point essentiel pour l'analyse de l'hypothèse H2.

27. Métrologie de l'exposition : Une revue des techniques de mesure du radon sera conduite, des détecteurs passifs intégrateurs (tels que les détecteurs traces nucléaires solides CR-39, les plus utilisés) aux instruments de mesure en continu. L'analyse portera sur leur performance, leur accessibilité et leur adéquation aux cadres réglementaires, afin de démontrer la maturité technique des outils de diagnostic.

28. Solutions de prévention et de remédiation : Une synthèse exhaustive des solutions techniques sera réalisée. Pour l'habitat existant, les méthodes de remédiation (étanchéification, ventilation, dépressurisation du sol) seront évaluées en termes d'efficacité, de coût et de conditions de mise en œuvre. Pour les constructions neuves, les stratégies de prévention seront analysées. Ce panorama confirmera l'existence d'un arsenal technique complet et adaptable.

Ce premier axe constitue le socle factuel qui objective le paradoxe central de notre étude : la connaissance scientifique et les solutions techniques étant disponibles, les causes de la persistance d'une exposition sanitairement significative sont à rechercher ailleurs.

**Axe 2 : L'analyse politico-réglementaire et comparative**

Le deuxième axe se concentre sur l'analyse critique du cadre normatif régissant la gestion du risque radon, en cohérence avec l'hypothèse H1 qui interroge l'efficacité d'une approche principalement réglementaire et descendante.

29. Analyse du cadre normatif français : Une étude approfondie de la réglementation française sera menée, incluant sa genèse et ses évolutions récentes (transposition de la directive EURATOM 2013/59, décrets de 2018). L'analyse portera sur le contenu des textes (seuils, obligations) et sur les rapports d'évaluation des autorités compétentes (ASN, IRSN, ANSES) afin d'identifier les forces et les limites du dispositif, en particulier son faible impact sur l'habitat privé.

30. Analyse comparative internationale : Afin de mettre en perspective le cas français, une analyse comparative des politiques publiques sera conduite avec d'autres pays confrontés au même enjeu (ex : États-Unis, Canada, Suisse, Royaume-Uni). Les critères de comparaison incluront les niveaux d'action, le caractère incitatif ou obligatoire des mesures, l'existence de programmes d'aide financière, ainsi que les stratégies de dépistage et de sensibilisation.

31. Articulation avec les politiques de rénovation énergétique : L'hypothèse H3, relative à l'effet paradoxal potentiel des politiques d'efficacité énergétique, sera examinée. Nous rechercherons dans la littérature les preuves documentées d'une exacerbation du risque radon dans les bâtiments rénovés sans ventilation adaptée. La comparaison internationale permettra d'identifier les bonnes pratiques d'intégration de la problématique radon dans les programmes de rénovation.

Cet axe vise à évaluer la pertinence et l'effectivité du cadre réglementaire, en identifiant ses angles morts structurels qui limitent sa portée sur l'exposition réelle de la population.

**Axe 3 : L'analyse des barrières socio-économiques et communicationnelles**

Le troisième axe, au cœur de la problématique, mobilise les sciences sociales pour analyser les obstacles à l'appropriation du risque radon. La littérature scientifique révèle une sous-représentation de ces aspects (Kulka- 2022, p. 9), rendant cette analyse d'autant plus pertinente pour valider les hypothèses H1 et H4.

32. Analyse de la perception du risque : En s'appuyant sur le cadre théorique de la sociologie du risque, nous synthétiserons les résultats d'enquêtes et d'études qualitatives. L'analyse visera à caractériser les obstacles cognitifs spécifiques au radon : le biais de « naturalité », l'invisibilité sensorielle, la latence des effets sanitaires, et la complexité du message scientifique.

33. Évaluation des stratégies de communication : Une analyse critique des campagnes d'information publiques sera menée, en évaluant leur contenu, leurs canaux et leur impact présumé au regard des modèles de communication en santé. Parallèlement, l'étude de cas d'initiatives alternatives, telles que celles documentées par des collectifs de citoyens (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/), permettra d'analyser l'efficacité potentielle d'une communication plus incarnée et responsabilisante, en accord avec l'hypothèse H4.

34. Analyse des freins socio-économiques : Les données disponibles sur le coût des travaux de remédiation seront compilées et mises en perspective avec les capacités financières des ménages dans les territoires les plus exposés. L'absence ou l'insuffisance d'aides financières dédiées sera analysée comme un obstacle structurel à l'action.

35. Analyse du rôle des professionnels relais : Le niveau de connaissance et d'implication des professionnels du bâtiment, de l'immobilier et de la santé sera synthétisé à partir des études existantes, afin d'évaluer leur rôle potentiel de prescripteurs et de relais d'information.

En conclusion, cette approche de recherche synthétique, comparative et transdisciplinaire est la plus à même de répondre à la complexité de la question posée. En articulant l'analyse des faits techniques, des cadres réglementaires et des dynamiques sociales, elle permettra de construire un diagnostic systémique des défaillances de la politique actuelle de gestion du risque. C'est cette vision intégrée qui autorisera, in fine, la formulation de recommandations opérationnelles visant à transformer la gestion du risque radon d'une obligation réglementaire partielle en une véritable culture de la prévention en santé-environnement.

# Analyse et présentation des résultats

Ce chapitre constitue le pivot de la présente étude. Il est consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation du corpus de données hétérogènes mobilisé pour élucider le paradoxe du radon : comment un risque sanitaire majeur, responsable d'environ 3 000 décès annuels par cancer du poumon en France, scientifiquement élucidé et techniquement maîtrisable, demeure-t-il un enjeu de santé publique sous-estimé et une préoccupation marginale au sein de la société (Tymen- p. 139,) ? Pour répondre à cette question, la démarche s'articule en trois sections successives et complémentaires.

La première section dresse un panorama détaillé du corpus empirique qui fonde l'investigation. Ce socle documentaire hétérogène inclut des données géologiques et métrologiques objectivant l'aléa et l'exposition effective des populations (Gundersen-Wanty-2020, p. 93, Chiaberto- 2022, p. 8), des méta-analyses épidémiologiques quantifiant le risque sanitaire et sa synergie avec le tabagisme (Chen-2005, p. 3, Tymen- p. 138), les textes réglementaires structurant l'action publique, ainsi que des matériaux de communication institutionnels et des initiatives citoyennes, à l'instar du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr.

La deuxième section déploie l'analyse des résultats selon l'approche de triangulation méthodologique. Les données sont systématiquement confrontées aux hypothèses de recherche à travers trois axes : techno-scientifique, politico-réglementaire et socio-communicationnel. Il s'agira de valider la robustesse de la chaîne de connaissance (de la source à la remédiation), d'examiner les forces et les angles morts de l'action publique, notamment la dissymétrie entre sphère professionnelle et habitat privé, et enfin d'explorer les freins cognitifs, culturels et économiques qui entravent l'appropriation sociale du risque.

Enfin, la troisième section propose une interprétation synthétique de ces analyses croisées. Elle vise à articuler les constats pour construire une lecture globale des mécanismes qui perpétuent le décalage entre la certitude scientifique et la faiblesse de l'action préventive. Cette interprétation mettra en lumière comment une action publique incomplète, des interférences avec d'autres politiques publiques et des stratégies de communication inadaptées à la nature invisible du risque se conjuguent pour entretenir ce paradoxe. In fine, ce chapitre ambitionne de fournir une explication structurée qui jettera les bases de la discussion et de la formulation de recommandations pour une gestion du risque radon à la hauteur des enjeux sanitaires.

## 4.1 Interprétation des résultats

1.1 Interprétation des résultats

L'analyse des résultats, fondée sur une triangulation des données, a permis d'élucider le paradoxe central qui caractérise la problématique du radon : un risque sanitaire majeur, scientifiquement avéré et techniquement maîtrisable, demeure un enjeu largement sous-estimé par les pouvoirs publics et la société. L'étape de l'interprétation vise désormais à dépasser ce constat analytique pour en extraire le sens, en explicitant les mécanismes sous-jacents qui perpétuent ce décalage. Il s'agit de répondre à la question de recherche centrale : comment optimiser les stratégies de gestion du risque pour réduire de manière tangible le fardeau sanitaire, en comprenant les causes profondes de l'inefficacité relative des approches actuelles ?

Cette interprétation s'articule autour de la vérification des hypothèses de recherche. Les résultats convergent pour valider notre hypothèse principale (H1), selon laquelle la gestion du risque radon est aujourd'hui freinée non par des lacunes scientifiques, mais par une approche réglementaire descendante qui échoue à adresser les barrières socio-économiques et le déficit de perception du risque. L'interprétation des données corrobore également les hypothèses secondaires relatives à l'hétérogénéité des contextes locaux (H2), à l'effet paradoxal des politiques de rénovation énergétique (H3) et à la nécessité d'une refonte des stratégies de communication (H4). En synthétisant la signification des résultats, cette section a pour ambition de fournir une lecture cohérente et intégrée des freins et des leviers d'action, posant ainsi les jalons des recommandations qui suivront.

**1. La validation de la maîtrise techno-scientifique : un risque connu et maîtrisable (H1)**

L'interprétation des données issues de l'axe techno-scientifique converge vers une conclusion univoque et fondamentale : la persistance du radon comme enjeu de santé publique ne saurait être imputée à une incertitude scientifique, à une controverse sur la nature du risque ou à une impasse technologique. Les résultats confirment de manière éclatante la première partie de notre hypothèse principale (H1) : les connaissances et les solutions techniques sont non seulement disponibles, mais également robustes, éprouvées et suffisantes pour une gestion efficace du risque. L'interprétation de cette solidité est cruciale, car elle déplace l'épicentre du problème de la sphère de la recherche vers celle de l'action politique et de la mobilisation sociale.

**1.1. La quantification du risque : de l'aléa géologique au fardeau sanitaire**

La science a réussi à objectiver le risque radon à chaque maillon de la chaîne causale. Premièrement, la cartographie de l'aléa, loin de constituer un simple zonage administratif, repose sur une compréhension fine des processus géologiques. Les données confirment que la lithologie, notamment la présence de formations granitiques ou de schistes uranifères, est le déterminant premier de l'émanation (Pinti- 2013, p. 66). L'interprétation des anomalies et des décorrélations locales est cependant plus éclairante encore. La mise en évidence du rôle des accidents tectoniques, tels que les réseaux de failles agissant comme des drains préférentiels, signifie que l'aléa n'est pas une simple « tache » géologique homogène, mais un champ de risque complexe, modulé par l'histoire structurale des terrains (Pinti- 2013, p. 74, Pinti- 2013, p. 66). Cette complexité valide l'hypothèse H2 sur la nécessité d'une approche locale fine, sans toutefois remettre en cause la capacité globale à identifier les territoires prioritaires.

Deuxièmement, la preuve épidémiologique est aujourd'hui consolidée et irréfutable. L'analyse de la trajectoire historique des études, des cohortes de mineurs d'uranium aux méta-analyses résidentielles, atteste d'un lien de causalité solidement établi (Pirard- p. 72). L'élément d'interprétation le plus significatif est la confirmation du risque aux faibles doses et l'adoption du modèle « linéaire sans seuil » (LNT). L'implication de ce modèle en santé publique est majeure : il n'existe pas de concentration « sûre » de radon. Chaque exposition, aussi faible soit-elle, contribue au risque cumulé, ce qui légitime pleinement les recommandations de l'OMS de maintenir les niveaux d'exposition « aussi bas que raisonnablement possible » (principe ALARA). Loin de semer le doute, l'existence d'études écologiques aux résultats discordants (Tymen- p. 93, Pirard- p. 93,) doit être interprétée non comme une controverse scientifique, mais comme l'illustration méthodologique du « sophisme écologique ». En échouant à contrôler au niveau individuel le principal facteur de confusion qu'est le tabagisme, ces études renforcent *a contrario* la validité des études cas-témoins qui, elles, convergent unanimement (Tymen- p. 94).

Troisièmement, la quantification du fardeau sanitaire est précise. Les estimations de 3 000 décès annuels en France situent le radon au même niveau de gravité que des risques comme les accidents de la route, qui font l'objet d'une mobilisation politique et sociétale intense. L'interprétation la plus cruciale concerne l'interaction synergique avec le tabagisme. Les données indiquant que la « majeure partie des cancers du poumon supposés attribuables au radon surviennent chez les fumeurs » (Tymen- p. 138, Masse- p. 138,) appellent une lecture fine. D'une part, à l'échelle populationnelle, la lutte contre le radon représente une stratégie de réduction des risques extraordinairement pertinente pour les fumeurs, population pour laquelle le nombre de décès évitables en valeur absolue est le plus élevé. D'autre part, à l'échelle individuelle, le radon est la cause principale de cancer du poumon chez les non-fumeurs (Pirard- p. 139). Cette double réalité signifie que la politique de gestion du radon n'est ni opposable à la politique anti-tabac, ni réductible à une seule population cible ; elle en est une composante essentielle et transversale.

Enfin, les modèles de risque permettent des estimations fines. La démonstration qu'une exposition à vie à 200 Bq/m³ double le risque pour un non-fumeur et que l'exposition durant les premières décennies de vie est la plus impactante confère au risque une dimension temporelle et biographique (Chen-2005, p. 3). Le risque n'est pas une fatalité statique mais le résultat d'une trajectoire d'exposition, ce qui ouvre la voie à des stratégies de prévention ciblées sur les moments clés de la vie (construction, enfance, rénovation).

### 1.2. La disponibilité des solutions : de la mesure à la remédiation

Si le risque est parfaitement caractérisé, les moyens de le maîtriser le sont tout autant. L'interprétation des données relatives aux technologies de mesure et de remédiation confirme l'absence de barrière technique rédhibitoire. Les dosimètres passifs à traces nucléaires constituent une technologie mature, accessible, peu coûteuse et fiable, parfaitement adaptée à un dépistage à grande échelle. Leur existence signifie que le diagnostic est techniquement et économiquement à la portée de chaque citoyen et de chaque collectivité.

Plus important encore, les solutions correctives sont éprouvées et leur efficacité est quantifiable. Des études de cas documentent des réductions drastiques des concentrations, de plusieurs milliers à quelques centaines de Bq/m³, grâce à des techniques comme la dépressurisation du sol. La palette de solutions, allant des actions simples (aération, colmatage) aux systèmes d'ingénierie avancés (ventilation mécanique, systèmes de dépressurisation du sol), garantit qu'une réponse proportionnée peut être apportée à chaque niveau d'exposition (Bonnefous-1992, p. 1).

L‘interprétation de cet état de fait est sans appel : sur le plan technique, la problématique du radon apparaît comme maîtrisée. L’enjeu n’est pas d’inventer de nouvelles solutions, mais de déployer massivement celles qui existent. Le fait que des centaines de milliers de logements en France dépassent les seuils d’action (Robé- p. 7), alors que les moyens techniques de corriger ces situations sont connus depuis des décennies, constitue le cœur même du paradoxe.

En conclusion, l’interprétation des résultats techno-scientifiques valide de façon irréfutable la prémisse de notre hypothèse H1. La chaîne de la connaissance est complète et solide. Cette conclusion a une portée considérable : elle exonère la communauté scientifique de toute responsabilité dans l’inaction et pointe directement vers les sphères politique, réglementaire et sociale. Si 3 000 personnes meurent chaque année en France d’une cause évitable et techniquement maîtrisable, les raisons de cet échec sont à chercher dans la manière dont la société et ses institutions se saisissent de cette connaissance.

## 2. L'ambivalence du cadre d'action publique : entre avancées normatives et angles morts stratégiques (H2 & H3)

L’interprétation des résultats de l’analyse du cadre politico-réglementaire révèle une dynamique complexe, faite d’avancées indéniables mais aussi de limitations structurelles profondes qui entravent son efficacité globale. Les données valident les hypothèses d’une réponse politique partielle, créant une protection asymétrique (H2), et d’une articulation défaillante avec d’autres politiques publiques majeures, notamment la rénovation énergétique (H3). Cette interprétation montre comment une approche, en apparence rigoureuse et conforme aux directives européennes, peut en réalité contourner le cœur du problème et laisser la majorité de la population exposée.

### 2.1. La fracture réglementaire : le citoyen, angle mort de la protection obligatoire (H2)

La transposition de la Directive 2013/59/EURATOM en droit français a incontestablement représenté un progrès, marquant le passage d’une culture de la recommandation à une logique de l’obligation. L’établissement d’un niveau de référence national à 300 Bq/m³ et l’obligation de mesure dans certains lieux constituent un socle réglementaire formel.

Cependant, une interprétation critique de ce dispositif révèle sa principale faiblesse : il instaure une fracture fondamentale entre différents espaces de vie et statuts d’individus. D’un côté, le travailleur et l’usager de certains services publics (élèves, patients) bénéficient d’une protection contraignante dans les zones prioritaires. De l’autre, le citoyen dans son foyer, qui est pourtant le lieu d’exposition chronique le plus déterminant pour le risque sanitaire, reste le grand oublié de l’obligation d’agir. Pour l’habitat privé, la réglementation se limite à une obligation d’information lors des transactions immobilières. Cette information, bien que nécessaire, s’avère insuffisante car elle reporte l’entière responsabilité de l’action sur l’individu. L’État informe, mais n’oblige ni n’accompagne. Cette dichotomie crée de fait une politique de santé publique à deux vitesses : le risque est jugé suffisamment grave pour imposer des actions dans les écoles, mais pas dans les chambres d’enfants.

Cette interprétation valide pleinement l’hypothèse H2. La réponse politique est partielle car elle se concentre sur les espaces où la responsabilité de l’État est la plus directement engageable, délaissant l’espace privé où se niche la majorité du risque. La comparaison internationale renforce ce constat : des pays comme le Canada ou les États-Unis, avec des seuils d’action plus bas (200 et 148 Bq/m³ respectivement), ont misé sur des stratégies proactives de sensibilisation de masse et d’incitation à la mesure pour tous les foyers, reconnaissant que le risque est avant tout domestique (Hystad- 2014, p. 4). L’approche française, plus administrative et descendante, se révèle ainsi moins apte à pénétrer la sphère privée et à impulser une véritable culture de la prévention.

### 2.2. L'incohérence politique : la rénovation énergétique, fabrique de "pièges à radon" (H3)

L'interprétation de l'articulation entre la politique de gestion du radon et celle de la performance énergétique des bâtiments met en lumière une incohérence flagrante, qui valide l'hypothèse H3 sur l'effet paradoxal. Les politiques de rénovation énergétique, massivement soutenues par des fonds publics, encouragent l'amélioration de l'isolation et, surtout, de l'étanchéité à l'air des logements.

Or, réduire les infiltrations d'air parasites sans garantir un renouvellement d'air maîtrisé et suffisant conduit inévitablement à une augmentation de la concentration des polluants intérieurs, dont le radon. Dans une maison située sur un sol émanateur, l'amélioration de l'étanchéité à l'air peut transformer le bâtiment en « piège à radon ». Ce phénomène ne doit pas être vu comme un simple effet secondaire technique, mais comme une défaillance stratégique majeure de l'action publique. L'analyse a montré que les dispositifs d'aide à la rénovation et les référentiels techniques associés traitent la question du radon de manière marginale. Il n'existe ni obligation de dépistage préalable en zone à risque, ni conditionnalité des aides à l'installation d'une ventilation performante garantissant à la fois efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur.

La signification de cette incohérence est profonde : l'État, dans sa quête d'un objectif louable (la transition énergétique), subventionne des travaux qui peuvent, involontairement, dégrader la santé des occupants en augmentant leur exposition à un cancérigène avéré. Cette situation illustre une pensée en silos, où la politique du bâtiment est déconnectée de la politique de santé environnementale. La validation de l'hypothèse H3 révèle une rationalité politique limitée qui échoue à concevoir le bâtiment de manière holistique, comme un système où santé, confort et performance énergétique sont indissociables.

En somme, l'interprétation du cadre d'action publique révèle un système ambivalent qui, tout en reconnaissant formellement le risque, se montre structurellement incapable de l'adresser là où il est le plus prégnant – l'habitat privé – et crée même, par son manque de vision intégrée, les conditions d'une aggravation de ce risque.

## 3. Le poids de l'immatériel : interprétation des freins socioculturels et économiques (H4)

Si la connaissance scientifique est solide et le cadre réglementaire au moins partiellement en place, pourquoi le radon reste-t-il un « non-sujet » pour la majorité de la population ? L'analyse des données qualitatives et des travaux en sciences sociales valide l'hypothèse H4 : la nature invisible du risque, couplée à des stratégies de communication inadaptées et à des barrières économiques concrètes, érige un « mur de l'invisible » quasi infranchissable.

### 3.1. Les barrières cognitives : la perception d'un risque contre-intuitif

Le radon cumule plusieurs attributs qui le rendent difficile à appréhender pour le cerveau humain et contre-intuitif. Son invisibilité sensorielle, d'abord, le prive de toute manifestation tangible, le rendant purement abstrait, une construction intellectuelle dépendant de la confiance en la mesure scientifique. Son origine naturelle, ensuite, est faussement perçue comme un gage d'innocuité, par opposition aux polluants « chimiques » ou « industriels » perçus comme plus menaçants. La longue latence de ses effets sanitaires, qui peuvent se manifester des décennies après l'exposition, dilue la perception du lien de causalité et diminue le sentiment d'urgence.

Enfin, la nature probabiliste du risque — l'exposition augmente la probabilité d'un cancer sans en être une cause certaine pour chaque individu — favorise des biais cognitifs comme le déni. L'ensemble de ces facteurs explique pourquoi une simple information factuelle est insuffisante pour générer une prise de conscience ; le déficit n'est pas tant informationnel que représentationnel.

### 3.2. L'échec de la communication institutionnelle et l'émergence de nouveaux récits (H4)

Face à ces barrières cognitives, la communication institutionnelle, typiquement marquée par un discours d'expert – factuel, précis et descendant – montre ses limites. Si ce modèle est indispensable pour établir la crédibilité de l'information, son potentiel mobilisateur est faible car il ne parvient pas à franchir le mur des représentations individuelles.

À l'opposé, l'analyse d'initiatives citoyennes comme le blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/ révèle une rupture de paradigme. L'interprétation de son impact potentiel réside dans sa capacité à mobiliser un registre différent. Par l'incarnation du risque via le témoignage personnel, il rend le danger tangible et humain. Par l'interpellation directe et l'usage d'un registre émotionnel, il ne se contente pas d'informer mais engage la responsabilité morale du lecteur. En orientant le discours vers des solutions concrètes, il favorise un sentiment d'auto-efficacité (*empowerment*). La comparaison de ces deux modèles valide l'hypothèse H4 : pour surmonter les barrières cognitives, la communication doit évoluer d'une approche technique vers une démarche pédagogique, incarnée, localisée et responsabilisante, axée sur la promotion d'un habitat sain plutôt que sur la seule menace statistique.

### 3.3. La barrière finale : le coût de la précaution et l'inégalité environnementale

Enfin, même lorsqu'un individu est conscientisé, une barrière finale se dresse : le coût de l'action. Si la mesure du radon est abordable, les travaux de remédiation efficaces peuvent représenter un investissement de plusieurs milliers d'euros. L'absence de dispositifs d'aide financière structurels pour les particuliers, contrairement aux subventions massives pour la rénovation énergétique, agit comme un puissant inhibiteur et un facteur d'inégalité.

La capacité à se protéger d'un risque environnemental devient ainsi dépendante du niveau de revenu. Pour les ménages modestes, particulièrement dans l'habitat ancien en zone à risque, la charge de la précaution est un obstacle souvent rédhibitoire. Cette situation crée une véritable inégalité sociale de santé environnementale : les populations les plus vulnérables économiquement sont potentiellement les plus exposées et les moins capables d'y remédier. La superposition de la carte du potentiel radon avec celle de la précarité révélerait probablement des « zones rouges » de double peine, où le risque géologique est exacerbé par la vulnérabilité sociale.

En conclusion de cette interprétation globale, les résultats de notre étude dressent un portrait cohérent du paradoxe du radon. La science a fourni les connaissances et les outils (validation de H1), mais ceux-ci se heurtent à une action publique trop timide, sectorielle et incohérente pour être efficace à grande échelle (validation de H2 et H3). Cette action publique limitée est elle-même incapable de surmonter les profondes barrières cognitives, communicationnelles et économiques qui ancrent le radon dans l'invisible et l'inaction au sein de la société (validation de H4). L'ensemble de ces interprétations valide notre hypothèse principale : la solution ne viendra pas d'un surcroît de connaissance technique, mais d'un changement radical d'approche, intégrant de manière systémique les dimensions politique, sociale, économique et communicationnelle dans une stratégie proactive et véritablement tournée vers le citoyen.

## 4.2 Description des données recueillies

1.3 Description des données recueillies

Conformément à la démarche de revue systématique détaillée dans la méthodologie, la collecte a permis de constituer un corpus documentaire exhaustif, de nature hétérogène et multidisciplinaire. Ce corpus forme le socle empirique sur lequel repose l'analyse développée dans ce mémoire. Chaque source a été sélectionnée pour sa pertinence au regard des hypothèses de recherche et sa capacité à éclairer l'un des trois axes analytiques de notre investigation. Une description rigoureuse de ce corpus est un préalable indispensable à la compréhension de la portée et de la validité des résultats subséquents.

1. Données pour l'axe techno-scientifique : l'objectivation du risque et la maîtrise des solutions

Ce premier ensemble de données a été collecté afin d'établir un état de l'art exhaustif des connaissances scientifiques et techniques sur le radon. L'objectif était de rassembler des preuves factuelles et quantitatives démontrant que le risque est précisément caractérisé, mesurable et techniquement maîtrisable, venant ainsi étayer l'hypothèse (H1) selon laquelle la persistance du problème ne découle ni d'une incertitude scientifique ni d'une impasse technologique. Ce corpus se décline en quatre catégories principales.

- Données géologiques, géophysiques et cartographiques : Ce sous-ensemble fondamental documente la source primaire du risque. Il inclut, en premier lieu, la cartographie nationale du potentiel radon des formations géologiques françaises publiée par l'IRSN, qui constitue le document de référence pour la politique publique nationale. Afin d'enrichir cette vision, des approches méthodologiques internationales ont été intégrées, telles que des études illustrant l'usage de la spectrométrie gamma aéroportée pour cartographier les concentrations en équivalent uranium (eU) (Gundersen-Wanty-2020, p. 93). Des travaux qualifiés de « radio-géo-lithologiques » établissent des corrélations statistiques robustes entre les mesures de radon intérieur et les unités géologiques sous-jacentes, après une caractérisation radiométrique détaillée des substrats rocheux (Chiaberto- 2022, p. 8). Ces données attestent du potentiel prédictif élevé du risque à l'échelle locale. Le corpus documente également l'influence de facteurs aggravants, comme la présence de failles tectoniques actives (Gundersen-Wanty-2020, p. 103) ou la nature spécifique de la roche-mère, qu'il s'agisse de schistes bitumineux (Pint- 2013, p. 56) ou de granites uranifères (Gundersen-Wanty-2020, p. 71). Des études comparatives internationales, comme la cartographie du potentiel géologique du radon (GRP) aux États-Unis (Gundersen-Wanty-2020, p. 197), permettent de contextualiser les approches et les niveaux de risque observés (Palermi-Pasculli-2008, p. 2).

- Données de métrologie et d'exposition de la population : Ce deuxième volet rassemble les preuves quantitatives de l'exposition effective des populations. Le cœur de ce corpus est formé par les résultats des campagnes nationales de mesure menées en France depuis les années 1980. Un bilan publié en 2000, portant sur plus de 12 000 mesures, établit une moyenne arithmétique nationale de 90 Bq/m³ et révèle une très forte hétérogénéité des expositions, avec une valeur maximale atteignant 4 687 Bq/m³ (Robé- p. 6). Des données plus récentes confirment ces ordres de grandeur, indiquant qu'environ 5 % des logements dépassent 220 Bq/m³ après correction saisonnière (Koffi- p. 24). À des fins comparatives, les résultats d'enquêtes internationales ont été collectés, notamment la campagne canadienne qui a montré que près de 10 % des foyers excédaient le seuil de 200 Bq/m³ (Henderson- 2012, p. 1).

- Des études de cas utilisant des moniteurs actifs illustrent par ailleurs l'importante variabilité temporelle des concentrations (de 70 Bq/m³ à 1100 Bq/m³ dans un même lieu), soulignant la nécessité de mesures intégrées sur le long terme pour une évaluation fiable de l'exposition chronique (Ippolito-2017, p. 4).

- Données épidémiologiques et toxicologiques : Ce corpus constitue le pilier sanitaire de l'analyse. Il intègre les publications des méta-analyses internationales d'études cas-témoins qui ont quantifié le risque en population générale et validé une relation dose-réponse linéaire sans seuil, même à des niveaux d'exposition domestique. Spécifiquement pour la France, des estimations chiffrent le fardeau sanitaire à près de 13 % de la mortalité par cancer du poumon, soit environ 2 755 décès annuels sur la base des données de 1990 (Tymen- p. 139). Des modèles quantitatifs du risque, issus de rapports de référence comme le BEIR VI, ont été collectés pour illustrer l'ampleur du risque et la synergie avérée avec le tabagisme : une exposition chronique à 200 Bq/m³ peut ainsi multiplier par deux le risque pour un non-fumeur (Chen-2005, p. 3). Pour corroborer ces données épidémiologiques, des études toxicologiques expérimentales ont été incluses, démontrant l'induction de carcinomes pulmonaires chez le rat suite à l'inhalation de radon (Tymen- p. 61). Enfin, des études sur les effets d'autres types d'expositions aux rayonnements ionisants (Laurier- p. 55, Silva Dinis-2021, p. 190) permettent de contextualiser le risque radon au sein de la radioprotection.

- Données sur les solutions techniques de prévention et de remédiation : Ce dernier sous-ensemble rassemble la documentation technique attestant de l'existence et de l'efficacité des solutions. Il comprend des guides de bonnes pratiques, des normes et des publications scientifiques évaluant les méthodes de remédiation. Des études de cas chiffrées sont particulièrement probantes : l'une d'elles documente une réduction de concentration de 8 000 Bq/m³ à 390 Bq/m³ dans une cave et de 1 000 Bq/m³ à 200 Bq/m³ à l'étage habitable, démontrant l'efficacité de la dépressurisation du sol (Tirmarche- p. 218, Masse- p. 218). Ces données factuelles confirment la disponibilité d'un arsenal de solutions techniques éprouvées.

**2. Données pour l'axe politico-réglementaire et comparatif**

Le deuxième axe de collecte a visé à constituer un corpus juridique, institutionnel et politique pour analyser les cadres d'action publique.

- Textes réglementaires et normatifs : La base de ce corpus est constituée des textes officiels. Au niveau supranational, la Directive 2013/59/EURATOM a été collectée, puisqu'elle établit un cadre réglementaire commun pour les États membres, incluant l'obligation de fixer un niveau de référence national n'excédant pas 300 Bq/m³ (Cinelli-2022, p. 1). Pour la France, l'arsenal législatif et réglementaire (ordonnance de 2016, décrets et arrêtés de 2018) a été compilé. La collecte de textes antérieurs a permis une analyse diachronique de l'évolution normative. Les cadres réglementaires d'autres pays (États-Unis, Canada, Suisse) ont également été intégrés à des fins d'analyse comparative.

- Rapports institutionnels et littérature grise : Ce volet documentaire est d'une importance capitale, offrant un regard réflexif et critique sur l'action publique. Il est composé des rapports, avis et guides publiés par les organisations de référence (OMS, CIPR) et les agences nationales (ASN, ANSES, IRSN). Ces documents évaluent l'application des réglementations, identifient les obstacles et formulent des recommandations, alimentant directement l'analyse critique de ce mémoire.

- Données sur l'articulation avec les politiques énergétiques : Afin d'investiguer l'hypothèse (H3) d'un antagonisme potentiel entre les politiques de performance énergétique et la gestion du radon, une collecte ciblée a été menée. Elle inclut des études techniques modélisant les flux d'air dans les bâtiments. Des données expérimentales sur la dispersion d'un gaz traceur dans un logement très étanche montrent par exemple comment une ventilation inadaptée peut entraîner une accumulation de polluants (Koffi- p. 91). Ces données objectivent le paradoxe selon lequel l'amélioration de l'étanchéité à l'air, si elle n'est pas couplée à une ventilation maîtrisée, peut exacerber l'exposition au radon.

**3. Données pour l'axe des barrières socio-économiques et communicationnelles**

Le troisième axe a rassemblé des données majoritairement qualitatives pour analyser les freins à l'appropriation du risque et à l'efficacité de l'action publique, en lien avec les hypothèses (H1) et (H4).

- Données sur la perception du risque et la sensibilisation : Le corpus intègre des enquêtes et analyses en sciences sociales qui explorent les représentations du risque radon. Ces documents sont essentiels pour décrypter les obstacles cognitifs à la prise de conscience: l'invisibilité sensorielle du gaz, son origine naturelle perçue comme rassurante, et la longue latence de ses effets sanitaires.

- Matériels de communication publique : Une collecte systématique des supports d'information produits par les institutions publiques (brochures, sites web, campagnes) a été réalisée en vue d'une analyse de contenu. L'objectif est d'évaluer les stratégies discursives et les modèles de communication mobilisés.

- Sources non institutionnelles et initiatives citoyennes : Une attention particulière a été portée à des sources alternatives offrant une perspective complémentaire au discours institutionnel. Le travail de documentation et de témoignage mené par des initiatives comme le blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr a été intégré au corpus comme une étude de cas. Il représente une forme d'expertise citoyenne qui ancre le risque dans un récit personnel, permettant d'évaluer l'hypothèse (H4) sur l'efficacité de registres de communication plus incarnés.

- Données socio-économiques : Enfin, le corpus a été complété par des données relatives aux dimensions économiques du problème. Des études estimant le coût des travaux de remédiation ont été recensées, ainsi que des informations sur l'absence de dispositifs d'aide financière structurels pour les particuliers en France. La superposition de ces données économiques avec la cartographie du risque et les indicateurs de vulnérabilité socio-économique met en lumière les freins structurels à l'action.

En somme, la collecte a produit un corpus de données robuste, diversifié et cohérent avec la problématique de recherche. Sa nature composite est le fondement de la démarche transdisciplinaire de cette étude. C'est l'analyse croisée de ces diverses strates de données qui autorisera, dans la suite de ce mémoire, une déconstruction rigoureuse du paradoxe du radon.

## 4.3 Analyse des résultats

1.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats constitue l'étape centrale de ce mémoire, visant à confronter, synthétiser et interpréter le corpus de données hétérogènes recueilli. En conformité avec la méthodologie de triangulation adoptée, cette analyse s'articule autour des trois axes prédéfinis : techno-scientifique, politico-réglementaire et socio-communicationnel. La finalité de cette démarche est de déconstruire méthodiquement le paradoxe fondamental du radon : un risque sanitaire majeur, scientifiquement élucidé et techniquement maîtrisable, qui demeure un enjeu sous-estimé en santé publique et une préoccupation marginale au sein de la société. L'analyse qui suit met en lumière les mécanismes, les ruptures et les points de friction expliquant la persistance de ce décalage entre la connaissance scientifique et l'action préventive.

**Axe 1 : Analyse des données techno-scientifiques : la confirmation d'un risque maîtrisé**

Cette première section de l'analyse a pour objectif de démontrer la robustesse et la maturité des connaissances scientifiques et techniques relatives au radon. En s'appuyant sur les données géologiques, métrologiques, épidémiologiques et techniques, elle vise à valider l'hypothèse (H1) selon laquelle la persistance du problème ne peut être imputée ni à une incertitude scientifique fondamentale, ni à une lacune technologique. L'analyse convergente de ces données établit que la chaîne de la connaissance, de la source du risque à sa remédiation, est complète et solide.

**1.1. Quantification de l'aléa et de l'exposition : une réalité géographique et statistique objectivée**

L'analyse des données géologiques et métrologiques révèle une maîtrise avancée de la quantification de l'aléa et de l'exposition des populations. La cartographie du potentiel radon, telle que celle produite par l'IRSN pour la France, résulte d'une analyse rigoureuse croisant la lithologie des formations géologiques avec des milliers de mesures *in situ*. L'analyse confirme que la teneur en uranium du substratum rocheux constitue l'indicateur primaire ; les formations granitiques, certains schistes bitumineux ou roches métamorphiques sont systématiquement identifiées comme les principales sources de l'aléa.

Toutefois, l'analyse démontre que la relation entre la radioactivité du sous-sol et les concentrations de radon dans l'air intérieur n'est pas univoque. Des facteurs secondaires, mais critiques, modulent le transfert du gaz vers la surface. Les études de terrain mettent en évidence une corrélation parfois imparfaite entre les mesures de spectrométrie gamma en surface, qui quantifient l'équivalent uranium (eU), et les mesures de radon dans le sol (Gundersen-Wanty-2020, p. 93). Cette décorrélation s'explique par le rôle prépondérant de la perméabilité des sols et de la présence de réseaux de failles. Des recherches menées au Canada indiquent que des accidents tectoniques majeurs peuvent agir comme des drains préférentiels, facilitant la migration du radon et créant des anomalies locales significatives, y compris dans des zones non considérées *a priori* comme à fort potentiel (Pinti - 2013, p. 74, Pinti- 2013, p. 66). Ces données confirment que si la géologie définit l'aléa de fond, la tectonique et la pédologie locales en déterminent l'expression en surface. De même, la présence de radon dans les eaux souterraines est fortement corrélée aux unités géologiques traversées, avec deal. - concentrations plus élevées dans les roches magmatiques ou métamorphiques naturellement riches en uranium (Pinti-2013, p. 63).

Au-delà de l'aléa, l'analyse des campagnes nationales de mesure objective l'exposition réelle des populations. Les données françaises, consolidées sur plusieurs décennies, sont sans équivoque. Une extrapolation des mesures disponibles suggère qu'environ 370 000 habitations individuelles en France dépasseraient le seuil de 400 Bq/m³ et que près de 75 000 excéderaient 1 000 Bq/m³ (Robé- p. 7). Ces chiffres dessinent les contours d'un problème sanitaire d'envergure. L'analyse statistique de ces campagnes révèle une distribution des concentrations de type log-normale, constat fondamental qui implique qu'une majorité de bâtiments présente des niveaux faibles, mais qu'une fraction non négligeable atteint des concentrations très élevées. Cette « queue » de distribution justifie pleinement des politiques de dépistage ciblées sur les zones à risque.

Ces bâtiments à fortes concentrations contribuent de manière disproportionnée à la dose collective. En France, les habitations dépassant 1 000 Bq/m³ ne représentent qu'une faible part du parc immobilier mais sont responsables de 7 % de l'exposition collective totale au radon ; celles dépassant 400 Bq/m³ en représentent 20 % (Robé- p. 7). L'efficacité d'une politique de santé publique réside donc dans sa capacité à identifier et à traiter prioritairement ces situations extrêmes. Enfin, l'analyse des facteurs d'exposition au sein des bâtiments confirme une tendance robuste : les concentrations diminuent significativement avec l'élévation des étages, avec des ratios d'exposition entre le rez-de-chaussée et le premier étage de l'ordre de 1,5 (López-Pérez- 2022, p. 5). Cette stratification verticale renforce l'idée que le risque est avant tout lié au contact direct du bâti avec le sol.

### 1.2. Consolidation de la preuve épidémiologique : de l'exposition professionnelle à l'exposition domestique

Si la mesure de l'exposition est maîtrisée, sa traduction en risque sanitaire l'est également. L'analyse du corpus épidémiologique reconstitue la chaîne de preuves irréfutables ayant conduit à la classification du radon comme cancérigène avéré pour l'Homme (Groupe 1 du CIRC). Les études princeps sur les cohortes de mineurs d'uranium ont été déterminantes pour établir le lien causal à de hauts niveaux d'exposition. Cependant, la transposition de ce risque aux faibles concentrations domestiques constituait l'enjeu majeur de santé publique.

Les grandes méta-analyses d'études cas-témoins menées en Europe et en Amérique du Nord confirment sans ambiguïté la validité de cette extrapolation. En agrégeant les données de milliers de participants, ces études ont atteint la puissance statistique nécessaire pour mettre en évidence une augmentation significative du risque de cancer du poumon, y compris pour des expositions inférieures aux seuils réglementaires actuels. Le traitement statistique de ces données a permis de modéliser une relation dose-effet de type « linéaire sans seuil » (LNT), signifiant qu'il n'existe pas de concentration en deçà de laquelle le risque serait nul. Chaque Becquerel par mètre cube d'exposition chronique contribue au risque cumulé, ce qui fournit une base scientifique solide aux recommandations de l'OMS prônant de maintenir les niveaux d'exposition « aussi bas que raisonnablement possible » (principe ALARA).

La quantification de ce risque est précise. Des modèles basés sur ces données permettent d'estimer le risque relatif à vie (Lifetime Relative Risk, LRR). Une analyse canadienne modélise qu'une exposition à vie à 200 Bq/m³ multiplie par deux le risque de cancer du poumon pour un non-fumeur (LRR de 2,036 pour les hommes et 1,953 pour les femmes) (Chen-2005, p. 3). Même à 100 Bq/m³, le risque est augmenté d'environ 50 %. Pour un fumeur, dont le risque de base est nettement plus élevé, l'augmentation relative est plus faible (LRR de 1,444 à 200 Bq/m³), mais l'augmentation du risque absolu est considérable (Chen-2005, p. 3). Ces modèles montrent en outre que le risque est cumulatif et que l'exposition durant les premières décennies de vie a un impact majeur sur le risque total (Chen-2005, p. 3).

Une analyse critique de la littérature doit considérer les études écologiques qui ont parfois montré des corrélations négatives ou nulles entre concentration moyenne de radon et mortalité par cancer du poumon (Tymen- p. 93, Pirard- p. 93,). Ces travaux sont sujets au « sophisme écologique », un biais méthodologique majeur qui interdit de transposer une corrélation observée au niveau d'une population agrégée au niveau individuel. Ces études échouent généralement à contrôler le facteur de confusion principal, le tabagisme, dont la prévalence peut varier géographiquement de manière inverse à celle du radon (Tymen- p. 94). Loin d'invalider la preuve scientifique, ces résultats discordants soulignent la supériorité des études cas-témoins individuelles qui, elles, convergent vers la démonstration d'un risque avéré. La sophistication de l'analyse du risque a d'ailleurs atteint un niveau élevé, utilisant des modèles bayésiens pour identifier des profils d'exposition à très haut risque en fonction de multiples Co-expositions (Professionnelles situation de Co-expositions- p. 3,).

### 1.3. Quantification de l'impact sanitaire : Fraction de Risque Attribuable et synergie avec le tabagisme

La convergence des données d'exposition et des relations dose-effet permet de quantifier le fardeau sanitaire du radon. L'outil privilégié est le calcul de la Fraction de Risque Attribuable (FRA), qui estime la proportion de cas d'une maladie qui n'aurait pas eu lieu en l'absence du facteur de risque.

Les estimations pour la France, basées sur les modèles du BEIR VI et les données de mortalité de 1990, chiffrent la part des décès par cancer du poumon attribuable au radon à environ 12,7 % chez les hommes et 12,9 % chez les femmes, soit un total de 2 755 décès pour cette seule année (Tymen- p. 139, Tirmarche- p. 139). Les estimations plus récentes portent ce chiffre à environ 3 000 décès annuels (projections basses).

L'analyse la plus importante pour la santé publique intègre l'interaction synergique entre le radon et le tabagisme. En appliquant la FRA distinctement aux différentes populations, les résultats révèlent un paradoxe fondamental. Selon une modélisation, sur 2 390 décès masculins attribuables au radon, 2 339 surviennent chez des fumeurs ou ex-fumeurs, contre seulement 76 chez des non-fumeurs (Tymen- p. 139). Ces chiffres confirment que « la majeure partie des cancers du poumon supposés attribuables au radon surviennent chez les fumeurs » (Tymen- p. 138, Masse- p. 138, Pirard- p. 138).

Cette analyse quantitative objective une double réalité :

1. Pour un individu non-fumeur, le radon est la principale cause de cancer du poumon, et la FRA dans cette population spécifique pourrait même être plus élevée (jusqu'à 22,8 % selon un modèle) (Tymen- p. 139, Tirmarche- p. 139).

2. À l'échelle de la population générale, en raison de l'effet multiplicatif des risques et de l'incidence bien plus élevée du cancer pulmonaire chez les fumeurs, la majorité absolue du fardeau sanitaire du radon pèse sur cette population. La lutte contre le radon se positionne ainsi comme un levier pertinent et complémentaire de la politique anti-tabac.

### 1.4. Maîtrise technique : la disponibilité et l'efficacité des solutions

En fin de chaîne, l'analyse des techniques de mesure et de remédiation confirme la maîtrise du risque. Les outils de diagnostic, notamment les dosimètres passifs à traces nucléaires, offrent une méthode de mesure intégrée, simple, peu coûteuse et fiable, adaptée à un dépistage à grande échelle.

Les solutions de remédiation sont éprouvées et leur efficacité est quantifiée. Une étude de cas documente une réduction de concentration de 8 000 Bq/m³ à 390 Bq/m³ dans une cave et de 1 000 Bq/m³ à 200 Bq/m³ à l'étage habitable, grâce à la mise en place d'une dépressurisation du sol (Ippolito--2017, p. 6). Ces données factuelles confirment la disponibilité d'un arsenal de solutions techniques, allant de gestes simples (aération, colmatage) à des systèmes très efficaces (système de dépressurisation du sol, ventilation mécanique), capables de ramener les concentrations les plus élevées en deçà des seuils d'action.

En conclusion de cet axe, l'analyse des données techno-scientifiques étaye de manière robuste l'hypothèse H1. La chaîne de la connaissance est complète : le risque radon est identifié, quantifié, localisé et techniquement maîtrisable. Le déficit d'action observé ne peut donc être imputé ni à une controverse scientifique majeure, ni à une impasse technologique. Les causes du paradoxe du radon doivent être recherchées dans les sphères de l'action politique et de la perception sociale du risque.

## Axe 2 : Analyse des cadres d'action publique : entre avancées normatives et angles morts stratégiques

Cette deuxième partie de l'analyse examine le cadre réglementaire et les politiques publiques relatives au radon. Par une approche critique et comparative, elle vise à décrypter les logiques, forces et faiblesses de l'action normative, afin de tester les hypothèses d'une réponse politique partielle (H2) et d'une articulation défaillante avec d'autres politiques publiques (H3).

### 2.1. Une réglementation à deux vitesses : la protection du travailleur versus l'information du citoyen

L'analyse diachronique du cadre normatif met en évidence une évolution significative mais insuffisante, impulsée par la Directive 2013/59/EURATOM. Ce texte a marqué un tournant en imposant aux États membres de se doter d'un plan d'action national et de fixer un niveau de référence n'excédant pas 300 Bq/m³. Sa transposition en droit français (2016-2018) a fait passer la gestion du risque d'une logique de recommandation à une logique d'obligation.

Toutefois, une analyse fine du périmètre de ces obligations révèle une réglementation à deux vitesses. D'une part, un dispositif contraignant a été mis en place pour le monde du travail et certains Établissements Recevant du Public (ERP) – notamment les établissements d'enseignement et de santé. Dans les communes classées en zone 3, ces établissements ont l'obligation de procéder à des mesurages périodiques et, en cas de dépassement du seuil de 300 Bq/m³, d'engager des travaux. D'autre part, l'habitat privé, lieu principal d'exposition chronique, reste en dehors du champ de l'obligation de faire. Pour le citoyen, la seule contrainte est l'obligation d'information lors d'une transaction immobilière via l'« État des Risques et Pollutions ». Le fardeau de la décision, de la mesure et de l'action est entièrement reporté sur l'individu.

La comparaison internationale souligne ce choix politique. Le niveau d'action français de 300 Bq/m³ se situe dans la fourchette haute des recommandations de l'OMS (100-300 Bq/m³), tandis que d'autres pays ont adopté des seuils plus bas (200 Bq/m³ au Canada, 148 Bq/m³ aux États-Unis). Au-delà des seuils, c'est la philosophie d'action qui diffère. L'approche française, descendante et administrative, contraste avec des stratégies de sensibilisation de masse et d'incitation à la mesure dans l'habitat privé, comme au Canada. Cette analyse conforte l'hypothèse H2 d'une réponse politique partielle, qui protège le travailleur et l'usager mais laisse le citoyen largement isolé face au risque dans son foyer.

### 2.2. Le paradoxe de la rénovation énergétique : quand l'étanchéité devient un piège

L'analyse de l'articulation entre la politique de gestion du radon et les politiques de performance énergétique valide l'hypothèse H3, mettant en lumière une incohérence majeure. Les politiques de rénovation énergétique visent à améliorer l'isolation et l'étanchéité à l'air des bâtiments. Or, en réduisant les infiltrations d'air, ces travaux peuvent diminuer le taux de renouvellement d'air et, dans un bâtiment situé sur un sol émanateur, augmenter mécaniquement la concentration intérieure de radon si une ventilation maîtrisée n'est pas assurée.

L'analyse des référentiels techniques et des dispositifs d'aide publique à la rénovation en France révèle une prise en compte lacunaire de ce risque. Les guides techniques mentionnent parfois le radon, mais il ne constitue pas un point de contrôle systématique. Les dispositifs d'aide financière, comme « MaPrimeRénov », n'intègrent pas de volet spécifique à la gestion du radon, ni d'incitation à un dépistage préalable. Des données expérimentales confirment que dans un logement très étanche, une ventilation inadaptée conduit à une accumulation de polluants intérieurs. L'État subventionne ainsi des travaux qui peuvent exacerber l'exposition de la population à un cancérigène. Cet angle mort illustre un manque de vision intégrée de la santé environnementale et du bâtiment durable.

## Axe 3 : Analyse des freins socio-communicationnels : le mur de l'invisible

Cette dernière partie élucide les raisons de la faible appropriation sociétale du risque radon. En s'appuyant sur des données qualitatives, elle explore les barrières cognitives, communicationnelles et économiques qui entravent le passage de la connaissance à l'action, testant ainsi l'hypothèse (H4) d'un déficit dans les stratégies de communication.

### 3.1. La perception d'un risque abstrait : barrières cognitives et culturelles

L'analyse des travaux en sciences sociales met en évidence des freins cognitifs puissants : * L'invisibilité sensorielle : Le radon étant invisible, inodore et insipide, il n'offre aucune prise sensorielle, ce qui le rend abstrait et difficile à se représenter. * L'origine naturelle : Le caractère « naturel » du radon est faussement perçu comme un gage d'innocuité, minimisant la perception du danger. * La longue latence des effets : Le décalage temporel de plusieurs décennies entre l'exposition et l'apparition du cancer du poumon dilue la perception du lien de causalité et diminue le sentiment d'urgence.

Ces caractéristiques expliquent pourquoi l'enjeu n'est pas seulement informationnel mais avant tout représentationnel.

### 3.2. La communication institutionnelle en question : du discours d'expert à l'interpellation citoyenne

L'analyse de contenu des supports de communication institutionnels révèle une approche dominée par un discours d'expert : factuel, technique, précis et descendant. Si cette information est nécessaire, son potentiel mobilisateur apparaît limité.

En contrepoint, l'analyse du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/ comme étude de cas montre une rupture radicale. Le risque y est incarné via le témoignage personnel et un registre émotionnel. Le discours n'informe pas, il interpelle directement, créant une connexion humaine fondée sur la responsabilité morale. La comparaison de ces deux modèles valide l'hypothèse H4 : la communication publique sur le radon souffre d'un déficit d'incarnation et de stratégies favorisant l'appropriation citoyenne (*empowerment*). Le modèle expert centré montre ses limites face à un risque invisible, là où le savoir expérientiel semble plus apte à rendre le risque tangible.

### 3.3. Les barrières socio-économiques à l'action : le coût de la précaution

Enfin, le coût constitue une barrière concrète à l'action. Si la mesure du radon est abordable, les travaux de remédiation efficaces, comme l'installation d'un système de dépressurisation sous dalle, représentent un coût significatif (entre 2 000 et 8 000 euros). L'analyse de la politique publique française révèle l'absence de dispositifs d'aide financière structurels pour les particuliers, contrairement à la rénovation énergétique.

Cette situation crée une inégalité sociale de santé environnementale. La charge financière de la précaution repose exclusivement sur les propriétaires, ce qui peut constituer un obstacle rédhibitoire pour les ménages modestes. La superposition de la carte du potentiel radon avec celle de la précarité économique mettrait probablement en lumière des territoires où le risque sanitaire est doublé d'une incapacité économique à y faire face. Cette barrière structurelle est l'un des freins les plus puissants à une politique de prévention efficace dans l'habitat privé.

En conclusion, l'analyse triangulée des données dresse un tableau cohérent du paradoxe du radon. Le problème ne réside pas dans la science ou la technologie (Axe 1), mais dans une action politique incomplète (Axe 2) et dans l'incapacité collective à surmonter les profondes barrières psychologiques, communicationnelles et économiques qui entourent ce risque (Axe 3). C'est cet ensemble complexe de facteurs qui explique pourquoi un enjeu sanitaire de l'ampleur de 3 000 décès évitables par an en France demeure un problème de santé publique sous-traité.

# Discussion

La phase analytique de ce mémoire a dressé un diagnostic multidimensionnel des enjeux sanitaires et environnementaux liés au radon, révélant un paradoxe fondamental : un risque de santé publique avéré, quantifiable et techniquement maîtrisable demeure en décalage flagrant avec le niveau de préoccupation et d'action qu'il justifierait. Le présent chapitre de discussion vise à dépasser ce constat pour en proposer une interprétation approfondie. Il s'agit de mettre en perspective les résultats obtenus, d'en évaluer la portée, d'en reconnaître les limites et, surtout, d'en explorer les implications théoriques et pratiques afin d'esquisser les contours d'une gestion renouvelée de ce risque invisible.

Pour ce faire, notre argumentation suivra une progression logique en quatre temps. Nous débuterons par une synthèse structurée des principaux résultats, qui réaffirmera les trois piliers de notre analyse : la solidité du consensus scientifique, les défaillances de l'action publique, et les freins socio-communicationnels qui entravent l'appropriation du risque. Cette synthèse servira de socle à une confrontation rigoureuse de nos conclusions avec la littérature scientifique, afin de situer l'originalité de notre démarche dans l'analyse de la fracture systémique entre le savoir et l'action.

Dans un souci de rigueur intellectuelle, nous examinerons ensuite les limites inhérentes à cette étude, non pour en invalider les conclusions, mais pour en délimiter la portée et ouvrir des perspectives de recherche futures, particulièrement dans le champ des sciences sociales appliquées à la gestion du radon. Enfin, ce parcours réflexif aboutira à la section la plus prospective de ce mémoire : l'analyse des implications de nos recherches. Nous y démontrerons comment le cas du radon oblige à repenser les concepts de risque naturel et de justice environnementale, tout en proposant les fondements d'un changement de paradigme pour l'action publique. Cette discussion a donc pour ambition de transformer un diagnostic critique en une feuille de route pour combler le fossé entre la connaissance d'un risque majeur et la mise en œuvre de mesures de protection efficaces et équitables.

## 5.1 Comparaison avec la littérature existante

1.2 Comparaison avec la littérature existante

La confrontation des résultats de la présente recherche avec le corpus de la littérature scientifique constitue une étape essentielle pour en valider la portée, en situer les apports et en souligner l'originalité. Cette démarche ne vise pas à remettre en cause le socle scientifique fondamental — dont la présente analyse a au contraire confirmé la robustesse exceptionnelle — mais à le mettre en perspective. Il s'agit de démontrer en quoi notre approche, en articulant les dimensions scientifiques, réglementaires et socio-communicationnelles, offre un éclairage nouveau sur la persistance de ce que nous avons qualifié de « paradoxe du radon » : un risque avéré, quantifiable et maîtrisable, qui demeure néanmoins en deçà du seuil de préoccupation publique et politique qu'il justifierait.

Notre analyse comparative s'articule autour des trois axes structurants de nos résultats : la convergence avec le consensus scientifique, le diagnostic critique de l'action publique et l'élucidation des freins socio-communicationnels. Pour chaque axe, nous établirons comment nos conclusions s'inscrivent en continuité, en complémentarité ou en tension avec les travaux antérieurs, afin de mieux cerner les angles morts de la recherche et de l'action.

**1. Une convergence rigoureuse avec le consensus scientifique sur la nature et l'ampleur du risque**

Le premier constat, fondamental, est l'alignement étroit des fondements de notre analyse avec les conclusions de la littérature épidémiologique et radiobiologique internationale. Notre recherche ne prétend à aucune découverte fondamentale dans ces domaines ; elle prend au contraire appui sur la solidité de ce consensus pour interroger non pas la réalité du risque, mais les déterminants de son inertie sociale.

- La confirmation de la causalité et de la relation dose-effet : Notre postulat de départ, selon lequel le radon est un cancérogène pulmonaire certain, s'ancre directement dans les conclusions unanimes des grandes études de cohortes de mineurs et des méta-analyses résidentielles. Les travaux fondateurs sur les mineurs, telle l'analyse conjointe de 11 cohortes internationales portant sur près de 65 000 travailleurs (Tymen- p. 84), ont établi de manière irréfutable le lien de causalité. Notre étude s'appuie sur la conclusion centrale de ces travaux : l'existence d'une relation dose-effet de forme linéaire, où l'excès de risque relatif de cancer pulmonaire augmente de façon proportionnelle à l'exposition cumulée (Tymen- p. 84, Tymen- p.75). Cette linéarité, observée même aux plus faibles expositions documentées (Tymen- p.122), constitue la pierre angulaire scientifique qui légitime l'approche réglementaire sans seuil que nous avons analysée. Les résultats de l'étude sur la cohorte des mineurs français, montrant un excès de risque relatif de 0,5 % par unité d'exposition (WLM), s'intègrent parfaitement dans ce cadre international (Tymen- p. 72).

- La validité de l'extrapolation aux expositions domestiques : La transposition du risque des mines à l'habitat a constitué un défi méthodologique majeur, maintes fois souligné dans la littérature (Tymen- p. 148, Tymen- p. 123). Bien que notre analyse critique (section 2.1) ait reconnu les limites inhérentes à cette extrapolation, nos conclusions s'alignent sur le constat le plus décisif de la littérature récente : la remarquable cohérence entre les estimations de risque extrapolées des mineurs et celles mesurées directement en population générale. Les méta-analyses d'études cas-témoins, en dépit de leurs propres contraintes méthodologiques (Pirard- p. 80), ont abouti à des estimations très proches. Une méta-analyse de huit études résidentielles a estimé le risque relatif à 1,14 pour une exposition à 150 Bq/m³, une valeur jugée « remarquablement consistante » avec les modèles dérivés des mineurs (Tymen- p. 123, Masse- p. 8). Cette convergence, qualifiée d'« exceptionnelle » (Tymen- p. 10), est fondamentale car elle légitime l'utilisation des données des mineurs comme une base solide pour les évaluations de santé publique (Tymen- p. 118).

- L'adhésion au modèle Linéaire Sans Seuil (LNT) : Notre analyse de l'action publique repose sur le paradigme du modèle LNT. En cela, nous nous inscrivons dans la lignée des grandes instances de radioprotection (CIPR, BEIR). Nous reconnaissons, à l'instar de la littérature critique, que le LNT est un « choix délibéré » et un modèle de simplification pour la gestion du risque, plutôt qu'une certitude biologique aux très faibles doses (Tymen- p. 49). Cependant, notre démarche s'accorde avec le constat que les données épidémiologiques disponibles, qu'il s'agisse des survivants d'Hiroshima (Tymen- p. 49) ou des mineurs exposés au radon (Tymen- p. 122), ne fournissent « aucune preuve de l'existence d'un seuil ». En l'absence de cette preuve, l'adoption du LNT comme hypothèse prudente et pragmatique demeure l'approche la plus pertinente pour la protection de la santé publique.

- La synergie avec le tabagisme, un modulateur clé : L'interaction synergique entre radon et tabac, que nous avons identifiée comme un résultat majeur, est en parfaite consonance avec un corpus de travaux bien établi. Les études épidémiologiques ont montré que la relation est « plus qu'additive mais moins que multiplicative » (Tymen- p. 88). Notre conclusion selon laquelle la majorité des décès attribuables au radon survient chez les fumeurs est une application directe de ce principe : le risque absolu étant bien plus élevé dans cette population, un même risque relatif s'y traduit par un nombre de cas plus important (Tymen- p. 88, Tymen- p. 122). Parallèlement, notre insistance sur le radon comme première cause de cancer du poumon chez les non-fumeurs est également une conclusion directe des mêmes données, l'excès de risque *relatif* par unité d'exposition étant potentiellement plus élevé chez eux en raison de leur plus faible risque de base (Tymen- p. 88). Les modèles animaux corroborent ces observations en démontrant expérimentalement l'effet promoteur de la fumée de cigarette sur les lésions initiées par le radon (Pirard- p. 64).

En somme, sur le plan de la caractérisation du risque, notre travail synthétise et s'appuie sur un état de l'art d'une solidité rare en santé environnementale. C'est précisément cette robustesse qui confère toute sa pertinence à l'analyse critique des défaillances de l'action publique.

**2. Le diagnostic de l'action publique : une contribution à l'analyse des politiques de gestion du risque**

Si la littérature scientifique sur le risque radon est pléthorique, les travaux analysant de manière critique et systémique sa traduction en politiques publiques sont beaucoup plus rares. C'est dans ce domaine que notre étude apporte une contribution originale, en utilisant le cas français comme une étude de cas révélatrice des tensions entre la connaissance scientifique et l'action politique.

- La mise en évidence d'une réglementation "à deux vitesses" : Alors que la littérature internationale, notamment les recommandations de l'OMS ou de la CIPR (Pirard- p. 82), appelle à la mise en place de plans d'action nationaux complets, notre analyse de la dichotomie française entre une sphère professionnelle très encadrée et une sphère domestique peu contrainte met en lumière une application partielle de ces recommandations. Ce constat révèle un angle mort de la recherche : la plupart des travaux se concentrent sur la fixation de *niveaux de référence*, mais analysent rarement les *modalités de mise en œuvre* et les inégalités que celles-ci peuvent engendrer. Notre travail démontre que le « comment » est aussi important que le « combien ». En transférant la responsabilité sur le citoyen dans l'habitat privé, la politique française crée une situation que la littérature épidémiologique, par sa nature universaliste, ne présuppose pas : une protection qui dépend du statut socio-économique et du niveau d'information.

- L'identification d'une dissonance systémique avec la rénovation énergétique : C'est l'un des apports les plus spécifiques de notre étude. En théorisant le concept de « piège à radon » comme un effet pervers des politiques de transition énergétique, notre analyse apporte une contribution nouvelle à l'interface de deux champs de la littérature qui s'ignoraient largement : la radioprotection et l'efficacité énergétique des bâtiments. Notre travail met en évidence un besoin urgent de recherche et d'intégration politique dans ce domaine, où la littérature actuelle est encore lacunaire.

- Le déficit de soutien à l'action individuelle, un frein documenté mais peu analysé : La littérature sur la gestion du risque dans des pays comme le Canada ou les États-Unis fait souvent état de programmes de sensibilisation et de soutien (Henderson- 2012, p. 1). En comparant implicitement le modèle français, dépourvu d'aides structurelles, à ces approches, notre étude s'inscrit dans un débat plus large sur les instruments de politique publique. Notre conclusion selon laquelle l'absence de soutien financier est un obstacle majeur à la prévention applique au cas spécifique du radon un principe général de santé publique : l'information seule est souvent insuffisante pour induire un changement de comportement, surtout lorsque celui-ci a un coût.

### 3. L'élucidation de l'échec communicationnel : perception du risque et critique méthodologique

Le troisième pilier de notre contribution est l'analyse des raisons de la faible perception sociétale du risque radon. Ici, notre travail se confronte à la fois à la littérature méthodologique en épidémiologie et aux théories de la communication du risque.

- Un positionnement méthodologique en accord avec la critique des études écologiques : Une partie de la controverse publique sur le radon a été alimentée par des études écologiques montrant des corrélations négatives paradoxales (Pirard- p. 82, Tymen- p. 93). Notre analyse écarte fermement ce type d'approche. En cela, nous nous conformons au consensus méthodologique de la littérature épidémiologique, qui a démontré le caractère fallacieux de ces études en raison du « biais écologique » (Tymen- p. 10). Des travaux ont même réussi à simuler et à recréer cette « illusion écologique » (Masse- p. 9). En basant notre argumentation exclusivement sur les études analytiques (cohortes et cas-témoins), nous nous plaçons sur le terrain le plus solide scientifiquement.

- L'application des théories de la perception du risque : Notre analyse des freins cognitifs (invisibilité, origine naturelle, longue latence) applique au cas du radon des concepts bien établis dans la littérature sur la psychologie du risque. Notre travail montre comment le radon est un cas d'école de risque systématiquement sous-évalué par le public. En identifiant la communication institutionnelle comme trop technique et factuelle, nous rejoignons les critiques de la littérature sur la communication de santé, qui plaident pour des approches plus incarnées et narratives pour surmonter l'indifférence face aux risques abstraits.

- L'apport d'une analyse de discours alternative : En examinant le cas concret du blog « le souffle c'est ma vie », notre étude apporte une contribution pratique et originale. Les analyses qualitatives sur la manière dont le risque est communiqué par des acteurs de la société civile sont quasi inexistantes dans ce domaine. Notre analyse de ce discours profane n'est pas anecdotique : elle fournit un exemple tangible d'une stratégie de communication qui répond précisément aux carences identifiées. C'est une manière de passer de la théorie (« il faudrait mieux communiquer ») à la pratique (« voici à quoi une communication efficace pourrait ressembler »).

En conclusion, la confrontation de notre étude avec la littérature existante révèle une double posture. D'une part, une posture de conformité et de validation, en nous appuyant sur un socle de connaissances scientifiques que nous cherchons à valoriser. D'autre part, une posture d'originalité et de critique, en utilisant ce socle comme un levier pour explorer des territoires moins fréquentés par la recherche sur le radon : l'analyse systémique des politiques publiques et des stratégies de communication. Notre contribution ne réside pas dans la découverte d'un nouveau mécanisme biologique ou d'une nouvelle estimation de risque, mais dans le diagnostic d'une fracture systémique entre un savoir scientifique stabilisé et une action collective défaillante.

En cela, notre travail vise à combler un fossé, non pas dans la connaissance du *risque*, mais dans la compréhension de sa *gestion* et de sa *perception*, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles approches pour transformer la connaissance en protection efficace.

## 5.2 Synthèse des principaux résultats

5.4 Synthèse des principaux résultats

La présente recherche, articulée autour de l'analyse d'un risque sanitaire majeur mais sous-estimé, aboutit à une série de constats convergents qui permettent d'élucider le paradoxe du radon. L'analyse triangulée des données techno-scientifiques, des cadres d'action publique et des dynamiques socio-communicationnelles révèle que la persistance de cet enjeu de santé publique ne relève plus d'une incertitude fondamentale, mais d'une défaillance systémique dans la chaîne de gestion du risque, de la connaissance à l'action préventive. La synthèse des résultats s'organise autour de trois piliers qui valident les hypothèses de recherche.

**1. La consolidation d'un consensus scientifique et technique : un risque avéré, quantifiable et maîtrisable**

En premier lieu, les résultats de ce mémoire confirment de manière irréfutable la solidité du socle de connaissances scientifiques et techniques. La dangerosité du radon et de ses descendants est un fait objectivé par des décennies de recherche, écartant toute controverse majeure qui pourrait justifier l'inaction.

- Un fardeau sanitaire significatif : L'analyse épidémiologique établit que le radon est la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme, et la première chez les non-fumeurs (Masse- p. 140, Pirard- p. 140). Les estimations, basées sur des modèles robustes extrapolés des cohortes de mineurs et corroborés par des études cas-témoins en population générale, chiffrent l'impact à près de 3 000 décès annuels (au moins) en France (Masse- p. 139). Ce bilan, d'un ordre de grandeur comparable à celui des accidents de la route, rend le faible niveau de priorité accordé à ce risque dans le débat public d'autant plus paradoxal.

- Une relation dose-effet sans seuil : Les grandes méta-analyses internationales convergent vers la validation du modèle linéaire sans seuil (LNT), postulant que toute exposition, aussi faible soit-elle, contribue au risque cumulé de cancer (Pirard- p. 84, Masse- p. 84). Ce paradigme scientifique légitime de manière irréfutable les politiques de prévention visant à réduire les niveaux d'exposition au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (principe ALARA).

- La synergie avec le tabagisme : une double réalité de santé publique : L'analyse a mis en exergue la synergie, probablement multiplicative, entre l'exposition au radon et le tabagisme. Ce résultat fondamental objective une double réalité complexe. D'une part, la majorité absolue des décès attribuables au radon survient chez les fumeurs ou anciens fumeurs, en raison de l'incidence beaucoup plus élevée du cancer pulmonaire dans cette population (Masse- p. 139). La lutte contre le radon constitue donc un levier pertinent de la politique anti-tabac. D'autre part, pour les non-fumeurs, le radon représente la principale cause évitable de cancer du poumon, avec un excès de risque relatif potentiellement supérieur à celui des fumeurs à exposition égale (Pirard- p. 84). Le risque radon ne peut donc être subordonné à celui du tabac ; il s'agit d'un cancérigène universel.

- Une maîtrise technique complète : Enfin, la chaîne de gestion technique du risque est achevée. La cartographie de l'aléa permet un ciblage efficace des zones prioritaires (Hystad 2014, p. 4). Les méthodes de mesure, notamment les dosimètres passifs, sont simples, fiables et abordables pour un dépistage à grande échelle. Les solutions de remédiation sont éprouvées et leur efficacité est démontrée, permettant de réduire drastiquement les concentrations les plus élevées à des coûts maîtrisés (Ippolito-2017, p. 7). Il en découle que les causes de l'inaction collective ne sont ni d'ordre épistémologique ni technique, mais doivent être recherchées dans les sphères de l'action publique et de la perception sociale.

**2. Une action publique partielle et incohérente : entre avancées normatives et angles morts stratégiques**

Le deuxième pilier des résultats examine de manière critique la réponse politique et réglementaire. Il en ressort une action publique qui, bien qu'ayant progressé sous l'impulsion européenne (Cinelli-2022, p. 1), demeure incomplète, asymétrique et marquée par des incohérences stratégiques.

- Une réglementation à deux vitesses : Le cadre normatif français se caractérise par une dichotomie profonde. Un dispositif contraignant protège les travailleurs et les usagers de certains Établissements Recevant du Public (ERP) dans les zones à risque. En revanche, l'habitat privé, lieu principal d'exposition chronique, demeure le segment le moins contraint par la réglementation. L'action publique s'y limite à une obligation d'information passive lors des transactions immobilières, transférant l'entière responsabilité de la mesure et de l'action sur le citoyen. Cette approche valide l'hypothèse (H2) d'une réponse politique partielle qui engendre une inégalité de fait face au risque.

- L'incohérence avec la rénovation énergétique : L'analyse a confirmé l'hypothèse (H3) d'un effet paradoxal des politiques de transition énergétique. En promouvant l'étanchéité à l'air des bâtiments sans l'articuler systématiquement avec une gestion maîtrisée de la ventilation et une évaluation du risque radon, ces politiques peuvent involontairement créer des « pièges à radon ». Cette défaillance dans la transversalité des politiques publiques révèle un manque de vision systémique, opposant la santé environnementale et l'efficacité énergétique alors qu'elles devraient être intégrées.

- Un déficit de soutien à l'action individuelle : L'absence de dispositifs d'aide financière structurels pour la mesure et la remédiation dans l'habitat privé constitue un frein majeur. Cette carence érige des barrières socio-économiques à la prévention et génère une inégalité sanitaire environnementale : la protection contre le radon devient dépendante des capacités financières et informationnelles des ménages.

En somme, le cadre d'action publique, par sa nature descendante et administrative, se révèle structurellement inadéquat pour catalyser une dynamique de prévention à l'échelle de l'habitat privé.

**3. Le mur de l'invisible : les freins socio-communicationnels et la faible appropriation du risque**

Enfin, le troisième ensemble de résultats élucide les raisons de la faible perception et appropriation sociétale du risque, validant l'hypothèse (H4) d'un déficit dans les stratégies de communication.

- Les barrières cognitives d'un risque abstrait : Le radon cumule les caractéristiques qui entravent sa prise en compte par le public : son invisibilité sensorielle, son origine naturelle faussement perçue comme un gage d'innocuité, et la longue latence entre l'exposition et ses effets sanitaires. Ces facteurs en font un risque abstrait, non saillant, qui peine à susciter un sentiment d'implication personnelle.

- Une communication institutionnelle nécessaire mais insuffisante : Le discours des agences publiques, essentiel par sa rigueur scientifique, se révèle peu mobilisateur. Centré sur l'expertise, factuel et technique, il informe plus qu'il n'interpelle. En se maintenant dans un registre statistique et prudent, il peine à rendre le risque tangible et à déclencher le passage à l'acte.

- L'efficacité de discours alternatifs incarnés : L'analyse de discours citoyens, tel celui du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/, démontre l'efficacité d'une rhétorique incarnée et engageante. En traduisant le risque statistique en récits personnels et en interpellant la responsabilité de chacun, ces discours créent la connexion émotionnelle nécessaire pour rendre le risque pertinent au niveau individuel. Cette comparaison souligne la nécessité d'un changement de stratégie communicationnelle.

En conclusion, la synthèse des résultats dresse un diagnostic cohérent. Le problème du radon n'est plus une question de recherche fondamentale mais de mise en œuvre politique et sociale. Une combinaison de facteurs – une action publique incomplète délaissant la sphère privée, des politiques sectorielles non intégrées, et une communication inadaptée à la nature invisible du risque – maintient cet enjeu à la marge de la conscience collective et de l'action préventive. C'est cet ensemble de défaillances systémiques qui explique pourquoi 3 000 décès (au moins) évitables par an en France ne suscitent pas encore la mobilisation requise. Les résultats ici synthétisés constituent le fondement sur lequel des recommandations pour un changement de paradigme peuvent être construites.

## 5.3 Implications théoriques et pratiques

1.1 Implications théoriques et pratiques

Les conclusions issues de notre recherche transcendent la simple confirmation scientifique du risque radon. Elles mettent en lumière la nécessité d'un changement de paradigme dans la conception, la gestion et la communication relatives à cet enjeu de santé environnementale. Si la science a objectivé le danger de manière robuste, nos analyses démontrent que la persistance du « paradoxe du radon » — un risque majeur, avéré et maîtrisable qui demeure largement sous-estimé — relève désormais d'une défaillance systémique à l'interface de l'action publique, des stratégies de communication et de la perception sociétale. Les implications de ce constat se déploient sur plusieurs niveaux : théorique, en invitant à repenser la nature du risque ; politique et stratégique, en exigeant une refonte de l'action publique ; et opérationnel, en appelant à des actions concrètes pour traduire la connaissance en protection effective.

**1. Implications théoriques : le déplacement du risque du champ technique vers le champ socio-politique**

La première implication fondamentale de notre travail est d'ordre conceptuel. Elle consiste à acter le déplacement du problème radon du champ quasi exclusif de la radiobiologie et de l'épidémiologie vers celui, plus complexe, des sciences sociales, de la science politique et de l'éthique de la santé publique.

- D'un risque technique à un risque socio-politique : Nos résultats corroborent l'hypothèse d'experts selon laquelle le problème du radon a cessé d'être un enjeu de gestion purement technique (Tymen- p. 19, Pirard- p. 19, Tirmarche-p. 19). La chaîne de maîtrise technique — cartographie, mesure, remédiation — est aujourd'hui complète et fonctionnelle. L'enjeu n'est plus de savoir *quoi faire*, mais *comment susciter l'adhésion et la mise en œuvre* à l'échelle sociétale. Cette transition implique une évolution des outils d'analyse et d'intervention. Dès lors, la recherche ne saurait se limiter à un affinage des estimations quantitatives du risque (Pirard- p. 10) ; elle doit désormais se concentrer sur les freins comportementaux, les arbitrages politiques, les inégalités sociales face au risque et les leviers de l'action collective. Le radon devient ainsi un cas d'étude exemplaire pour analyser la fracture entre la rationalité scientifique et les rationalités sociales et politiques en matière de santé environnementale.

- Le radon comme archétype d'un "risque invisible" et la déconstruction du "naturel" : Notre analyse des freins socio-communicationnels a mis en lumière le poids des biais cognitifs liés à l'invisibilité sensorielle du radon et à son origine naturelle, faussement perçue comme un gage d'innocuité. Une implication théorique majeure réside dans la nécessité de déconstruire la perception du radon comme un « risque naturel » et donc acceptable. Le radon illustre que la dangerosité d'un agent ne dépend pas de son origine mais de ses propriétés intrinsèques et des conditions d'exposition. La problématique n'est pas la présence d'uranium dans la croûte terrestre, mais bien la création de conditions artificielles, notamment l'habitat confiné, qui transforment un aléa diffus en un risque sanitaire concentré. Théoriquement, cela oblige à repenser la dichotomie entre risques naturels et technologiques au profit d'une approche intégrée de l'environnement bâti, conçu comme un écosystème complexe où interagissent des facteurs géologiques, architecturaux et comportementaux.

- L'émergence d'une question de justice environnementale : La mise en évidence d'une « réglementation à deux vitesses » — protectrice pour les travailleurs et usagers de certains ERP, mais permissive pour l'habitat privé — soulève une question fondamentale de justice environnementale et d'éthique en santé publique. En transférant la charge de la preuve et de l'action sur le citoyen pour le lieu principal d'exposition, la puissance publique instaure *de facto* une inégalité. La protection contre un risque involontaire, auquel nul ne consent explicitement (Pirard- p. 11), devient dépendante du capital économique, culturel et informationnel des individus. Cette situation interroge la responsabilité de l'État dans la protection de tous ses citoyens face à un cancérogène certain. L'inertie relative des politiques publiques face à un fardeau de 3 000 décès annuels évitables n'est plus seulement une question de gestion administrative, mais bien une question éthique qui engage la collectivité.

**2. Implications stratégiques et politiques : vers un changement de paradigme de l'action publique**

Les constats de notre étude appellent à une réorientation profonde de la stratégie nationale de gestion du risque radon. L'approche actuelle, parcellaire et descendante, a démontré ses limites. Une nouvelle politique doit être systémique, incitative et proactive.

- Intégrer la gestion du radon dans les politiques du bâtiment et de l'habitat. Une implication stratégique primordiale est de remédier à la dissonance entre les politiques de rénovation énergétique et de santé environnementale. Concrètement, cela suppose de rendre systématique l'évaluation du risque radon avant toute rénovation énergétique bénéficiant d'aides publiques dans les communes en zone à potentiel significatif (zone 3) ou modéré (zone 2). Le diagnostic radon pourrait ainsi devenir un volet de l'audit énergétique dans ces zones. Sur le plan politique, il s'agit de créer des synergies réglementaires et financières. Les aides à la rénovation énergétique devraient être étendues ou bonifiées pour inclure les travaux de remédiation radon, transformant le « piège à radon » potentiel en une opportunité d'assainissement global du bâtiment.

- Rééquilibrer l'action publique vers l'habitat privé par des politiques incitatives. L'approche actuelle, reposant sur l'information passive et la responsabilité individuelle, s'est avérée insuffisante. Il est impératif de catalyser l'action par des leviers économiques. Cela pourrait prendre la forme d'un crédit d'impôt pour la réalisation d'un dépistage et, surtout, pour les travaux de remédiation prescrits par un professionnel agréé. Des pays comme le Canada ou les États-Unis ont développé de tels programmes de soutien qui ont démontré leur efficacité pour stimuler le dépistage (Henderson- 2012, p. 1). Par ailleurs, un renforcement des obligations lors des transactions immobilières est à envisager. Au-delà de l'information sur le zonage, le mesurage pourrait devenir obligatoire avant la vente d'un bien en zone 3, créant un effet démultiplicateur sur le taux de dépistage et la prise de conscience.

- Adopter une posture proactive de santé publique. La stratégie nationale doit évoluer d'une logique de conformité à un seuil réglementaire vers une posture proactive de réduction des expositions, conformément au principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable), scientifiquement fondé sur le modèle linéaire sans seuil (Tymen- p. 122). Cela implique de lancer des campagnes de mesure proactives et subventionnées dans les communes les plus à risque, où les Agences Régionales de Santé (ARS) ou les collectivités pourraient proposer des kits de mesure à très bas coût, à l'image des initiatives canadiennes (Hystad- 2014, p. 4). Sur le plan politique, une réflexion doit s'engager sur l'abaissement progressif du niveau de référence national de 300 Bq/m³, afin de tendre vers la recommandation de l'OMS (100 Bq/m³) comme objectif à long terme, notamment pour les constructions neuves.

**3. Implications opérationnelles et communicationnelles : rendre le risque tangible et l'action accessible**

Au-delà des orientations stratégiques, les résultats de cette étude impliquent une transformation des outils et méthodes visant à accompagner le citoyen vers l'action préventive.

- Refonder la communication publique. Sur le plan opérationnel, la refonte des stratégies de communication constitue un levier essentiel. Le discours institutionnel, factuel et prudent, bien qu'indispensable, s'avère insuffisant pour susciter une mobilisation citoyenne. Il est nécessaire de passer d'une communication statistique à des campagnes incarnées, utilisant des récits de vie et des témoignages pour rendre le risque concret. L'analyse de discours alternatifs, tel celui du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/, démontre la puissance du témoignage pour créer une connexion émotionnelle. La communication doit également être segmentée. Pour les fumeurs, le message doit souligner la synergie qui potentialise leur risque de cancer du poumon (Tymen- p. 122). Pour les non-fumeurs, il doit insister sur le fait que le radon représente leur principale cause évitable de cancer pulmonaire (Pirard- p. 140).

- Mobiliser les relais d'opinion et les professionnels. La diffusion de l'information requiert la mobilisation de relais de confiance. Le développement de modules de formation sur le risque radon devrait être encouragé pour les professionnels du bâtiment (architectes, artisans), de l'immobilier (agents, diagnostiqueurs) et de la santé (médecins généralistes). Leur rôle de conseil et de prescription est déterminant pour normaliser la démarche de dépistage.

- Simplifier le parcours citoyen vers l'action. L'efficacité de toute politique repose sur la simplification du parcours, de la prise de conscience à l'action corrective. La création d'un guichet unique national, de type portail web, centraliserait l'information et les services : vérification du risque communal, commande de kits de mesure agréés, accès à la liste des professionnels certifiés et aux dispositifs d'aide financière. Parallèlement, la promotion de solutions techniques éprouvées et « labellisées » par les autorités rassurerait les particuliers et les professionnels, tout en permettant de mieux maîtriser les coûts et de rendre la décision de remédiation plus acceptable (Tymen- p. 20).

En conclusion, les implications de cette recherche dessinent une feuille de route pour sortir de l'inertie actuelle. Elles démontrent que la réduction du fardeau sanitaire lié au radon en France est possible, à condition d'une volonté politique forte. Il ne s'agit plus de débattre de l'existence du risque, dont la quantification est l'une des plus solides en santé environnementale (Pirard- p. 81, Pirard- p. 10), mais de se donner collectivement les moyens de le maîtriser. Chaque année d'action timide se traduit par des décès qui pourraient être évités. Le véritable risque n'est plus seulement le radon, mais notre incapacité collective à agir face à un danger parfaitement identifié.

## 5.4 Limites de l'étude et pistes pour de futures recherches

1.3 Limites de l'étude et pistes pour de futures recherches

L'intégrité d'une démarche scientifique repose sur la reconnaissance explicite des frontières de ses conclusions. Ce mémoire, conçu comme une méta-analyse qualitative et une revue systématique, n'y déroge pas. Sa robustesse est directement corrélée à la solidité des sources mobilisées, mais il hérite inévitablement de leurs limites et des incertitudes qui persistent dans le champ de la recherche sur le radon. Loin d'invalider les résultats présentés, l'identification de ces limites en délimite la portée et ouvre des perspectives structurantes pour les travaux futurs.

**Limites méthodologiques héritées du corpus existant**

Conformément à l'approche méthodologique adoptée, la principale limite de ce travail est sa nature synthétique. Ne produisant aucune donnée primaire, il est tributaire des biais et incertitudes inhérents au corpus scientifique existant, lesquels peuvent être regroupés en trois catégories.

Premièrement, l'estimation de l'exposition de la population française s'appuie sur des campagnes nationales de mesure dont la méthodologie, bien que rigoureuse, comporte des biais identifiés. Le recours au volontariat est susceptible d'induire un biais de sélection, les ménages résidant dans des habitations perçues comme à risque étant potentiellement surreprésentés, ce qui peut conduire à une surestimation de l'activité volumique moyenne nationale (Masse- p. 133). En outre, la concentration des mesures durant la période de chauffe, où le confinement des bâtiments est maximal, introduit un biais saisonnier qui, malgré l'application de facteurs correctifs, n'est que partiellement neutralisé (Tymen- p. 133).

Deuxièmement, la quantification du risque sanitaire repose sur des modèles épidémiologiques dont la complexité et les limites doivent être soulignées. L'extrapolation des coefficients de risque, établis à partir des cohortes de mineurs d'uranium exposés à des concentrations élevées, à la population générale soumise à une exposition chronique à de plus faibles concentrations, demeure la pierre angulaire des estimations actuelles (Masse- p. 143, Tirmarche- p. 143). Bien que validée par les comités d'experts internationaux, cette démarche est sujette à des incertitudes, notamment sur les facteurs de conversion dosimétrique qui tiennent compte des différences physiologiques et des caractéristiques des aérosols entre l'environnement minier et domestique (Tymen- p. 141). Par ailleurs, les études cas-témoins en population générale, bien que corroborant l'existence d'un risque, manquent souvent de puissance statistique pour le quantifier avec précision aux faibles expositions (Tymen- p. 135). L'estimation rétrospective de l'exposition individuelle sur plusieurs décennies constitue une gageure méthodologique qui tend à atténuer la relation dose-effet et, par conséquent, à potentiellement sous-estimer le risque réel.

Troisièmement, le phénomène de l'« illusion écologique » (*ecological fallacy*) représente un écueil majeur pour les études de corrélation géographique, qui ont parfois produit des résultats contradictoires. En ne pouvant maîtriser les facteurs de confusion à l'échelle individuelle, au premier rang desquels figure le tabagisme, ces études sont inaptes à établir une relation causale fiable (Masse- p. 9). Notre analyse a donc délibérément privilégié les études individuelles (cohortes, cas-témoins), mais il importe de noter que cet écueil a pu alimenter par le passé une fausse perception de controverse scientifique.

**Pistes pour de futures recherches : de la réduction de l'incertitude à l'optimisation de l'action**

Loin de constituer un simple constat des lacunes, l'identification de ces limites permet de définir un programme de recherche cohérent. Si le consensus sur la dangerosité du radon est acquis, la recherche future doit viser d'une part à réduire les incertitudes résiduelles pour affiner les politiques publiques, et d'autre part à explorer les dimensions sociotechniques de la prévention, qui constituent aujourd'hui le principal goulot d'étranglement. Ces pistes de recherche peuvent être articulées selon trois axes complémentaires.

- Axe 1 : Consolidation des modèles épidémiologiques et dosimétriques

L'enjeu n'est plus de prouver le risque, mais de le quantifier avec une précision accrue pour optimiser les stratégies de prévention. - Affiner la caractérisation de la relation dose-effet aux faibles expositions: La poursuite et l'élargissement des études cas-témoins internationales sont nécessaires pour augmenter leur puissance statistique (Tymen- p. 135) et préciser la forme de la courbe de risque aux expositions typiques de l'habitat. - Élucider l'effet du débit de dose : La question de l'équivalence du risque entre une exposition de courte durée à une forte concentration et une exposition prolongée à une faible concentration reste imparfaitement connue (Pirard- p. 73, Pirard- p. 10). Des analyses approfondies, disposant de données individuelles détaillées, sont requises pour modéliser l'influence respective de l'intensité et de la durée de l'exposition (Masse- p. 10). Mieux caractériser la synergie radon-tabac : Le modèle d'interaction, généralement supposé multiplicatif, mériterait d'être précisé.

Une meilleure compréhension de sa nature (multiplicative, sub-multiplicative, additive) affinerait significativement l'estimation du risque, notamment chez les non-fumeurs (Tymen- p. 141). Explorer l'impact de l'exposition durant l'enfance : L'incertitude relative à la radiosensibilité des tissus pulmonaires durant les premières années de la vie demeure importante et justifie des recherches spécifiques, les modèles actuels reposant essentiellement sur des données d'exposition à l'âge adulte (Tymen- p. 140).

- Axe 2 : Recherche en biologie fondamentale et toxicologie

La compréhension des mécanismes moléculaires de la cancérogenèse radio-induite par le radon est fondamentale pour asseoir les modèles de risque sur des bases biologiques robustes. - Identifier les signatures moléculaires du cancer du poumon induit par le radon : Les approches ohmiques pourraient permettre d'identifier des altérations génomiques ou protéomiques spécifiques dans les tumeurs des patients exposés, fournissant une preuve biologique directe et ouvrant potentiellement la voie à des thérapies ciblées. - Étudier la variabilité de la radiosensibilité individuelle : La recherche en radiobiologie doit se poursuivre pour identifier les facteurs génétiques de prédisposition ou de résistance au cancer radio-induit (Pirard- p. 54), afin de mieux comprendre pourquoi, à exposition égale, tous les individus ne développent pas de pathologie.

- Axe 3 : Recherche-action en sciences humaines et sociales et en santé publique

Comme l'a révélé notre analyse, le déficit majeur ne se situe plus tant dans la connaissance du risque que dans sa traduction en actions préventives efficaces à grande échelle. C'est donc dans ce champ que les besoins en recherche sont les plus impérieux. - Évaluer l'efficacité des stratégies de communication : Il est crucial de dépasser la seule communication institutionnelle descendante pour tester et évaluer scientifiquement l'impact de différentes approches : campagnes médiatiques, information par les professionnels de santé, communication de pair à pair ou encore analyse de discours incarnés, tel celui du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/..., dont l'efficacité rhétorique mériterait d'être objectivée. La recherche doit aider à rendre un risque invisible et à long terme

suffisamment saillant pour déclencher le passage à l'acte. - Analyser les leviers et freins socio-économiques à la prévention : Des recherches en économie de la santé et en sociologie sont indispensables pour modéliser l'impact de différents dispositifs incitatifs (crédit d'impôt, subventions) ou coercitifs (obligation lors des transactions) sur les taux de mesure et de remédiation. L'objectif est de concevoir des politiques publiques qui ne créent pas d'inégalité sanitaire environnementale. - Développer des approches intégrées avec la performance énergétique : La tension entre étanchéité à l'air et concentration de radon doit être résolue par une recherche interdisciplinaire.

Des projets pilotes sont nécessaires pour élaborer et valider des référentiels de « rénovation saine et performante », intégrant systématiquement le diagnostic et la gestion du risque radon. - Évaluer l'impact des politiques publiques : L'efficacité de la réglementation actuelle (information acquéreur-locataire, mesures dans les ERP) doit faire l'objet d'une évaluation rigoureuse afin de guider objectivement les futures évolutions normatives, telles qu'un abaissement du niveau d'action ou un renforcement des obligations dans la sphère privée.

En conclusion, si la présente étude s'est appuyée sur un corpus de connaissances scientifiques solide, elle met en lumière un champ de recherche encore vaste. Les incertitudes résiduelles sur les plans épidémiologique et biologique justifient la poursuite d'un effort de recherche fondamentale. Toutefois, l'urgence s'est déplacée : le défi majeur pour les années à venir est de développer une véritable science de l'implémentation, visant à comprendre et à lever les verrous comportementaux, sociaux, économiques et politiques qui freinent la transformation d'un savoir scientifique établi en une politique de prévention efficace et équitable.

# Conclusion

Au terme de cette analyse multidimensionnelle consacrée au radon ($^{222}$Rn), ce chapitre conclusif a pour vocation de synthétiser les principaux enseignements de l'étude, de répondre de manière explicite à la problématique initialement posée et d'esquisser les perspectives d'action. Gaz radioactif naturel dont la dangerosité est scientifiquement établie, le radon constitue un cancérogène pulmonaire avéré (Masse- p. 143), responsable de milliers de décès évitables. Sa maîtrise relève désormais moins de la recherche fondamentale que de la mise en œuvre de politiques publiques efficaces. En effet, l'état actuel des connaissances, consolidé par des décennies d'études épidémiologiques et radiobiologiques, offre un socle particulièrement robuste pour guider l'action préventive (Pirard- p. 81).

La présente conclusion s'articulera de manière logique afin de capitaliser sur l'ensemble du travail accompli. Dans un premier temps, le sous-chapitre « Apports et originalité du travail » explicitera la contribution spécifique de cette recherche, qui a consisté à déplacer l'analyse de l'expertise technique vers une évaluation critique des freins sociopolitiques.

Par la suite, un « Rappel de la problématique et des objectifs » resituera la discussion dans son cadre conceptuel : le paradoxe d'un risque à la fois omniprésent et socialement invisible. Ce rappel constituera le préambule nécessaire à la « Réponse à la question de recherche », qui formera l'axe central de ce chapitre en démontrant comment les stratégies actuelles peuvent être optimisées. Enfin, le sous-chapitre « Ouverture » élargira la réflexion en identifiant les pistes de recherche et d'action qui permettront d'intégrer la gestion du risque radon aux enjeux transversaux de la transition énergétique et de la santé environnementale.

Cette structure a été conçue pour offrir une lecture synthétique et prospective, guidant le lecteur des constats établis vers des recommandations opérationnelles. L'analyse convergera vers la démonstration que la résolution du problème ne réside plus dans l'accumulation de savoirs additionnels, mais dans un changement de paradigme vers une approche intégrée, incitative et communicationnelle. Il s'agit de rendre le risque tangible et l'action désirable, un enjeu dont l'importance est déjà mise en lumière par des initiatives citoyennes qui s'efforcent de donner un visage à ce risque (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/). En définitive, ce chapitre final vise à proposer une feuille de route pour que la connaissance scientifique se traduise enfin en une protection effective de la population face à cette menace sanitaire invisible.

## 6.1 Rappel de la problématique et des objectifs

1.4 Rappel de la problématique et des objectifs

Au terme de cette analyse, un retour sur les fondements de la recherche s'impose. La problématique au cœur de ce mémoire réside dans le paradoxe que constitue le radon ($^{222}Rn$) : un risque sanitaire de premier plan, scientifiquement élucidé, mais qui fait l'objet d'une sous-estimation prégnante au sein du corps social. Gaz radioactif d'origine naturelle, le radon s'accumule dans les espaces clos et représente la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme, et la première chez les non-fumeurs. En dépit d'un fardeau sanitaire estimé à 3 000 décès annuels au moins en France, la perception de ce risque demeure manifestement faible, une situation entretenue par son caractère insidieux – invisible, inodore, insipide – et une association erronée entre naturalité et innocuité.

Le point de départ de ce travail a été le constat d'un clivage persistant entre un corpus de connaissances scientifiques consolidé et un cadre réglementaire de plus en plus affirmé d'une part, et la traduction effective de ces éléments en actions préventives à l'échelle de la population d'autre part. La classification du radon comme agent cancérigène certain (Groupe 1) par le CIRC dès 1988, puis l'impulsion de la directive 2013/59/EURATOM, ont formellement institutionnalisé la gestion de ce risque. Cependant, la mise en œuvre de ces dispositions se heurte à la nature transversale du problème, qui convoque la géologie, la physique des rayonnements, le génie civil et la sociologie du risque. Cette complexité est de surcroît accentuée par un antagonisme avec les politiques de transition énergétique : la recherche d'une étanchéité à l'air optimale des bâtiments, si elle n'est pas assortie d'une ventilation mécanique maîtrisée, peut engendrer un effet paradoxal en aggravant l'accumulation du radon.

Face à cette situation complexe, où les freins socio-économiques et la difficulté à ancrer une culture de la prévention entravent l'action – un enjeu déjà souligné dans des travaux de sensibilisation (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/) –, ce mémoire s'est donné pour objectif principal d'analyser de manière critique et multidimensionnelle les stratégies de gestion du risque radon, afin de formuler des recommandations visant à combler le fossé entre savoir scientifique et application en santé publique.

Pour y parvenir, la démarche s'est articulée autour de cinq objectifs spécifiques :

1. Consolider l'état des connaissances sur les déterminants physiques, géologiques et architecturaux qui régissent l'exposition des populations.

2. Procéder à un examen critique du cadre réglementaire aux échelles internationale, européenne et nationale, afin d'en évaluer la portée opérationnelle et les limites.

3. Analyser les freins sociocognitifs et économiques qui conditionnent l'appropriation du risque par le public et les professionnels.

4. Examiner les synergies et antagonismes entre la gestion du risque radon et les politiques de performance énergétique des bâtiments.

5. Formuler des recommandations opérationnelles pour optimiser les politiques publiques, en vue de dépasser une logique de conformité pour tendre vers une culture de la prévention intégrée et systémique.

C'est à la lumière de cette problématique et de ces objectifs que les conclusions de ce travail ont été élaborées.

## 6.2 Réponse à la question de recherche

6.2 Réponse à la question de recherche

Ce mémoire s'est attaché à déterminer comment les stratégies actuelles de gestion du risque radon peuvent être optimisées pour réduire de manière effective le fardeau sanitaire associé, face au décalage persistant entre la reconnaissance scientifique du risque et sa faible appropriation sociétale. Il ressort de l'analyse que la réponse ne réside pas dans l'attente de nouvelles connaissances fondamentales, mais dans un changement de paradigme stratégique. L'optimisation requiert le dépassement d'une approche majoritairement descendante et réglementaire, au profit d'une politique intégrée, proactive et centrée sur l'accompagnement des citoyens.

La validation de l'hypothèse principale (H1) constitue le fondement de cette réponse : l'efficacité des politiques actuelles est moins entravée par une lacune scientifique ou technique que par leur incapacité à surmonter les barrières socio-économiques et le déficit de perception du risque. La réponse à la question de recherche s'articule donc autour de trois axes d'optimisation complémentaires, qui adressent directement les sous-questions soulevées.

**1. Sur le plan technique et réglementaire : de la contrainte sectorielle à l'intégration systémique**

L'analyse a mis en évidence que le cadre normatif actuel, bien que renforcé par la directive EURATOM 2013/59 (Cinelli-2022, p. 1), révèle une application asymétrique. Il protège de manière contraignante les travailleurs et les usagers de certains établissements, mais l'habitat privé, principal lieu d'exposition, demeure le principal angle mort de l'action publique. L'optimisation impose de combler cette dichotomie.

Premièrement, il est impératif de systématiser la prise en compte du radon dans les politiques connexes, au premier rang desquelles la rénovation énergétique. La confirmation de l'hypothèse (H3) sur l'effet paradoxal de l'étanchéification des bâtiments souligne l'impératif d'une approche transversale. Une stratégie optimisée conditionnerait l'octroi d'aides à la rénovation énergétique à un diagnostic radon préalable dans les zones à risque et à l'intégration de solutions de ventilation maîtrisée.

La mesure du radon peut ainsi être conçue comme un indicateur global de la qualité de l'air intérieur, transformant une contrainte sanitaire en un outil de pilotage pour un habitat sain et performant (Ippolito-2017, p. 2).

Deuxièmement, conformément à l'hypothèse (H2), l'optimisation réglementaire doit mieux intégrer l'hétérogénéité du risque sur le terrain. Si la cartographie nationale est un outil de priorisation essentiel, les études démontrent que des variations significatives existent à l'échelle locale (Gundersen-Wanty-2020, p. 61) et que même des régions à faible potentiel moyen peuvent contenir des habitations à très forte concentration (Hystad- 2014, p. 4). L'optimisation consiste donc à décentraliser une partie de l'action : encourager les collectivités locales à développer des plans territoriaux, former les professionnels du bâtiment aux spécificités du bâti local et rendre le dépistage obligatoire lors de toute transaction immobilière dans les zones à potentiel significatif, au-delà de la simple obligation d'information actuelle.

**2. Sur le plan socio-économique : lever les freins financiers à l'action préventive**

L'analyse a identifié le coût des mesures et des travaux comme une barrière économique majeure pour les particuliers. Le transfert de la responsabilité de l'action vers le citoyen, sans l'accompagner des moyens financiers adéquats, constitue une faille stratégique qui perpétue l'inaction et engendre une inégalité sanitaire environnementale. Une optimisation tangible de la gestion du risque passe par la mise en place d'un soutien financier direct et incitatif. Cela se traduit par la création de dispositifs d'aide dédiés, tels qu'un crédit d'impôt pour la remédiation ou l'élargissement des subventions à la rénovation de l'habitat. Par ailleurs, des campagnes de distribution de kits de mesure gratuits ou subventionnés dans les communes prioritaires, sur le modèle de certaines initiatives internationales, permettraient de massifier le dépistage, étape préalable indispensable à l'action corrective. Sans cet effort public pour abaisser le coût d'entrée, la prévention restera l'apanage des ménages les mieux informés et dotés des plus grandes capacités financières.

**3. Sur le plan communicationnel : transformer un risque abstrait en enjeu concret et mobilisateur**

Cet axe d'optimisation est sans doute le plus crucial. L'hypothèse (H4) a été pleinement validée : la nature invisible, naturelle et chronique du radon constitue un obstacle cognitif majeur. Les stratégies de communication institutionnelles, bien que scientifiquement rigoureuses, peinent à rendre le risque saillant. Les outils d'experts, comme le modèle linéaire sans seuil (Masse- p. 88) ou les tables de risque (Chen-2005, p. 1), s'avèrent peu opérants pour susciter une prise de conscience et un passage à l'acte au sein du grand public. L'optimisation communicationnelle requiert un changement de posture : il faut évoluer d'un discours technique centré sur la menace statistique vers une narration engageante axée sur le bénéfice d'un « habitat sain ». Comme l'illustre l'analyse de discours citoyens alternatifs (http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/), la communication doit s'incarner, se localiser et responsabiliser positivement. Il s'agit de traduire les « becquerels par mètre cube » en un enjeu tangible de qualité de vie, de protection familiale et de valorisation patrimoniale, en s'appuyant sur des relais de confiance locaux pour donner un visage à ce risque invisible.

En définitive, la réponse à la question de recherche est sans équivoque : l'optimisation des stratégies de gestion du risque radon ne dépend plus d'avancées scientifiques, mais d'une volonté politique d'opérer une refonte systémique de l'action publique.

Cette stratégie optimisée doit être intégrée, en articulant la santé environnementale avec la transition énergétique ; incitative, en soutenant financièrement les citoyens dans leurs démarches ; et incarnée, en adaptant sa communication pour rendre le risque perceptible et l'action désirable.

C'est en actionnant simultanément ces trois leviers que la société pourra enfin aligner son niveau de mobilisation sur la gravité d'un enjeu sanitaire qui cause, chaque année, des milliers de décès évitables.

## 6.3 Ouverture

1.2 Ouverture

Au terme de cette analyse, il apparaît que si le socle des connaissances scientifiques sur le radon est désormais robuste, les perspectives d'action et de recherche demeurent considérables. Le défi n'est plus tant de nature épistémologique que de gouvernance et d'implémentation. L'avenir de la gestion de ce risque invisible réside ainsi à l'intersection des politiques de santé publique, de la transition écologique (si c'est encore possible) et des sciences sociales.

La dynamique initiée par la directive 2013/59/EURATOM a jeté les bases d'une approche harmonisée, mais l'hétérogénéité persistante des plans d'action nationaux appelle à une convergence renforcée. Une perspective future cruciale consiste à améliorer la comparabilité des enquêtes, non seulement sur les protocoles de mesure, mais également sur la conception des études et le traitement statistique des données, afin d'optimiser les stratégies de radioprotection à l'échelle continentale (Cinelli-2022, p. 1). Une telle coopération s'avère indispensable pour la mutualisation des bonnes pratiques et l'évaluation rigoureuse de l'efficacité des politiques publiques.

À l'échelle nationale, l'enjeu est de dépasser une approche sectorielle pour intégrer la problématique du radon à des enjeux sociétaux transversaux. La tension apparente entre l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et la maîtrise de la concentration en radon doit être résolue et transformée en une opportunité de développement de solutions intégrées.

Dans cette optique, le suivi en continu du radon pourrait évoluer vers un indicateur fonctionnel de la qualité de l'air intérieur, permettant de piloter des systèmes de ventilation optimisant simultanément la protection sanitaire et l'efficience énergétique (Ippolito-2017, p. 2).

Enfin, le principal verrou à la prévention est désormais d'ordre humain et social. Le défi ne consiste plus seulement à gérer un risque, mais à construire une véritable culture du risque partagée (Pirard- p. 19). Ceci ouvre un vaste champ d'investigation pour les sciences humaines et sociales, afin d'identifier et de surmonter les freins comportementaux et socio-économiques à la prévention.

L'évaluation de l'efficacité des stratégies de communication, l'analyse de l'impact des dispositifs incitatifs et la mise en place d'une gouvernance décentralisée et crédible (Pirard- p. 20) constituent des axes de recherche prioritaires. L'objectif ultime est de catalyser la transition d'une connaissance experte vers une appropriation citoyenne et professionnelle, faisant de la gestion du radon une composante intégrée de la santé environnementale et de l'habitat « durable. »

## 6.4 Apports et originalité du travail

1.1 Apports et originalité du travail

Le présent mémoire s'inscrit dans un champ de recherche où le consensus scientifique sur la dangerosité du radon est particulièrement robuste. L'apport principal de cette étude ne réside donc pas dans la production de nouvelles données épidémiologiques, mais dans l'analyse systémique et la mise en perspective de l'écart substantiel entre la solidité des connaissances scientifiques et la faiblesse de leur application en actions concrètes de santé publique. L'originalité de notre démarche consiste à déplacer le centre de gravité de la problématique : d'un enjeu technique et radio toxicologique, vers un enjeu éminemment socio-politique, communicationnel et éthique.

Le premier apport de cette recherche est la conceptualisation et l'analyse approfondie du « paradoxe du radon ». Alors que le lien de causalité entre l'exposition domestique au radon et le cancer du poumon est l'un des mieux documentés en santé environnementale, bénéficiant notamment d'études sur des cohortes de mineurs d'une précision rare pour l'estimation des risques (Pirard- p. 10, Professionnelles- p. 3), ce risque demeure sous-estimé et constitue une priorité secondaire des politiques publiques. Notre travail s'est attaché à déconstruire les mécanismes de cette inertie en identifiant trois freins systémiques :

1. Le biais cognitif du "risque naturel" : Nous mettons en lumière comment la perception du radon comme un phénomène géologique naturel, par opposition à une pollution d'origine industrielle, tend à atténuer la perception du danger et à diluer la responsabilité des acteurs publics. L'analyse démontre que si l'origine du gaz est naturelle, le risque sanitaire est, quant à lui, anthropique, car il résulte directement de la conception et de l'occupation d'espaces confinés.

2. La dissonance des politiques publiques : Une contribution majeure de ce mémoire est d'avoir mis en évidence l'angle mort que constitue l'interaction entre les politiques de rénovation énergétique et la gestion du risque radon.

En encourageant l'étanchéification des bâtiments sans y associer systématiquement un diagnostic et une ventilation adéquate, les politiques actuelles peuvent involontairement transformer des habitations en « pièges à radon », un effet pervers documenté par plusieurs études sur la dynamique du gaz en milieu clos (Ippolito-2017, p. 2).

3. L'iniquité environnementale institutionnalisée : L'originalité de notre approche est d'avoir analysé la gestion différenciée du risque (réglementation stricte pour certains lieux de travail et établissements recevant du public, versus information passive et responsabilité individuelle pour l'habitat privé) comme une question de justice environnementale.

Nous soutenons que cette « réglementation à deux vitesses » instaure une inégalité de protection face à un cancérogène certain, rendant la sécurité des citoyens dépendante de leur capital économique et informationnel.

Le deuxième apport de ce travail est de nature synthétique et prospective. Au-delà du constat, nous avons élaboré une feuille de route intégrée pour une action publique renouvelée. L'originalité de cette proposition tient à son caractère holistique, articulant des leviers complémentaires souvent considérés isolément : * Sur le plan stratégique, nous avons formalisé la nécessité de passer d'une logique d'information passive à une politique active d'incitation.

En s'inspirant de modèles étrangers ayant démontré leur efficacité, notamment au Canada (Chen-2005, p. 1, Hystad- 2014, p. 1), nous préconisons la mise en place de mécanismes concrets tels qu'un crédit d'impôt, des aides couplées à la rénovation énergétique ou un diagnostic obligatoire lors des transactions immobilières en zones à risque. * Sur le plan communicationnel, notre analyse a dépassé la critique des campagnes institutionnelles pour proposer une refonte paradigmatique.

L’originalité est d’avoir mis en évidence, à travers l’exemple du blog http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/,

L’efficacité potentielle d’une communication incarnée, basée sur le témoignage, pour transformer une donnée statistique abstraite en un risque perçu et mobilisateur. * Sur le plan opérationnel, nous avons souligné l’importance de simplifier le parcours citoyen, de la prise de conscience à l’action corrective, en proposant un modèle de « guichet unique » et en insistant sur la formation des professionnels du bâtiment et de la santé comme relais essentiels de confiance.

Enfin, l’originalité de ce mémoire réside dans son positionnement interdisciplinaire. Il vise à établir un pont entre la recherche fondamentale en radioprotection, qui produit des modèles de risque de plus en plus sophistiqués (Professionnelles Situation de Co-expositions- p. 3), et la sphère de la décision publique, qui peine à s’emparer pleinement du sujet.

En synthétisant des données issues de disciplines variées (géologie (Gundersen-Wanty-2020, p. 61), physique du bâtiment, épidémiologie, sociologie du risque et science politique), ce travail offre une lecture transversale et active du problème.

Le principal défi n’est plus d’affiner la quantification du risque, mais de construire les conditions sociales, politiques et économiques de sa maîtrise effective, éclairant ainsi les facteurs contribuant aux lacunes actuelles en matière de santé publique et traçant des voies pragmatiques pour y remédier.

# Bibliographie

Chen, J. (2005). Canadian individual risks of radon-induced lung cancer for different exposure profiles. Canadian Journal of Public Health, 96, 360–363.

Andriampanarivo, L., Ramanamahefa, H. J., Ralaivelo, M. A. L., Rabesiranana, N., Ratovonjanahary, F. A. J., Randrianarivony, E. (n.d.). Évaluation de la concentration du radon à l'intérieur des bâtiments dans différents sites de la ville d'Antananarivo.

Zinsou, M. B., Idjiwole, F., Rabesiranana, N., Dossou, J., Mensah, G. A., Medenou, D. (2023). Techniques de mesure de l'exposition naturelle due au radon : synthèse bibliographique. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), 33(3).

Henderson, S., Kosatsky, T., Barn, P. (2012). How to ensure that national radon survey results are useful for public health practice. Canadian Journal of Public Health, 103, 231–234.

Robé, M.-C. (n.d.). Étude et traitement des situations impliquant du radon. IRSN-Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Tymen, G. (n.d.). Présentation du radon. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 23).

Pirard, P. (n.d.). Expositions et estimation du risque en France. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 127).

Laurier, D. (n.d.). Les avancées de la connaissance épidémiologique sur les faibles doses.

Koffi, J. (n.d.). Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles. Unpublished manuscript.

Tymen, G. (n.d.). Présentation du radon. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 23).

Masse, R. (n.d.). Cancérogenèse et rayonnements ionisants : remise en question d'idées reçues et importance des découvertes récentes en radiobiologie. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 35).

Pinti, D. L., Larocque, M., Barnetche, D., Retailleau, S., Moritz, A., Hélie, J.-F., Lefebvre, R. (2013). Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent : volet géochimie. INRS, Centre Eau Terre Environnement.

Tirmarche, M. (n.d.). Épidémiologie du risque radon en France. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 71).

Ippolito, R., Lepore, L., Remetti, R. (2017). Considerations on reduction of indoor air pollution from radioactive emissions from building materials and the ground. WIT Transactions on Ecology and the Environment.

Masse, R. (n.d.). Cancérogenèse et rayonnements ionisants : remise en question d'idées reçues et importance des découvertes récentes en radiobiologie. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 35).

Koffi, J. (n.d.). Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles. Unpublished manuscript.

Bonnefous, Y. C., Gadgil, A. J., Allard, F. (1992). Comparison, with the aid of a numerical tool, of the effectiveness of active soil ventilation systems which limit the penetration of radon into a dwelling: Comparaison à l'aide d'un outil numérique de l'efficacité des systèmes de ventilation active du sol.

Pirard, P. (n.d.). Expositions et estimation du risque en France. In Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque (p. 127).

Masse, R. (n.d.). Le radon, aspects historiques et perception du risque.

Verger, P., Hubert, Ph., Bard, D. (1998). L'évaluation des effets des faibles doses de rayonnements ionisants : apports de l'épidémiologie. Revue de l'ACOMEN, 4(4).

Situation de Co-expositions professionnelles. (n.d.). Estimation d'un risque de cancer radio-induit en situation de Co-expositions professionnelles : Cas des mineurs d'uranium français. [Unveröffentlichtes Manuskript].

Robé, M.-C. (n.d.). Étude et traitement des situations impliquant du radon. IRSN-Institut de Radiopro.

Hystad, P., Brauer, M., Demers, P., Johnson, K., Setton, E., Cervantes-Larios, A., Poplawski, K., McFarlane, A., Whitehead, A., Nicol, A. (2014). Geographic variation in radon and associated lung cancer risk in Canada. Canadian Journal of Public Health, 105, e4–e10.

Kulka, U., Birschwilks, M., Février, L., Madas, B., Salomaa, S., Froňka, A., Perko, T., Wojcik, A., Železnik, N. (2022). RadoNorm – towards effective radiation protection based on improved scientific evidence and social considerations – focus on radon and NORM. EPJ Nuclear Sciences Technologies.

Masse, R. (n.d.). Le radon, aspects historiques et perception du risque. Unpublished manuscript.

Cinelli, G., Bochicchio, F., Bossew, P., Carpentieri, C., de Cort, M., Gruber, V., Leonardi, F., Tollefsen, T., Trevisi, R. (2022). Similarities and differences between radon surveys across Europe : Results from MetroRADON questionnaire. Journal of the European Radon Association.

Gundersen, L., Wanty, R. (2020). Field studies of radon in rocks, soils, and water.

Palermi, S., Pasculli, A. (2008, May). Radon mapping in Abruzzo, Italy. In Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards, Québec City, Canada.

López-Pérez, M., Hernández, F., Díaz, J. P., Salazar-Carballo, P. A. (2022). Determination of the indoor radon concentration in schools of Tenerife (Canary Islands): A comparative study. Air Quality, Atmosphere, Health, 15, 825–835.

Estimation d'un risque de cancer radio-induit en situation de co-expositions professionnelles : cas des mineurs d'uranium français. (n.d.).

Silva, A. S., Dinis, M. L. (2021). Characterization of radioactivity in thermal springs and the implementation of the European Directive 2013/59/Euratom. In Book of Abstracts.

Pinti, D. L., et al. (2013). Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent : Volet géochimie [Technical report].

Chiaberto, E., Falletti, P., Magnoni, M. (2022). Radon mapping in Piedmont (North-West Italy) : A radio-geo-lithological approach. Journal of the European Radon Association.

# Bibliographie complète – Format APA (7e édition)

*(Basée sur le mémoire : « Le gaz radioactif Radon en France et dans le Monde : un problème majeur de santé publique »)*

## A

Andriampanarivo, L., Ramanamahefa, H. J., Ralaivelo, M. A. L., Rabesiranana, N., Ratovonjanahary, F. A. J., & Randrianarivony, E. (n.d.). *Évaluation de la concentration du radon à l'intérieur des bâtiments dans différents sites de la ville d'Antananarivo.*

## B

Bonnefous, Y. C., Gadgil, A. J., & Allard, F. (1992). *Comparison, with the aid of a numerical tool, of the effectiveness of active soil ventilation systems which limit the penetration of radon into a dwelling.*

## C

Chen, J. (2005). Canadian individual risks of radon-induced lung cancer for different exposure profiles. *Canadian Journal of Public Health, 96*, 360–363.

Chiaberto, E., Falletti, P., & Magnoni, M. (2022). Radon mapping in Piedmont (North-West Italy): A radio-geo-lithological approach. *Journal of the European Radon Association.*

Cinelli, G., Bochicchio, F., Bossew, P., Carpentieri, C., de Cort, M., Gruber, V., Leonardi, F., Tollefsen, T., & Trevisi, R. (2022). Similarities and differences between radon surveys across Europe: Results from MetroRADON questionnaire. *Journal of the European Radon Association.*

## G

Gundersen, L., & Wanty, R. (2020). *Field studies of radon in rocks, soils, and water.*

## H

Henderson, S., Kosatsky, T., & Barn, P. (2012). How to ensure that national radon survey results are useful for public health practice. *Canadian Journal of Public Health, 103*, 231–234.

Hystad, P., Brauer, M., Demers, P., Johnson, K., Setton, E., Cervantes-Larios, A., Poplawski, K., McFarlane, A., Whitehead, A., & Nicol, A. (2014). Geographic variation in radon and associated lung cancer risk in Canada. *Canadian Journal of Public Health, 105*, e4–e10.

## I

Ippolito, R., Lepore, L., & Remetti, R. (2017). Considerations on reduction of indoor air pollution from radioactive emissions from building materials and the ground. *WIT Transactions on Ecology and the Environment.*

## K

Koffi, J. (n.d.). *Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles.* (Manuscrit non publié)

Kulka, U., Birschwilks, M., Février, L., Madas, B., Salomaa, S., Froňka, A., Perko, T., Wojcik, A., & Železnik, N. (2022). RadoNorm – Towards effective radiation protection based on improved scientific evidence and social considerations – Focus on radon and NORM. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies.*

## L

Laurier, D. (n.d.). *Les avancées de la connaissance épidémiologique sur les faibles doses.*

López-Pérez, M., Hernández, F., Díaz, J. P., & Salazar-Carballo, P. A. (2022). Determination of indoor radon concentration in schools of Tenerife (Canary Islands): A comparative study. *Air Quality, Atmosphere & Health, 15*, 825–835.

## M

Masse, R. (n.d.). *Le radon, aspects historiques et perception du risque.* (Manuscrit non publié)

Masse, R. (n.d.). *Cancérogenèse et rayonnements ionisants : Remise en question d'idées reçues et importance des découvertes récentes en radiobiologie.* In *Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque* (p. 35).

## P

Palermi, S., & Pasculli, A. (2008, mai). Radon mapping in Abruzzo, Italy. In *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards*, Québec, Canada.

Pinti, D. L., Larocque, M., Barnetche, D., Retailleau, S., Moritz, A., Hélie, J.-F., & Lefebvre, R. (2013). *Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent : volet géochimie* (Rapport technique). INRS, Centre Eau Terre Environnement.

Pirard, P. (n.d.). Expositions et estimation du risque en France. In *Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque* (p. 127).

## R

Robé, M.-C. (n.d.). *Étude et traitement des situations impliquant du radon*. IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.

## S

Silva, A. S., & Dinis, M. L. (2021). Characterization of radioactivity in thermal springs and the implementation of the European Directive 2013/59/Euratom. In *Book of Abstracts*.

Situation de Co-expositions professionnelles. (n.d.). *Estimation d'un risque de cancer radio-induit en situation de co-expositions professionnelles : Cas des mineurs d'uranium français.* (Manuscrit non publié)

## T

Tirmarche, M. (n.d.). *Épidémiologie du risque radon en France.* In *Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque* (p. 71).

Tymen, G. (n.d.). *Présentation du radon.* In *Exposition au radon dans les habitations : évaluation et gestion du risque* (p. 23).

## Z

Zinsou, M. B., Idjiwole, F., Rabesiranana, N., Dossou, J., Mensah, G. A., & Medenou, D. (2023). Techniques de mesure de l'exposition naturelle due au radon : synthèse bibliographique. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), 33*(3).

Liens directs pour un copier-coller ou ctrl + clic des références bibliographiques de ce mémoire :

file:///C:/Users/User/Downloads/48058313.pdf

https://www.sfsp.fr/images/docs/lire_et_ecrire/la_collection_sante_societe/sfsp_sante_societe_8.pdf#page=128

https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR17/AIR17020FU1.pdf

https://sfsp.fr/images/docs/lire_et_ecrire/la_collection_sante_societe/sfsp_sante_societe_8.pdf#page=36

https://www.epj-n.org/articles/epjn/pdf/2022/01/epjn220026.pdf

https://pubs.usgs.gov/bul/1971/report.pdf

https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC6973591&blobtype=pdf

file:///C:/Users/User/Downloads/7605-Article%20Text-56504-1-10-20220305.pdf

https://www.american-ajiras.com/Laza-Ref.4-ajira080920.pdf

https://publications-chercheurs.inrab.bj/uploads/fichiers/recents/2ee4e03af073913ef87394486a83bf5e.pdf

https://unsenric.force-ouvriere.org/IMG/pdf/tude_verger.pdf

https://www.radon-france.com/wp-content/uploads/2017/10/revue-controle-ASN-RADON-1.pdf

https://espace.inrs.ca/id/eprint/2111/1/R001503.pdf

https://www.sfsp.fr/images/docs/lire_et_ecrire/la_collection_sante_societe/sfsp_sante_societe_8.pdf#page=128

https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_6256.pdf

https://www.radon-france.com/wp-content/uploads/2017/10/revue-controle-ASN-RADON-4.pdf

https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC6972071&blobtype=pdf

https://www.artaabruzzo.it/download/pubblicazioni/20150115_radon_mapping_abruzzo_canada_2008.pdf

https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC6975594&blobtype=pdf

https://theses.hal.science/file/index/docid/433348/filename/These_J_Koffi.pdf

https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11869-022-01186-z.pdf

https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2022/01/ANCELET_S_T3.pdf

https://publications-chercheurs.inrab.bj/uploads/fichiers/recents/2ee4e03af073913ef87394486a83bf5e.pdf

https://www.artaabruzzo.it/download/pubblicazioni/20150115_radon_mapping_abruzzo_canada_2008.pdf

https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2021/11/201506-TUT-Laurier-D.pdf

https://www.rad-conference.org//RAD_2021_Book_of_Abstracts.pdf#page=317

http://lesoufflecestmavie.unblog.fr/2016/12/09/gaz-radioactif-radon-en-france-un-probleme-majeur-de-sante-publique-thierry-lamireaulesoufflecestmavie-unblog-fr/

Que ce travail reste un humble témoignage, une contribution modeste à l'information et à la réflexion.

« Méfions-nous de ceux qui *aujourd'hui* se présentent en gestionnaires rigoureux pour *demain* alors que nous devons faire face à leur catastrophique imprévoyance d'*hier*. »
Thierry LAMIREAU / conférence de presse à Limoges
(Haute-Vienne / France) en 1993.

Document terminé le 8 décembre 2025.

Travail réalisé par Thierry LAMIREAU
Réalisateur du film « Uranium en Limousin »
Enseignant à la retraite
Ancien producteur / animateur pigiste à l'Atelier de Création Radiophonique
(France Culture)