

Propositions pour la mise en place et le renforcement d'activités de surveillance des expositions et des risques associés à l'inhalation du **RADON**



Préambule

L'exposition au radon se fait par deux voies : l'inhalation du radon dans l'air et l'ingestion du radon dans l'eau. Ce rapport traite exclusivement de l'exposition par inhalation. Il formule les propositions relatives à la mise en place et au développement d'un réseau d'informations permettant de caractériser les expositions au radon par inhalation et les risques associés. Il a été établi à la demande de la Direction générale de la santé et s'adresse à cette Direction et à la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection. Ces propositions ont été élaborées par un groupe de travail coordonné et animé par l'InVS et réunissant : Le Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM), L'Ecole nationale de santé publique (ENSP), le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), la Direction générale de la santé (DGS), puis la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR), un représentant des Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (Ddass 87), le Département de protection de l'homme et de dosimétrie (DPHD) et le Département de protection de l'environnement (DPRE) de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), l'Institut de veille sanitaire (InVS), et la Direction de prévention des pollutions et des risques (DPPR) du ministère de l'Ecologie et du Développement durable (MEDD).

Coordonnateur du groupe de travail

Philippe PIRARD - Institut de veille sanitaire – Département santé environnement (InVS-DSE)

Participants au groupe de travail

Roseline AMEON - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – Département de protection de l'environnement (IRSN-DPRE)

Didier BONIJOLY - Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Christian COCHET - Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Daniel DRYSENNE - ministère de l'Ecologie et du Développement durable - Direction de la protection et de la prévention des risques (MEDD-DPPR)

Didier GAY - ministère de l'Ecologie et du Développement durable - Direction de la protection et de la prévention des risques (MEDD-DPPR)

Philippe GLORENNEC - Ecole nationale de santé publique (ENSP)

Philippe HUBERT - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Géraldine IELSCH - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'environnement (IRSN-DPRE)

Michel JOUAN - Institut de veille sanitaire (InVS)

Jean JAOUEN - ministère de l'Emploi et de la Solidarité - Direction départementale des affaires sanitaires et sociales 87 (Ddass 87)

Martine LEDRANS - Institut de veille sanitaire - Responsable du Département santé environnement (InVS-DSE)

Marie-Christine ROBE - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'environnement (IRSN-DPRE)

Christelle ROUGY - Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR)

Margot TIRMARCHE - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'homme et de dosimétrie (IRSN-DPHD)

Synthèse des propositions

Le radon 222 est une des principales sources d'exposition aux rayonnements ionisants de la population générale du fait qu'il s'accumule dans l'atmosphère des bâtiments où la population passe en moyenne 90 % de son temps. C'est un cancérogène pulmonaire avéré et le deuxième facteur de risque connu de cancer du poumon après le tabac en terme d'impact en population générale. Or, ce risque peut être diminué en réduisant les niveaux de radon dans les bâtiments par l'adoption de mesures techniques désormais disponibles pour le neuf et l'existant. Ces arguments justifient la mise en place d'une politique de gestion basée sur des caractérisations objectives des expositions et des risques associés.

La mise en place d'une politique de gestion de ce risque en France, initiée par la DGS et continuée par la DGSNR est à la source d'une production importante d'informations sur le radon. Il est nécessaire aujourd'hui de mieux les structurer afin qu'elles puissent être partagées par l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion de ce risque en France.

En réponse à ces préoccupations, à la demande de la DGS puis de la DGSNR, l'InVS a constitué et animé un groupe de travail réunissant les organismes impliqués dans le domaine des mesures des niveaux de radon et des risques associés. Ce groupe a eu pour mission de faire le bilan de ce qui se fait dans ce domaine puis de proposer des recommandations pour la mise en place d'un système de surveillance des expositions au radon et des risques associés.

Le groupe de travail recommande la constitution d'un système de surveillance qui devra répondre aux objectifs suivants :

- Connaître et suivre l'évolution des expositions au radon et des risques associés afin de permettre :
 - de quantifier et surveiller l'impact sanitaire en France et selon les régions ;
 - d'identifier les populations cibles prioritaires en termes de risques liés au radon (en matière d'exposition et/ou de niveau de risque de cancer du poumon) ;
 - d'orienter les politiques de santé publique quant au radon ;
 - de faciliter la réalisation des études épidémiologiques.
- Pouvoir détecter l'apparition d'un nouveau facteur pouvant modifier les expositions au radon ou l'impact associé afin d'adapter les recherches ou les mesures de surveillance et de gestion des risques.
- Suivre spécifiquement l'efficacité des mesures de gestion des risques.

Pour atteindre ces objectifs, le groupe de travail considère qu'il faut renforcer les actions existantes en :

- complétant les mesures de radon existantes par des mesures de qualité ;
- mettant en place un système de centralisation et de suivi des informations ;
- poursuivant les recherches ;
- facilitant le partage d'une veille scientifique et technique partagée ;
- renforçant les compétences sur le terrain.

1. Compléter les mesures de radon existantes par des mesures de qualité

Afin de compléter l'information existante, le groupe de travail recommande que :

- des mesures complémentaires de radon soient effectuées dans les bâtiments français pour mieux caractériser la distribution des expositions ;
- priorité soit donnée aux bâtiments résidentiels qui concernent 70 % du budget temps des français ;
- soit fait le point des méthodologies et des informations disponibles pour identifier les zones à fort potentiel radon afin d'optimiser les réalisations des mesures.

Afin de renforcer la qualité de l'information apportée par les mesures, il recommande que :

- soit rendu obligatoire l'application des normes AFNOR pour la mesure du radon ;
- les mesures soient géocodées ;
- des mesures visant à caractériser la distribution du radon dans les bâtiments soient réalisées régulièrement pour tenir compte des évolutions.

2. Mettre en place un système de centralisation et de suivi des informations

L'objectif à terme est d'obtenir un système d'information et de suivi multidisciplinaire et permanent.

Pour cela, le groupe de travail recommande que les organismes qui sont en charge du recueil des mesures du radon veillent à assurer la centralisation et l'informatisation des données.

Pour mener à bien cette centralisation et permettre la valorisation de ces données, il recommande que :

- soient analysées les conditions juridiques de recueil de l'information produite, de sa centralisation et de son informatisation d'une part, de propriété des informations et de leur mise à disposition de tiers d'autre part ;
- soit créé un comité technique inter-organismes ayant pour mission la mise en cohérence des informations apportées par les différentes bases de données ;
- soit constitué un comité directeur chargé de définir les règles et objectifs de partage de l'information.

Enfin, afin d'orienter et de suivre les politiques publiques, le groupe de travail recommande :

- de définir des indicateurs pertinents permettant de mesurer l'atteinte des objectifs des politiques publiques et d'en intégrer une partie dans les bases de données.

3. Poursuivre les recherches scientifiques

Les connaissances actuelles sont suffisantes pour justifier la mise en place d'actions pour gérer le risque lié à l'exposition domestique au radon. Cependant, il est important de poursuivre les recherches sur le radon afin d'apporter des connaissances pour améliorer la prévention du risque radon (adaptation de la surveillance et des mesures de gestion).

Aussi, le groupe de travail recommande :

- un ciblage des recherches sur les effets des expositions au radon durant l'enfance ;
- le lancement de recherches sur des sensibilités particulières de certaines populations aux effets des rayonnements alpha et sur les moyens de les identifier ;
- la réalisation de recherches poussées pour mieux connaître les formes de l'interaction entre le tabac et le radon ;
- l'intégration d'estimations des expositions cumulées au radon lors de la réalisation des futures études épidémiologiques sur les relations entre cancer du poumon et facteurs de risque ;
- la poursuite des recherches en évaluation des risques pour affiner les méthodes pour caractériser les risques au niveau régional ou local ;
- la poursuite des recherches pour identifier et définir les zones prioritaires quant au mesurage ;
- le renforcement des recherches sur l'influence des caractéristiques du bâtiment sur les niveaux de radon ;
- le lancement de recherches appliquées sur la perception des risques, les attitudes et les comportements adoptés par les différents acteurs à l'égard du radon et de sa gestion.

4. Assurer et partager une veille scientifique et technique

Une bonne connaissance de l'avancement de la recherche scientifique et de l'expertise technique est un des éléments indispensables pour permettre aux experts de la surveillance de sélectionner et structurer les outils nécessaires, de motiver les acteurs du système pour le recueil des informations pertinentes, et d'apporter une information utile aux différents acteurs de la gestion des risques.

Pour répondre à cet objectif, le groupe de travail propose :

- que les différents organismes étudient les modalités de mise en commun des différentes activités de veille scientifique de façon à pouvoir les mettre à disposition de ceux qui en ont besoin ;
- un outil qui serait la parution régulière, chaque fois sur un thème différent sélectionné par un comité scientifique et d'experts, d'une synthèse critique des publications concernant les recherches sur les expositions au radon, ses effets sur la santé ou les déterminants de la gestion de ce risque.

5. Renforcer les compétences sur le terrain, la formation et l'information des acteurs

Les campagnes de mesure du radon, comme les travaux de réduction des niveaux de radon entrepris nécessitent la mise à contribution de différentes compétences provenant de différents organismes et d'acteurs locaux.

Pour sensibiliser les différents acteurs au risque radon, le groupe de travail recommande :

- la tenue de séminaires de sensibilisation locaux ;
- l'apport d'une information adaptée aux populations cibles ;
- l'apport d'une information rendue accessible aux acteurs soit sous une forme synthétique, soit sous une forme permettant la réalisation d'analyses locales.

Pour former les acteurs sur les risques liés au radon, son mesurage, sa gestion et sa surveillance, le groupe de travail propose :

- la poursuite des actions déjà lancées dans ce sens par l'IRSN, la DGS, l'InVS, ou l'ENSP, de manière renforcée et élargie à d'autres partenaires ;
- la réalisation d'un guide méthodologique pour la caractérisation des risques au niveau local pour permettre de mieux maîtriser les méthodes employées, présenter l'intérêt et les limites des résultats ainsi que l'accès aux sources d'informations complémentaires nécessaires.

La mise en œuvre de ces actions repose sur une coordination et sur une cohérence des travaux des différents organismes qui seront impliqués dans la réalisation des actions proposées et qui sont concernés par la radioprotection ou la santé publique. Elle suppose que les moyens financiers et humains nécessaires à l'atteinte de ces objectifs soient dégagés.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Etat des connaissances sur les problèmes de santé publique liés au radon dans l'air	15
2.1. Relations entre l'exposition cumulée au radon et les effets sur la santé.....	15
2.1.1. Les études épidémiologiques, bases de l'information sur les risques liés au radon.....	15
2.1.2. Les facteurs modifiant la relation.....	16
2.1.3. Conclusion : une base d'informations scientifiques suffisante pour justifier l'action	18
2.2. Estimation de l'exposition.....	18
2.2.1. Budgets espace-temps.....	18
2.2.2. Mesure des niveaux de radon.....	19
2.2.2.1. Mesurage du radon.....	19
2.2.2.2. L'estimation des niveaux de radon dans les bâtiments d'une zone	19
2.2.2.3. Connaissance de la distribution du radon dans les bâtiments résidentiels	20
2.2.2.4. Connaissances de la distribution du radon dans les bâtiments abritant des locaux à usage professionnel	21
2.2.2.5. Connaissances de la distribution du radon dans les bâtiments abritant des lieux ouverts au public.....	21
2.2.3. Identification des populations plus exposées au radon	21
2.2.3.1. Identification des populations de travailleurs exposés	22
2.2.3.2. Identification des bâtiments présentant des niveaux élevés de radon	22
2.2.3.3. Identification et cartographie des zones à potentiel élevé d'exhalation du radon à la surface des sols	23
2.3. Caractérisation de l'impact des expositions au radon	25
3. Objectifs d'un système de surveillance des expositions au radon et des risques associés.....	27
3.1 Justification des objectifs.....	27
3.2 Les objectifs du système.....	27
4. Plan d'actions pour la mise en place du système de surveillance.....	29
4.1. Renforcer les mesures d'exposition au radon.....	29
4.1.1. Bâtiments résidentiels.....	29
4.1.2. Locaux à usage professionnel.....	29
4.1.3. Lieux ouverts au public.....	29
4.1.4. Définir des populations prioritaires pour le mesurage du radon	30

4.1.5. Obtenir des mesures interprétables et représentatives des concentrations d'une pièce	30
4.1.6. Des campagnes de mesure des concentrations représentatives et comparables....	30
4.2. Mettre en place un système d'information et de suivi	31
4.2.1. Mise en place d'un réseau de bases de données sur les expositions au radon	31
4.2.2. Faciliter le recours à l'information complémentaire pour caractériser les expositions au radon et le risque associé	31
4.2.3. Faciliter le recours à l'information complémentaire pour définir des zones à potentiel radon	32
4.2.4. Suivi des politiques de gestion du risque lié aux expositions au radon.....	32
4.3. Continuer les recherches scientifiques	32
4.3.1. Sur les relations entre expositions au radon et effets	33
4.3.2. Sur l'évaluation des risques en France et dans les régions.....	33
4.3.3. Sur l'identification de critères de fort potentiel radon dans les zones ou les bâtiments	34
4.3.4. Sur la perception des risques et les comportements à l'égard du risque radon	34
4.4. Partager la veille scientifique et technique	34
4.5. Renforcer les compétences sur le terrain, la formation et l'information des acteurs	35
4.5.1. Renforcer l'information des acteurs.....	35
4.5.2. Renforcer la formation des acteurs locaux sur la gestion du « risque » radon.....	35
4.5.3. Transférer les connaissances pour la caractérisation des risques liés au radon auprès des acteurs de santé publique régionaux	35
5. Conclusion	37
6. Références bibliographiques	39
7. Définition des sigles utilisés	43
8. Glossaire.....	45
9. Annexes	47

1. Introduction

Le radon 222 est un gaz radioactif, d'origine naturelle essentiellement tellurique. Il peut s'accumuler dans l'atmosphère plus confinée des bâtiments où la population passe en moyenne 90 % de son temps (70 % du temps est passé au domicile). Ceci en fait une des principales sources d'exposition aux rayonnements ionisants de la population générale en terme de contribution à la dose annuelle. Les résultats des expérimentations animales et surtout des études épidémiologiques chez l'homme montrent que le danger est celui du cancer du poumon. L'application des relations exposition-effet issues du suivi des cohortes de mineurs à l'estimation des expositions domestiques au radon¹ en France, en fait l'un des principaux facteurs de risques de ce cancer après le tabac (environ 13 % des décès par cancer du poumon seraient attribuables au radon dans les logements (64;68)). Or, ce risque peut être diminué en réduisant les niveaux de radon dans les bâtiments par l'adoption de mesures techniques désormais disponibles tant pour les constructions neuves que pour les bâtiments existants. Le radon est donc dans le domaine des rayonnements ionisants un des principaux problèmes de santé publique et, de ce fait, une priorité d'action. Il justifie la mise en place d'une politique de gestion qui peut dans ce domaine précis bénéficier des caractérisations objectives des expositions et des risques.

La Direction générale de la santé d'abord, puis la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection mènent en France une politique de gestion du risque radon. Plusieurs circulaires (19;20) (cf. annexe II) définissent les actions des services déconcentrés de l'Etat à l'égard du radon dans les établissements recevant du public, demandant notamment le mesurage exhaustif de ce gaz dans ce type de bâtiment pour 31 départements. Sur la base de l'ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001, le décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 (1;62) (cf. annexe II) impose dans ces départements que les responsables de certains lieux ouverts au public² réalisent des mesures de radon et fassent mettre en oeuvre des actions immédiates pour abaisser l'exposition des personnes à ce gaz, en cas de mesure dépassant le niveau de 400 Bq.m⁻³. Parallèlement à la mise en place de cette politique, un certain nombre d'actions ont été entreprises ; signalons à ce propos, le lancement de campagnes régionales de sensibilisation ou de mesures du radon dans les bâtiments résidentiels, complétées par la caractérisation correspondante des risques. Le résultat de ces initiatives a pour conséquence d'accroître notablement l'information disponible sur le radon. L'enjeu est d'harmoniser et d'accompagner la production et la centralisation de ces informations afin de les rendre utiles pour orienter et suivre les actions de gestion des risques.

Le ministère chargé de la Santé (DGS) a proposé à l'Institut de veille sanitaire, d'animer une réflexion à ce sujet (cf. lettre du 12 mars 2001 en annexe I). Menée en concertation avec les organismes impliqués dans la mesure des expositions au radon et la recherche sur les effets associés, les objectifs de cette réflexion consistaient, après avoir fait le bilan des connaissances et des actions déjà entreprises, à définir les recommandations destinées à :

- mieux cerner les expositions au radon de la population générale et des enfants dans les bâtiments, de façon à pouvoir procéder à des évaluations des risques en population générale,
- développer, si nécessaire, de nouvelles recherches concernant les effets sur la santé liés à une exposition au radon,
- réaliser des évaluations du risque à l'échelle de populations ciblées.

¹ Exposition au radon lors de la fréquentation des logements.

² Les catégories de lieux ouverts au public concernés par les obligations de mesures du radon sont les établissements d'enseignement, les établissements sanitaires et sociaux qui hébergent des personnes, les établissements thermaux, les établissements pénitentiaires.

2. Etat des connaissances sur les problèmes de santé publique liés au radon dans l'air

2.1. Relations entre l'exposition cumulée au radon et les effets sur la santé

2.1.1. Les études épidémiologiques, bases de l'information sur les risques liés au radon

Le suivi des cohortes de mineurs d'uranium

L'essentiel de l'information sur les risques pour la santé de l'homme liés aux expositions au radon proviennent des études épidémiologiques portant sur le suivi de cohortes de mineurs (12;53). Ces études présentent plusieurs avantages. Elles permettent de renseigner sur les risques liés à des expositions chroniques à ce gaz sur plusieurs années. Pour estimer les risques liés au radon, leurs résultats sont donc plus fiables que l'extrapolation des relations trouvées à Hiroshima-Nagasaki qui résultent d'une exposition flash de quelques secondes et concernent une irradiation du corps entier de nature différente (83). Les mineurs étudiés proviennent de pays différents. Enfin, ils ont tous une reconstitution de leur exposition individuelle aux descendants du radon, que ce soient des mineurs d'uranium, de fer ou d'étain.

Ces études mettent toutes en évidence l'effet cancérigène du radon pour le poumon qui augmente linéairement avec les niveaux d'exposition cumulée à ce gaz. Aucun autre effet n'a été associé au radon de façon significative et reproductible malgré la durée du suivi, la taille de la cohorte, la qualité des mesures des effets et des expositions. Ces études ont donc permis de clairement identifier le cancer du poumon comme le principal danger, lié à l'exposition à ce gaz.

C'est sur la base de ces résultats, confirmés par les expérimentations animales, que le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé le radon comme cancérigène pulmonaire certain (38).

Ce sont aussi ces études qui servent de base pour la proposition de modèles de calcul de la relation exposition cumulée au radon et risque de cancer du poumon (10;12;13) (cf. annexe III pour détails) proposées par les comités d'experts (Académie des sciences des Etats-Unis (BEIR IV, BEIR VI), Commission internationale de protection radiologique (CIPR 65)).

Une analyse conjointe de onze cohortes de mineurs (12;53), dont celle des mineurs français, coordonnée par l'IRSN, permet d'estimer l'influence de différents cofacteurs : âge, débit de dose, délai depuis l'exposition, et fait apparaître un effet synergique sub-multiplicatif entre radon et tabac. Cette analyse permet aussi de confirmer l'existence d'une relation dose-effet pour un sous-groupe de mineurs exposés à de faibles expositions cumulées comparables à des situations d'exposition domestique au radon rencontrées fréquemment (54) (groupe exposé à moins de 50 WLM³). En France, le suivi des mineurs d'uranium français continue (75). Il porte sur une population de 5 000 mineurs exposés à des doses cumulées de 36 WLM. Au niveau européen, un effort a été fait pour réunir l'ensemble des données tchèques, allemandes et françaises, afin d'apporter une estimation plus précise du risque de cancer du poumon chez des mineurs faiblement exposés. Près de 20 000 mineurs font partie de cette analyse conjointe coordonnée par l'IRSN. Ces données apportent une puissance suffisante pour confirmer les relations trouvées à ces niveaux et débits de dose. Une première analyse sur les données tchèques et françaises sera soumise à publication courant 2003.

³ Ces personnes sont exposées en moyenne à 20 WLM pendant 4,5 ans. Ceci correspond à habiter pendant la même période de temps dans une habitation ayant des niveaux annuels de radon de 900 Bq.m⁻³ ou pendant 25 ans dans une habitation ayant des niveaux de radon annuels de 200 Bq.m⁻³.

Les études cas-témoin

Les études épidémiologiques se sont également orientées vers les expositions domestiques au radon de la population générale. Les résultats des premières études cas-témoins étaient globalement concordants avec ceux des cohortes de mineurs bien que la majorité des études ne soient pas statistiquement significatives (52). Ceci tient essentiellement aux imprécisions des mesures d'exposition et à la taille insuffisante des populations incluses dans les premières études qui ne permettent pas de discerner l'excès de risque de cancer du poumon attendu compte tenu des niveaux de radon mesurés. Afin de circonscrire ces limites, plusieurs initiatives ont eu lieu.

Une méta-analyse faite en 1997 sur 8 études épidémiologiques cas-témoin, aboutit à une relation significative entre expositions domestiques au radon et risque de cancer du poumon compatible avec la relation observée chez les mineurs (52).

De nouvelles études cas-témoins ont été lancées. Fortes du retour d'expérience des premières études, leurs efforts ont porté sur la qualité de l'estimation de l'exposition cumulée au radon (3;16;24-28). Les premiers résultats de ces nouvelles études plaident plus nettement qu'auparavant en faveur de l'augmentation d'un risque de cancer du poumon quand l'exposition au radon augmente (3;16;28). Ainsi, dans ces études, une augmentation de l'exposition au radon dans un logement de 100 Bq.m⁻³ augmente le risque relatif de cancer du poumon de l'ordre de 9 %. C'est une exposition cumulée sur les 30 années précédant la maladie qui est considérée pour cette analyse de l'augmentation du risque. Certaines études incluent des fumeurs et non fumeurs, d'autres études ont étudié plus spécifiquement les cancers du poumon chez les non fumeurs (49). Des techniques de mesure différentes de l'exposition cumulée sont également à l'étude ; l'ensemble de ces données récentes va vers une confirmation du risque de cancer du poumon lié au radon dans les bâtiments.

Les études cas-témoin sont aujourd'hui multi-centriques et leur protocole a été conçu pour une analyse conjointe internationale. On travaille alors sur près de 10 000 cas de cancer du poumon et 10 000 témoins, ce qui devrait permettre de décrire plus spécifiquement le risque pour les hommes, les femmes, les fumeurs et les non fumeurs. L'IRSN a lancé une étude regroupant 600 cas et 1 200 témoins ; les résultats de cette étude sont actuellement soumis à publication dans un journal international ; ils confirment une augmentation du risque de cancer du poumon en fonction du radon dans le logement ; cette augmentation n'est démontrée qu'après une prise en compte de l'ensemble des facteurs décrivant le tabagisme au niveau individuel.

Des études cas-témoin, leucémie et exposition au radon ont aussi été effectuées. Elles ne permettent pas de dégager une association significative entre ce risque et l'exposition cumulée au radon (51).

Les études de corrélation géographique

On considère généralement que les résultats des études de corrélation géographique radon/cancer, faites sur la base d'indicateurs agrégés au niveau de groupes ne sont pas cohérentes avec les études épidémiologiques basées sur les informations individuelles. Ils montrent en effet d'une part, parfois une corrélation négative entre exposition au radon et cancer du poumon, et d'autre part souvent une association positive entre leucémie et radon dans les logements.

Plusieurs analyses, basées sur des simulations (34) ou des données nationales (14;50;67) montrent que la relation observée entre le radon et le cancer du poumon sur la base de données agrégées, souffre de biais importants et non contrôlables, notamment dus à l'influence majeure du tabagisme. Les études de corrélation géographique entre radon et leucémie ne tiennent pas suffisamment compte de facteurs confondants comme le niveau socio-économique, mais présentent en plus des biais de mesure d'exposition, et négligent une exposition concomitante, celle due aux rayonnements gamma d'origine tellurique qui contribue au moins autant que le radon à la dose à la moelle (51).

Les résultats de ces études ne sont donc pas utiles pour discuter de l'ordre de grandeur d'un risque lié à l'exposition aux niveaux de radon rencontrés dans les bâtiments.

2.1.2. Les facteurs modifiant la relation

Niveau et débit de dose

Si les résultats des études épidémiologiques plus récents apportent un faisceau d'arguments en faveur de la cancérogénicité des expositions au radon à des niveaux et des débits fréquemment rencontrés dans les logements (l'équivalent de quelques centaines de Bq.m⁻³), ils ne peuvent être informatifs pour les expositions les plus courantes qui sont de quelques dizaines de Bq.m⁻³. Pour quantifier le risque en population générale, il est nécessaire de se poser la question de l'existence d'une relation sans seuil et

de la linéarité. En l'absence de preuve expérimentale, il existe toujours une discussion d'experts sur l'existence ou l'absence d'effet seuil (81). Selon le BEIR VI, il existe cependant une base théorique en faveur de l'absence d'effet seuil dans le domaine de l'exposition au radon et du risque de cancer pulmonaire (effet des particules alpha sur l'ADN, origine monoclonale possible de la cancérogénèse, effet by-stander) (cf. annexe III). Les résultats de certaines études expérimentales ont montré un effet mutagène des rayonnements alpha sur les cellules pour une exposition très faible (de l'ordre d'un rayon durant la vie de celles-ci) (59). De tels travaux demandent cependant à être confirmés et précisés. Pour permettre le plus efficacement possible la transcription de ces connaissances dans le domaine de l'évaluation quantitative des risques et de la radioprotection liées aux expositions domestiques au radon, la mise en commun des savoir faire de différentes disciplines (modélisateurs, expérimentateurs, biologistes, épidémiologistes) est importante. Dans le cadre d'un projet de collaboration européen coordonné par l'IRSN, une équipe pluridisciplinaire vise à analyser et synthétiser les informations apportées par les résultats des expérimentations animales, les informations apportées par les études de cohortes sur les mineurs, et les connaissances sur les mécanismes de cancérogénèse sous-jacents.

Caractéristiques intrinsèques des populations

La question est souvent posée d'une relation exposition-risque différente selon les caractéristiques de la population. En effet, les études de cohortes de mineurs ne concernent que les hommes. Les dernières études cas-témoin incluant uniquement des femmes (3;28), aboutissent à des estimations d'impacts du radon comparables à ceux calculés sur la base de l'extrapolation des relations observées chez les mineurs.

La même question se pose au sujet des conséquences des expositions subies durant l'enfance. Du fait des difficultés méthodologiques inhérentes à l'étude de l'effet d'une exposition dans l'enfance sur un risque influencé par de nombreuses autres expositions et qui se manifeste surtout plusieurs dizaines d'années après, il existe très peu d'information permettant de se positionner (cf. annexe III). Les informations épidémiologiques actuellement disponibles ne sont pas en faveur de l'hypothèse d'une relation plus forte liée aux expositions dans l'enfance. On n'observe en effet pas d'augmentation du risque chez les mineurs chinois exposés au radon en début d'adolescence (7), et par ailleurs les résultats épidémiologiques sont en faveur d'une diminution de l'effet du radon avec le temps depuis l'exposition (12).

On a mis en évidence, chez un certain nombre de personnes porteuses de maladies rares d'origine génétique, un risque accru de cancer lié aux expositions aux radiations (2). Ceci suggère que des sous-groupes de la population, pourraient être plus sensibles aux effets cancérogènes des rayonnements. Cette approche est étudiée dans le cadre d'une collaboration européenne mais n'apporte à ce stade aucun élément conclusif.

Interactions avec les cofacteurs environnementaux

Le cancer du poumon est une pathologie d'origine multi-factorielle pour laquelle plusieurs facteurs de risques sont connus (tabac, amiante, différentes poussières d'origine minérale) ou soupçonnés (exposition à la pollution atmosphérique urbaine) (12). En cas d'interaction synergique entre le radon et les autres carcinogènes pulmonaires, l'impact du premier peut être plus important pour une personne exposée aux deux facteurs de risque. Ainsi, les relations observées entre l'exposition cumulée au radon et le risque de cancer du poumon chez les mineurs pourraient être influencées par les expositions concomitantes au tabagisme, aux fumées de diesel, aux rayonnements gamma, à la silice et aux autres poussières (80). La prolongation du suivi de la cohorte des mineurs d'uranium français devrait à terme apporter une puissance suffisante pour estimer la part de l'exposition au rayonnement gamma et/ou aux poussières d'uranium dans l'étude de la relation dose totale au poumon et risque de cancer. Le tabac facteur cancérogène ayant une action 100 fois supérieure à celui du radon aux niveaux d'exposition habituellement rencontrés, peut en fait agir de façon synergique avec ce dernier (12). Chez le fumeur, la probabilité de décéder du cancer du poumon en dehors de l'exposition au radon est d'un ordre de grandeur supérieure à celle du non-fumeur. Ainsi, pour un même excès de risque relatif de décès par cancer du poumon lié à l'exposition au radon, l'impact du radon sur la probabilité de développer un cancer du poumon sera bien plus fort chez le fumeur que chez le non fumeur. A contrario, les gains sanitaires d'une action de réduction du radon seront proportionnellement plus importants chez les fumeurs que chez les non fumeurs. C'est pourquoi, il est important d'un point de vue de santé publique de bien connaître la forme de l'interaction entre radon et tabac et d'agir sur l'ensemble des deux facteurs de risque. Les études cas-témoins, nichées à l'intérieur des cohortes des mineurs d'uranium ont pour but de mieux estimer cette interaction ; de même l'analyse conjointe des 10 000 cas de cancer de poumon en Europe devrait tester la forme de cette interaction.

Il n'existe actuellement pas d'information sur les interactions existant entre radon et autres agents physiques carcinogènes pulmonaires. Pourtant, la proportion de la population générale ayant été exposée à ces facteurs de risques est non négligeable. On estime par exemple que 25 % des français de sexe masculin auront été exposés au cours de leur vie professionnelle à l'amiante (32). D'autres agents physiques peuvent être fréquemment rencontrés au cours de la vie professionnelle comme le nickel, le cadmium, le chrome, la silice, les H.A.P., les fumées de diesel... Ainsi, une bonne proportion des populations masculines serait plus à risque de développer un cancer du poumon lié au radon s'il existe une interaction potentialisante avec ces autres agents carcinogènes.

Certaines études observent une augmentation des cancers du poumon du fait d'habiter des communes urbaines plutôt que des communes rurales (11;33;46;66;67). Ceci résulte probablement d'expositions plus importantes ou fréquentes à différents facteurs de risque (tabagisme, facteurs de risque professionnels, pollution urbaine...) pour la population urbaine (33;46;69;73). Comme il y a probablement interaction entre les facteurs de risque de cancer du poumon existants en milieu urbain et le radon, à niveau égal de radon, l'impact sera probablement plus important en ville.

2.1.3. Conclusion : une base d'informations scientifiques suffisante pour justifier l'action

En conclusion, l'état actuel des connaissances épidémiologiques sur les effets du radon permet d'aboutir aux conclusions ci-après.

- Le danger lié à l'exposition au radon est sans contestation possible le **cancer du poumon**. Aucun lien n'est établi à ce jour entre l'exposition au radon et d'autres pathologies cancéreuses, même si théoriquement l'irradiation d'autres organes est possible à des doses plus faibles (12;15;51;74). Si relation il y a, ce risque devrait être très probablement beaucoup plus faible que le risque de cancer du poumon.
- Les connaissances épidémiologiques actuelles sont suffisantes pour décider d'une politique de réduction des expositions au radon dans les bâtiments.
- Cette politique de gestion du risque radon sera affinée sur la base des caractérisations objectives des risques afin d'orienter les actions prioritaires et de les optimiser. C'est pourquoi, il est important que soient renforcées les connaissances sur la distribution des expositions au radon dans les bâtiments et sur la relation exposition au radon et risque de cancer. Cette politique bénéficiera également de meilleures connaissances sur les interactions entre facteurs modifiant la relation entre radon et cancer du poumon.

2.2. Estimation de l'exposition

La connaissance de l'exposition au radon dans la population est un élément essentiel de la définition et de l'orientation des politiques de gestion des risques. Selon les objectifs, cette connaissance devra être plus ou moins précise.

La première étape consiste à estimer l'importance du risque dans une population ou sur une zone. Pour cela, une bonne estimation de la moyenne de l'exposition cumulée au radon de la population est suffisante. Mais la définition de valeurs de radon guidant les stratégies d'intervention (ex. niveaux de référence de 200, 400, 1000 Bq.m⁻³) entraîne un besoin de connaître beaucoup plus finement la distribution du radon afin de pouvoir identifier la proportion de bâtiments dépassant ces valeurs et définir des zones prioritaires de dépistage et d'action.

L'estimation de l'exposition, suppose une bonne connaissance de la répartition du temps moyen de fréquentation des lieux par la population et de la distribution des niveaux moyens de radon présents dans ces lieux.

2.2.1. Budgets espace-temps

A l'échelon national (31;35), on estime que 90,3 % du temps moyen d'un français est passé dans un bâtiment quelconque et 72,5 % à domicile. Le budget temps des français apparaît remarquablement stable suivant les régions (31) et varie peu selon les tranches d'âge ou les catégories socio-professionnelles. Pour les adultes actifs, environ 20 % du temps est passé sur le lieu de travail qui est la plupart du temps un bâtiment.

A l'intérieur des bâtiments, le temps d'occupation est un facteur déterminant de la sélection d'une pièce. Dans un logement privé, le temps passé dans la chambre représente 30 % du temps total, puis vient ensuite la pièce à vivre (salon ou cuisine selon les logements). Les enfants passent une partie importante de leur temps à l'école. Sur la base du calendrier et des horaires scolaires, on estime qu'en moyenne les enfants d'une école primaire passent 723 heures par an dans leur classe (5h/jour ouvrable) soit 8,2 % de leur budget temps annuel, et 101 heures par an au réfectoire (45 minutes de repas par jour) soit 1,2 % de leur budget temps annuel (21).

Quantifier le risque dans une région nécessite de connaître la moyenne de l'exposition cumulée au radon de la population sur plusieurs années. Cette estimation n'est qu'imparfaitement approchée par les résultats d'une campagne de mesure ponctuelle qui ne permet pas de prendre en compte l'évolution des niveaux de radon moyens dans les bâtiments d'une région au fil de l'évolution architecturale, ni la mobilité des populations d'une zone à l'autre (l'INSEE estime que chaque année 2 % de la population d'un département se renouvelle).

2.2.2. Mesure des niveaux de radon

L'activité volumique du radon dans tout bâtiment varie considérablement en fonction de sa localisation géographique, de sa structure architecturale, de son mode d'occupation, et des conditions météorologiques existantes (56). Tous ces facteurs sont à prendre en compte, dans la mesure du possible, pour le choix des stratégies de mesurage ou d'estimation de la distribution des niveaux de radon dans les bâtiments d'une zone.

2.2.2.1. Mesurage du radon

Les niveaux de radon mesurés varient considérablement dans la journée du fait des variations de conditions de ventilation induites entre autre par le comportement des occupants. Une bonne partie de cette variation est liée au mode d'occupation du bâtiment. Ainsi, le radon a tendance à s'accumuler dans l'atmosphère confinée et non renouvelée des bâtiments fermés et non occupés. Il peut de même être aspiré du sol vers l'intérieur de l'édifice par la chaleur produite par le chauffage quand la température extérieure est basse. Cette variation diminue avec l'allongement du temps de mesure des dosimètres : semaines, mois (56). Mais il persiste une variation saisonnière des niveaux de radon dans les bâtiments (83;84). L'unité temporelle de base pour quantifier le risque étant l'année, des corrections sont nécessaires pour obtenir des estimations des activités moyennes volumiques annuelles de radon.

L'essentiel des mesures provient de résultats de dosimètres intégrés « passifs » ouverts qui estiment les niveaux de radon à partir de l'énergie alpha des descendants recueillis sur le film. Pour tenir compte du déséquilibre permanent dans une pièce occupée entre le radon et ses descendants, on introduit un coefficient appelé facteur d'équilibre qui varie entre 0 et 1. L'UNSCEAR (82) estime que la plupart des valeurs du facteur d'équilibre dans les logements sont dans un intervalle de 30 % au dessus ou au dessous de la valeur de 0,4. Il n'existe pas en France d'enquête permettant d'estimer ce facteur d'équilibre moyen dans les lieux ouverts au public ou les locaux à usage professionnel. A noter l'existence de dosimètres fermés pour lesquels cette estimation du facteur d'équilibre est inutile.

2.2.2.2. L'estimation des niveaux de radon dans les bâtiments d'une zone

Il est difficile de définir la forme de la loi de distribution présidant aux niveaux de radon dans les bâtiments d'une zone, compte tenu du grand nombre de déterminants de ceux-ci. Dans ces conditions, beaucoup de mesures de radon sont nécessaires pour connaître cette distribution et il est difficile d'en apprécier le nombre minimum. Par contre, si l'on connaît la forme de la loi de distribution sous jacente des niveaux de radon, l'estimation du nombre minimum de mesures nécessaires peut être déduite selon le paramètre de la distribution et le niveau de précision que l'on vise⁴. Beaucoup d'auteurs s'accordent à dire que quand l'on maîtrise les principaux déterminants des niveaux de radon dans une zone, la distribution suit une loi log-normale (55;57;67). Ces déterminants sont souvent les caractéristiques géologiques et les types des bâtiments résidentiels (collectif/individuel) (57;67). Dans ces conditions, l'établissement de sondages par tirage au sort, stratifiés sur la base de ces facteurs, paraît pertinent. L'enjeu est donc d'identifier les principaux d'entre eux, et de disposer de l'information sur leur distribution, sur le territoire, afin d'optimiser les campagnes de mesure (cf. chapitres suivants). Dans

⁴ Il faudra par exemple beaucoup moins de mesures pour estimer une moyenne ou une médiane que pour estimer la proportion de valeurs les plus élevées.

l'attente de ces informations, le plan de sélection des points de mesures doit surtout tenir compte de la densité de la population et reposer sur un tirage au sort. L'UNSCEAR propose de tirer au sort en moyenne une mesure pour 1 500 bâtiments résidentiels pour une estimation correcte de la distribution du radon dans un pays (82).

En outre, les niveaux moyens de radon évoluent avec le temps en fonction des modifications des caractéristiques architecturales (plus d'isolation, plus de constructions récentes, moins de sols en terre battue...) et de la dégradation des bâtiments.

Pour apprécier l'état des informations sur la distribution du radon dans l'atmosphère intérieure en France, trois sortes de bâtiments peuvent être différenciés en fonction des modes de fréquentation qu'entraînent leur usage : les bâtiments résidentiels, les bâtiments abritant des locaux à usage professionnel, les bâtiments abritant des lieux ouverts au public⁵.

2.2.2.3. Connaissance de la distribution du radon dans les bâtiments résidentiels

Les informations proviennent actuellement essentiellement de l'échantillon national de 13 000 mesures issu des résultats de la campagne DGS-IRSN (30). A cet échantillon, s'ajoutent les informations portant sur environ 2 000 mesures faites dans le cadre des études cas-témoin et les mesures effectuées dans le cadre d'un autre projet de recherche (39). Ces derniers jeux de données ne sont cependant pas utilisés pour estimer la distribution du radon dans les bâtiments résidentiels. L'ensemble de ces mesures fait progressivement l'objet d'un géo-référencement, en fonction de l'adresse.

Pour ce qui est de l'échantillon de la campagne DGS-IRSN, les mesures ont été faites en faisant appel au volontariat et l'échantillon des mesures privilégie les bâtiments résidentiels et les périodes a priori « à risque » (bâtiment résidentiel individuel, rez-de-chaussée, mesures en hiver). Le bâtiment résidentiel collectif y est très insuffisamment représenté. Les mesures effectuées sont faites durant une saison donnée pour chaque département. Enfin, le nombre de mesures disponibles selon les régions ne correspond pas à la densité des bâtiments résidentiels. Il s'agit donc de redresser les données de l'échantillon national de mesures pour tendre vers une distribution représentative de la réalité (67).

Sur l'échantillon, des variations nettes des niveaux moyens de radon sont associées au caractère collectif ou individuel du bâtiment, à la date de construction du bâtiment (avant /après 1948), au niveau de la pièce mesurée, au type de matériau des murs de la construction, et au fait que le lieu où la mesure a été effectuée est concerné par un sol granitique ou non. Compte tenu du protocole utilisé, il n'est pas possible de mettre en évidence un effet saison. Certaines variations observées paraissent stables selon les régions ou les dates des campagnes de mesure (catégorie de bâtiment résidentiel, niveau de la pièce mesurée) (67). Compte tenu de ces résultats et sur la base des informations apportées :

- par l'Insee et l'IRSN pour les caractéristiques des bâtiments résidentiels collectifs ou individuels, nombre d'étages moyen par type de bâtiment) (43) ;
- par l'Insee pour la densité des logements en France ;
- par le NRPB (84), l'UNSCEAR (83) et l'analyse de l'enquête cas-témoin « radon/cancer du poumon » française pour l'effet saison.

l'IRSN propose actuellement un redressement de l'échantillon brut national sur une valeur annuelle de radon basée sur la saison et le type de bâtiment résidentiel.

Sur la base du jeu de 13 000 mesures fourni par l'IRSN et de ces redressements, on estime ainsi que l'exposition domestique moyenne au radon serait en France de 68 Bq.m⁻³ et en Bretagne de 100 Bq.m⁻³ (30;68). Il est cependant important de souligner que les informations permettant les estimations des corrections ne sont pas issues d'un échantillon tiré au sort. De plus, l'ensemble des variables descriptives des caractéristiques des bâtiments et de la géologie disponibles ne permet pas d'expliquer plus de 50 % de la variabilité observée. Il n'est donc pas possible d'affirmer que les redressements effectués soient tout à fait justes, même si compte tenu du nombre et de la répartition des mesures apportées par l'échantillon, la probabilité d'obtenir une moyenne proche de la moyenne réelle est forte. Il est par contre beaucoup plus difficile d'estimer la proportion de logements dépassant les valeurs les plus élevées de radon (> 200 Bq.m⁻³, > 400 Bq.m⁻³, > 1000 Bq.m⁻³).

A l'échelle régionale et départementale, il est parfois plus difficile de considérer que la moyenne obtenue est bien représentative de la moyenne annuelle réelle. Néanmoins, les 140 mesures par département en moyenne permettent de les classer presque tous quant au potentiel radon. Pour certains départements, les mesures existantes devraient être complétées pour remplir cet objectif avec une bonne fiabilité (Alpes-Maritimes, Calvados, Vosges, Hérault, Manche, Pyrénées-Orientales).

⁵ Lieux ouverts au public : nouvelle dénomination pour établissement recevant du public.

Pour estimer les distributions de radon dans les logements, l'Angleterre s'est basée sur un échantillon de 2 500 mesures parmi les logements principaux (84) et la Norvège, sur un échantillon de 7 500 mesures, mais ces échantillons sont représentatifs car issus de mesures tirées au sort (77).

2.2.2.4. Connaissances de la distribution du radon dans les bâtiments abritant des locaux à usage professionnel

Il n'existe actuellement pas de campagne de mesure permettant d'estimer régionalement ou au niveau national la distribution du radon dans les locaux à usage professionnel qui concernent pourtant près de 20 % du temps d'exposition de la population active. Une telle situation risque de changer, compte tenu des exigences de l'article R. 231-115 du Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003. Ce décret, relatif à l'exposition des travailleurs exposés à l'activité du radon et de ses descendants en raison de la situation de leur lieu de travail, demande que le chef d'établissement procède à des mesures de cette activité (63).

2.2.2.5 Connaissances de la distribution du radon dans les bâtiments abritant des lieux ouverts au public

Les mesures réalisées dans les lieux ouverts au public (établissements recevant du public) proviennent de la campagne de dépistage initiée par le ministère chargé de la Santé (DGS) en 1999 (circulaire du 27 janvier 1999) (19). Dans les départements prioritaires, les mesures de radon doivent être effectuées dans tous les lieux ouverts au public en commençant par les établissements d'enseignements et les établissements sanitaires et sociaux. La circulaire DGS n°2001-303 du 2 juillet 2001 a également prescrit des mesures dans les établissements thermaux (61). Pour les départements non prioritaires, ces mesures systématiques devaient être entreprises sur seulement des parties du département déterminées au préalable par une étude géologique. Toutes les mesures réalisées devaient être accompagnées d'un questionnaire permettant l'interprétation des résultats.

Selon les résultats disponibles en novembre 2001 (DGSNR campagne 1999-2001 de mesures du radon dans les établissements recevant du public - bilan novembre 2001), le nombre d'établissements contrôlés s'élevait à 13 099 et celui des mesures à 36 415 ; soit en moyenne 2,5 mesures par établissement. Parmi ces mesures, 12 % dépassaient les 400 Bq.m⁻³ et 4 % les 1 000 Bq.m⁻³. Des mesures avaient été effectuées dans 46 départements dont tous les départements dits « prioritaires » pour la campagne de mesure dans les lieux ouverts au public.

La Haute Vienne a effectué un dépistage systématique de l'ensemble des écoles et collèges, puis de l'ensemble des lycées et produit une première analyse des données. La moyenne générale des mesures réalisées dans les classes est du même ordre de grandeur que la moyenne obtenue dans le bâtiment résidentiel individuel (200 Bq.m⁻³). Mais il convient de prendre ces résultats avec précaution, compte tenu du fait que les dosimètres passifs utilisés intègrent la mesure du radon sur des nycthémers entiers, dans des salles qui ne sont occupées que quelques heures. Il est donc très probable que ces résultats surestiment les niveaux réels de radon auxquels les enfants sont exposés. Les résultats de cette campagne montrent par ailleurs que la variabilité d'une salle à l'autre au sein d'un établissement est très importante (60).

Des milliers de mesures ont été effectuées dans les établissements d'enseignement de Bretagne et de la région Rhône-Alpes. A priori, elles sont exhaustives pour les établissements scolaires publics et bien renseignées quant aux conditions de mesure.

Une base de données est en cours de constitution (DGS/DGSNR) pour rendre l'ensemble de ces résultats disponibles au niveau national. Il s'agira dans un deuxième temps d'analyser l'ensemble de ces 36 000 résultats de mesures et des questionnaires correspondants pour déterminer s'ils peuvent apporter des informations supplémentaires ; notamment pour l'identification des facteurs modifiant les niveaux de radon dans les bâtiments, pour la caractérisation du risque, voire pour l'estimation d'une distribution moyenne dans une région.

2.2.3. Identification des populations plus exposées au radon

L'option habituellement prise pour la gestion du risque radon est de définir des seuils d'action et d'identifier en priorité les environnements présentant ces niveaux seuils pour engager une action. De tels choix relèvent à la fois :

- du degré de confiance des experts en l'existence d'un risque à partir de certains niveaux de radon ;
- et de considérations tirées de l'optimisation des actions.

La plupart du temps, ces seuils orientent vers la production d'informations ciblées sur les valeurs les dépassant, de la façon la plus efficace possible.

2.2.3.1. Identification des populations de travailleurs exposés

Certaines professions sont a priori particulièrement exposées au radon ; il s'agit de toutes les professions minières et de celles travaillant en sous-sol, dans des grottes ou dans des stations thermales (56;83). De même, dans les zones à potentiel élevé de radon, l'exposition professionnelle peut contribuer pour une bonne part à l'exposition.

2.2.3.2. Identification des bâtiments présentant des niveaux élevés de radon

Il s'agit d'une information importante pour guider les actions de gestion des risques en France. Elle concerne deux questions différentes qui sont :

- d'une part, une estimation fiable de la proportion de bâtiments présentant des valeurs élevées de radon afin de définir les priorités d'actions ;
- d'autre part, une détection efficace des bâtiments à forte probabilité de présence de valeurs élevées de radon.

a) Estimation de la proportion de bâtiments présentant des valeurs élevées de radon

Cette information est actuellement peu précise, car elle est basée sur des échantillons de mesure obtenus dans les bâtiments qui étant petits fournissent forcément un petit nombre de valeurs élevées. Elle est donc très sensible aux conditions spécifiques d'échantillonnage. Ainsi, l'extrapolation des résultats obtenus à l'ensemble des bâtiments peut varier considérablement selon que le hasard conduit à identifier un bâtiment présentant des valeurs élevées ou pas. Par exemple, en Bretagne selon le type d'échantillonnage utilisé, les estimations du nombre de logements dont les niveaux de radon annuels dépasseraient 1 000 Bqm³ peuvent varier de 2 000 à 5 000 et les estimations du nombre de logements dépassant 400 Bqm³ peuvent varier de 30 000 à 60 000 pour 1 300 000 logements principaux. Une solution pour une meilleure estimation réside dans l'existence d'un maillage plus dense des mesures et l'étude de la distribution des niveaux de radon stratifiée sur les principaux facteurs de l'environnement (variables supports telles que la géologie et la pédologie) et les catégories de bâtiments. A titre d'exemple, la distribution du radon dans le sous-échantillon de 2 500 mesures faites dans le bâtiment résidentiel individuel des communes concernées par une géologie granitique dans le cadre de la campagne IRSN-DGS est log normale (67). Dans ces conditions, sous réserve que l'échantillon ne soit pas biaisé, il est beaucoup plus facile d'estimer la proportion de bâtiments dépassant un certain niveau de radon.

b) Identification du type de bâtiment à potentiel élevé de radon

Les déterminants des niveaux de radon dans un bâtiment sont nombreux. Dans un premier temps, citons la richesse du sol en radium et en uranium et sa perméabilité associées à une fréquence plus importante de bâtiments présentant des niveaux de radon élevés. Mais au sein de chaque bâtiment, les caractéristiques architecturales et le mode de vie des occupants interviennent aussi pour une bonne part dans les concentrations de radon en jouant sur l'étanchéité entre le sol et les cellules habitées et le taux de renouvellement d'air. Il est actuellement très difficile de prendre en compte tous ces facteurs pour prédire des niveaux de radon à l'intérieur d'un bâtiment.

Ainsi, si les résultats de la campagne DGS/IRSN associent des niveaux moyens de radon plus élevés aux appartements du rez-de-chaussée, en bâtiment résidentiel individuel, construits avant 1948, dans des zones à fort potentiel radon (départements classés comme à potentiel radon élevé, communes concernées par des zones magmatiques acides), il est strictement impossible de prévoir un niveau de radon pour un bâtiment précis (67). Le dépistage ne peut donc s'effectuer que par la mesure ; et la solution réside dans un mesurage le plus complet possible d'une zone.

La compréhension des facteurs qui contrôlent les concentrations de radon dans un bâtiment est une étape incontournable pour l'évaluation des niveaux de radon susceptibles d'être atteints dans un bâtiment et pour l'optimisation des techniques de réduction du radon dans les constructions futures ou existantes. Dans cette optique, l'IRSN a lancé un programme instrumental destiné à étudier les

mécanismes physiques qui gouvernent les concentrations de radon dans l'air intérieur d'un bâtiment (22). Il repose sur l'instrumentation d'une maison individuelle type, située en Bretagne Nord sur une formation géologique uranifère, bien caractérisée. L'IRSN y assure une mesure en continu de l'activité volumique du radon dans l'air intérieur et extérieur, du flux de radon à l'interface sol/bâtiment et à la surface du sol (extérieur), en parallèle avec des mesures en continu des dépressions, température et humidité de l'air intérieur, et des conditions météorologiques. Dans cette étude, la variation de plusieurs paramètres liés au bâtiment (propriétés architecturales, ventilation, interface sol/bâtiment) permet d'appréhender leurs effets sur les concentrations de radon dans la maison et ainsi d'étudier la validité du modèle physique sur lequel repose l'outil de calcul des niveaux de radon dans les bâtiments, développé à l'IRSN (23).

2.2.3.3. Identification et cartographie des zones à potentiel élevé d'exhalation du radon à la surface des sols

a) Méthodologies utilisées

Un des axes de gestion du risque consiste à identifier les zones du territoire qui présentent un fort potentiel d'exhalation du radon. Cette cartographie du potentiel d'exhalation radon des terrains est utilisée dans la majorité des pays ayant une politique active de gestion du risque radon (Suède, Royaume-Uni, Norvège, USA), essentiellement pour hiérarchiser les priorités concernant les choix des mesures, mais aussi parfois pour réglementer. Plusieurs approches sont utilisées actuellement pour établir cette cartographie (cf. annexes IV, IX pour détails).

Quand la densité de mesures est suffisamment importante, il est possible de définir un maillage géographique régulier et d'attribuer un potentiel radon dans les bâtiments de chaque maille à partir de l'extrapolation des données disponibles dans les bâtiments résidentiels. Le NRPB a pu appliquer une telle méthode en Angleterre sur la base des 500 000 mesures de radon effectuées en bâtiment résidentiel individuel à partir de dosimètres passifs posés durant trois mois, de l'informatisation et du géoréférencement de ces mesures (57). Il peut ainsi dresser une estimation précise et fiable de la distribution des niveaux de radon dans les bâtiments résidentiels par mailles de 25 km², et définir comme zones à potentiel élevé de radon, celles pour lesquelles au moins 1 % des logements présentent des moyennes annuelles de radon de plus de 200 Bq.m⁻³. Le nombre de mesures validées dans une même base de données en France (environ 13 000), ne permet pas de proposer un zonage du potentiel radon en dessous de l'échelle du département si l'on se base sur la même méthode (30).

La méthode actuellement la plus employée repose sur les informations géologiques et/ou pédologiques et sur les mesures existantes des niveaux de radon dans les bâtiments, en affinant progressivement les informations et la définition des zones à potentiel de radon (4-6;8;9;36;39-42;47;48;58;65;70-72;76;78;79). Les Norvégiens et les Suédois se basent sur les résultats des campagnes géophysiques aéroportées⁶ de mesure des concentrations équivalentes en uranium (élément père du radon) à la surface des sols et des mesures effectuées dans les logements (respectivement au nombre de 20 000 et 300 000) pour définir les zones à potentiel élevé de radon. Cette approche qui permet d'investiguer rapidement de grandes surfaces de terrain, a également été appliquée aux USA, au Royaume-Uni et au Québec. Miles en Angleterre a montré que le recours aux deux sources d'informations permettait d'identifier les zones nécessitant des mesurages plus denses pour estimer les distributions correspondantes (58).

En France, le BRGM réalise des cartographies du potentiel d'émanation du radon des sols qui reposent sur une expertise approfondie des caractéristiques de ceux-ci (8). Il s'agit de réaliser une analyse combinatoire des informations disponibles sur les formations géologiques (cartes géologiques de la France au 1/50 000), sur les teneurs en uranium des sols issues de la banque litho-géochimique et/ou des couvertures spectrométriques aéroportées (lorsqu'elles sont disponibles), des informations sur la structure du sous-sol (failles), sur la distance aux indices et gisements uranifères connus et sur la morphologie. Des cartes du potentiel d'émanation du radon du sol sont ainsi produites et comparées aux mesures du radon effectuées dans les bâtiments résidentiels (DGS et/ou IRSN) afin d'établir une classification spatiale des zones à fort, moyen ou faible potentiel d'émanation en radon des sols et en déduire une stratégie de mesurage. Cette classification est restituée indépendamment des limites administratives des communes et présente une résolution qui ne peut être meilleure que celle de la carte géologique au 1/50 000. De tels travaux ont déjà été effectués pour les Pays-de-Loire, l'Aquitaine, la

⁶ Ces campagnes de levé consistent à mesurer, à partir d'un avion, l'intensité du rayonnement gamma issu du bismuth 214 à la surface des sols. Cet élément, situé à trois étapes de désintégration du radon, fournit donc, moyennant quelques hypothèses, une image quasi équivalente de la teneur en radon émise par les sols.

région Provence-Alpes-Côte-d'Azur, la Corse et la Meurthe et Moselle. Ils montrent une assez bonne corrélation entre classification des zones et distribution des valeurs élevées de radon dans le bâtiment.

A partir de l'expérience acquise, il apparaît que la disponibilité des mesures géophysiques aéroportées est un facteur essentiel à la précision et à la résolution⁷ des résultats fournis ; les cartographies qui en résultent, renseignent en effet directement sur les concentrations en bismuth 214 ou bien sur les teneurs équivalentes en uranium des sols. A ce jour, seules les cartographies couvrant la Bretagne, les pays de la Loire, le Limousin et les Cévennes sont disponibles.

L'IRSN s'est engagé depuis plusieurs années dans des programmes de recherche visant à établir une méthodologie prédictive permettant de cartographier le potentiel radon du territoire (18;39-42). La démarche développée en collaboration avec le BRGM, s'appuie sur une quantification du flux de radon à la surface des sols, à partir d'une caractérisation précise des paramètres géologiques et pédologiques locaux et d'une modélisation des transferts du radon du sol à l'atmosphère. Les résultats de ces recherches ont permis d'acquérir une meilleure connaissance du phénomène d'exhalation du radon et ont apporté des indications quant au choix des paramètres géologiques et pédologiques impliqués dans ce processus et la pertinence des outils à utiliser pour la réalisation d'une cartographie prédictive. Sur la base de ce travail, la teneur en uranium des formations géologiques semble être le paramètre primordial qui influence l'exhalation du radon à la surface du sol. La généralisation d'une classification des différentes unités litho-géochimiques (lithologie associée à une gamme probable de teneur en U) en fonction de leur potentiel d'exhalation de radon en France est cependant encore aléatoire compte tenu de la variabilité des teneurs en uranium des mêmes formations géologiques, de l'insuffisance des informations disponibles à une échelle suffisamment précise, et du peu de mesures de radon actuellement utilisables pour la validation. En outre, les résultats montrent qu'il est nécessaire de prendre également en compte, en plus des propriétés des roches, les caractéristiques physiques de la couverture de sol sus-jacente à la roche, pour améliorer la précision cartographique. Toutefois, ces résultats ont également souligné les difficultés de réalisation d'une cartographie prédictive liées d'une part aux incertitudes sur l'estimation du potentiel d'exhalation et d'autre part, à la densité, la validité et la disponibilité des informations pédologiques nécessaires à la cartographie⁸. A l'heure actuelle, il n'existe pas d'assurance sur la disponibilité et la représentativité statistique de ces données, à l'échelle du territoire français. C'est pourquoi l'IRSN poursuit actuellement l'axe de recherche engagé depuis quelques années dans ce domaine. Il s'agit notamment de tester l'applicabilité de la méthodologie de cartographie prédictive déjà élaborée (41) sur une zone d'une superficie supérieure aux transects précédemment étudiés, c'est-à-dire équivalente à celle d'un département. Les résultats récents ont permis de valider la méthode mise au point dans une zone plus grande, choisie pour la diversité des teneurs en uranium du sous-sol, et également de souligner les limites d'applicabilité de celle-ci.

b) Cartographie des potentiels radon : les limites et évolutions futures

En France, comme ailleurs, il n'existe pas de méthodes permettant de prévoir une distribution et/ou une teneur moyenne en radon dans l'environnement et a fortiori dans les bâtiments. Les cartographies proposées sont des cartographies de la probabilité d'un aléa et non des cartographies du risque. La résolution et la précision de ces méthodes dépendent des données d'entrée utilisées qui ne sont pas toujours adaptées à l'échelle du problème à traiter (facteur d'échelle). La densité et la représentativité de certaines d'entre elles sont notoirement insuffisantes (pédologie, paramètres physiques des sols). Celles qui existent sont stockées dans différents organismes et pour certaines d'entre elles, non partagées. Elles ne sont pas souvent disponibles à la même échelle sur l'ensemble du territoire. Ces facteurs contraignent l'échelle de restitution des cartes « prédictives ».

Cependant, il est d'ores et déjà possible à l'échelle d'une commune, de discriminer les territoires en fonction du potentiel d'exhalation du radon des sols.

Des recherches sont en cours pour établir une méthode cartographique de prédiction des teneurs en radon dans les bâtiments.

L'amélioration de la cartographie de l'aléa nécessite encore de nombreux efforts en terme d'acquisition de données (levés géophysiques aéroportés, mesures autoportées de calibration régionales, mesures dans les bâtiments) et d'amélioration des méthodes de traitement et d'interprétation des données. En outre, la collecte des informations puis le traitement de ces données et leur interprétation, impliquent un

⁷ les campagnes de mesures géophysiques aéroportées sont réalisées selon des mailles qui varient de 150 à 1 000 m. La taille des mailles peut être variable pour une même couverture en fonction des objectifs de la campagne.

⁸ les cartographies géologiques réalisées par le BRGM sont des documents valides et disponibles sur la quasi totalité du territoire. Le programme du 1/50 000 doit être terminé en 2008. Sur les 1 020 cartes qui correspondent à la couverture complète de la métropole, il en reste une vingtaine à lever.

investissement en temps très important. Il s'agit donc d'un processus permanent qui se fonde sur un état des connaissances et des informations sans cesse remis à jour et qui nécessite la mise en réseau de différentes bases de données (cf. annexe IV, V, VIII, IX).

2.3. Caractérisation de l'impact des expositions au radon

Cette étape consiste en la production d'indicateurs illustrant l'impact du radon basés sur l'application des modèles aux estimations d'exposition au radon. Ainsi, il est possible d'appliquer la méthode développée par le BEIR VI pour caractériser le risque lié à l'exposition domestique au radon dans le parc de logement français ou dans une région à potentiel radon plus élevé comme la Bretagne (cf. annexe III) (12).

L'application à la moyenne nationale de l'exposition française qui est de ($\# 70 \text{ Bq.m}^{-3}$) du modèle (âge-période-durée) proposé par le BEIR VI, compte tenu des courbes démographiques françaises, permet d'estimer à 15 % l'excès de risque relatif (cf. définition en annexe VI) de décéder d'un cancer du poumon lié au radon. Il est de 30 % en Bretagne (niveau moyen de radon 100 Bq.m^{-3}) (12). Pour les logements présentant un niveau annuel de radon de 400 Bq.m^{-3} , l'excès de risque relatif est de 100 % (le risque est doublé).

On estime ainsi qu'environ 13 % des 25 000 décès (soit environ 3 350 décès) par cancer du poumon observés annuellement en France seraient attribuables à l'exposition au radon (64;68). De même, on estime qu'environ 20 % des 938 décès (soit environ 185 décès) par cancer du poumon observés en Bretagne annuellement seraient attribuables au radon présent dans le logement Breton. A titre d'exemple, les décès par cancer du poumon attribuables aux expositions au radon dans les 4 % de logements bretons présentant des niveaux annuels de 400 Bq.m^{-3} , ne représentent que 0,5 % des décès bretons par cancer du poumon. Ces résultats montrent que cibler l'action sur les bâtiments résidentiels dont les niveaux de radon dépassent 400 Bq.m^{-3} est plus légitimé par des considérations d'équité que d'efficacité. Ce dernier objectif nécessiterait des actions basées sur des valeurs seuils inférieures ou sur la réduction de la moyenne générale des niveaux de radon.

De tels outils sont utilisés pour comparer l'impact d'un facteur de risque par rapport à un autre ou d'une région à l'autre (calcul d'un risque relatif ou d'une proportion de risque attribuable). Ils permettent aussi d'illustrer l'impact direct d'un facteur de risque (calcul d'une probabilité de survenue d'un événement au cours d'une vie entière en rapport avec une exposition au facteur de risque, ou d'un nombre d'événements attribuables à l'exposition au facteur de risque au sein d'une population pendant une période donnée). L'application de l'estimation des risques radon aux conditions locales, a l'avantage de rendre l'estimation plus compréhensible et surtout moins abstraite pour les différentes personnes impliquées.

Si l'objectif est de donner un ordre de grandeur de l'impact et d'illustrer le fait que les niveaux élevés ne contribuent que peu à l'impact sur une région, des calculs relativement simples et ne donnant que des estimations centrales suffisent. Ceux ci doivent cependant être accompagnés d'une discussion sur les incertitudes liées à de telles estimations.

Mais, de tels calculs sont mieux acceptés quand ils sont accompagnés d'une quantification des incertitudes autour des estimations centrales. On leur demande aussi souvent d'être plus précis (tenir compte de l'historique et des prévisions démographiques de la population, intégrer la prévision de l'impact des autres facteurs de risques du cancer du poumon en fonction de l'exposition passée et future, particulièrement les habitudes tabagiques, qui sont en pleine mutation dans la population française (37)).

Cette caractérisation des risques doit aussi s'intégrer dans une démarche complète d'évaluation des risques (identification des dangers, relations exposition-réponse, estimation des expositions, caractérisation des risques). C'est l'ensemble de cette démarche qui présente l'intérêt de fournir un cadre uniforme et rationalisé d'intégration des multiples informations apportées par les études épidémiologiques, les connaissances fondamentales et expérimentales (animal et in vitro), dans la construction d'un outil permettant d'estimer l'impact sanitaire correspondant.

Enfin, pour une pathologie multi-factorielle comme le cancer du poumon, l'énoncé des résultats paraît beaucoup plus pertinent s'il est possible de comparer, avec les précautions nécessaires s'agissant de risques de nature différente, l'impact du radon avec celui d'autres facteurs (amiante, tabac, expositions professionnelles).

3. Objectifs d'un système de surveillance des expositions au radon et des risques associés

3.1. Justification des objectifs

Dès l'instant où le radon apparaît comme un cancérogène pulmonaire certain et qu'aux niveaux d'exposition rencontrés en population générale, il est estimé comme étant la deuxième source de cancers du poumon en France après le tabac, une caractérisation de l'exposition au radon dans les bâtiments et du risque associé est nécessaire. Celle-ci est aujourd'hui possible pour ce qui est de l'impact global, mais bien souvent beaucoup plus difficile à un niveau plus précis. Cette situation n'est néanmoins pas définitive, puisque de nouvelles informations sur l'exposition au radon sont produites ici et là.

Le risque lié à l'exposition au radon est un risque à long terme. Le modèle issu des résultats du suivi des cohortes de mineurs est actuellement utilisé pour quantifier le risque lié à l'exposition domestique au radon. Cependant, l'évolution des connaissances scientifiques peut faire apparaître des sous-populations et des conditions d'exposition qui nécessiteront la réalisation de nouvelles études épidémiologiques et de nouvelles caractérisations de ce risque.

Pour une région et pour une population, même en l'absence d'une intervention de l'Etat, les changements éventuels dans l'exposition moyenne au radon sont susceptibles de se modifier progressivement en fonction des modifications des règlements techniques sur le renouvellement d'air, ou des changements des techniques architecturales (incluant notamment les techniques d'isolation thermique).

En outre, les politiques de détection et de gestion des expositions au radon et des risques associés sont en train de se mettre en place. Si elles ne concernent pour l'instant que l'établissement de recommandations pour le mesurage du radon et la définition de zones prioritaires, elle est appelée à toucher d'autres objectifs dans la durée. Elle va nécessiter la production de nombreuses informations afin de l'orienter, d'en définir les priorités, de mesurer l'atteinte des objectifs.

Toutes ces raisons justifient la mise en place dès maintenant d'un système de surveillance pérenne, des expositions au radon, des risques associés et des actions de gestion permettant de répondre à ces besoins.

3.2. Les objectifs du système

Le groupe de travail recommande la constitution d'un système de surveillance qui devra répondre aux objectifs suivants :

- connaître et suivre l'évolution des expositions au radon et des risques associés dans le temps et selon les populations permettant :
 - de quantifier et surveiller l'impact sanitaire en France et selon les régions ;
 - d'identifier les cibles prioritaires en termes de risques liés au radon (en matière d'exposition et/ou de niveau de risque de cancer du poumon des populations) ;
 - d'orienter les politiques de santé publique quant au radon ;
 - de faciliter la réalisation d'études épidémiologiques ;
- pouvoir détecter l'apparition d'un phénomène d'un nouveau facteur pouvant modifier les expositions au radon ou l'impact associé afin d'adapter les recherches ou les mesures de surveillance et de gestion des risques ;
- suivre spécifiquement l'efficacité des mesures de gestion des risques.

Le groupe de travail considère que les politiques de lutte contre le radon doivent reposer sur des caractérisations objectives des risques, lesquelles nécessitent une meilleure connaissance des expositions au radon et des relations exposition-risque. Aussi, il recommande dans un premier temps que des efforts importants soient entrepris pour faciliter l'atteinte de cet objectif, tout en rappelant que les connaissances actuelles sont d'ores et déjà suffisantes pour élaborer et mettre en application une politique de réduction des expositions.

4. Plan d'actions pour la mise en place du système de surveillance

Pour atteindre les objectifs précités, le groupe de travail considère qu'il faut renforcer les actions existantes en :

- renforçant les mesures d'exposition ;
- créant un système de suivi et de centralisation des informations ;
- poursuivant les activités de recherches ;
- facilitant le partage d'une veille scientifique et technique ;
- renforçant les compétences sur le terrain.

Les recommandations faites visent non seulement à mettre en place les outils de surveillance nécessaires, mais aussi à optimiser le fonctionnement du système.

4.1. Renforcer les mesures d'exposition au radon

La mise en place à terme d'un système de suivi des expositions, nécessite avant tout des mesures d'exposition fiables dans les bâtiments et suffisamment nombreuses pour remplir les objectifs de caractérisation des risques, d'identification des zones à potentiel radon élevé et de suivi. Compte tenu du fait que 70 % du budget temps concerne le bâtiment résidentiel, le groupe de travail juge prioritaire la complétion des mesures pour ce type de bâtiment qui pourtant ne bénéficie d'aucune politique de mesurage et de gestion actuellement en France.

4.1.1. Bâtiments résidentiels

Le groupe de travail recommande :

- *la réalisation au niveau national comme régional, de mesures complémentaires dans les bâtiments résidentiels collectifs, et pour certaines régions dans les bâtiments résidentiels individuels ;*
- *la réalisation d'un bilan sur les informations disponibles concernant les variations des niveaux de radon en fonction des saisons et des climats des régions et la planification d'une campagne ciblée sur ce thème le cas échéant.*

4.1.2. Locaux à usage professionnel

Les adultes passent 20 % de leur temps dans les locaux à usage professionnel, la contribution de ces expositions au risque de cancer du poumon ne peut donc pas être négligeable.

Le groupe de travail estime souhaitable que soient réalisées des campagnes de mesure dans ces locaux, particulièrement dans les zones à potentiel élevé de radon.

4.1.3. Lieux ouverts au public

Le mesurage du radon dans les lieux ouverts au public est obligatoire pour 31 départements (62). Afin de s'assurer de l'utilité et de la représentativité de ces mesures quant aux occupants des bâtiments en question, le groupe de travail recommande que les experts fassent le point :

- *sur la différence entre le résultat d'un dosimètre passif posé sur l'ensemble du nyctémère et l'exposition réelle des occupants ;*
- *sur les différents facteurs d'équilibre pouvant être rencontrés dans les lieux ouverts au public (ce problème pouvant être contourné par l'utilisation de dosimètres fermés) ;*

- sur la variation des niveaux de radon en fonction des saisons dans les écoles ;
- sur la connaissance précise des budgets espaces-temps des enfants et du personnel dans les établissements d'enseignement.

4.1.4. Définir des populations prioritaires pour le mesurage du radon

Si une bonne connaissance de l'ensemble de la distribution du radon est nécessaire en toute zone, les zones à fort potentiel de radon nécessitent un mesurage plus dense pour des raisons techniques liées à la variabilité des niveaux rencontrés, comme pour la détection des bâtiments présentant des niveaux élevés au nom du principe d'équité. Elles peuvent aussi dans le futur servir de base à la mise en place d'une politique de gestion spécifique du risque radon dans les bâtiments.

La méthodologie de définition d'une cartographie des teneurs probables en radon dans les bâtiments est en train de se mettre en place. Il paraît actuellement hasardeux de quadriller la France en potentiel radon et de définir des politiques de gestion par rapport à une telle classification en dessous de l'échelle des départements.

Cependant, pour certaines localisations, le croisement des informations géologiques existantes et des mesures déjà effectuées est suffisant pour délimiter des zones où la probabilité d'une fréquence de mesures élevées de radon dans les bâtiments est nettement supérieure aux autres localisations. De telles zones pourraient ainsi faire l'objet d'un quadrillage plus fin de mesures dans les bâtiments.

Le groupe de travail recommande :

- qu'un bilan des différentes méthodologies permettant d'identifier les zones à fort potentiel d'exhalation du radon et des informations disponibles soit effectué et que soit lancé un mesurage plus dense dans les logements résidentiels des zones déjà identifiables comme à fort potentiel radon ;
- que priorité soit donnée au mesurage des bâtiments résidentiels individuels, des salles de rez-de-chaussée, ainsi que des locaux à usage professionnel situés en sous-sol ;
- de tenir compte aussi du fait que le risque de base de cancer du poumon est plus élevé dans les populations d'employés de l'industrie, et les citoyens pour le choix des zones de mesurage du radon.

4.1.5. Obtenir des mesures interprétables et représentatives des concentrations d'une pièce

Afin de rendre utilisable l'information apportée par les mesures de radon, le groupe de travail recommande :

- l'application obligatoire des normes AFNOR pour la mesure du radon ;
- le géo-référencement des mesures ;
- l'association aux mesures incluses dans la base de données, d'un minimum d'informations portant sur les caractéristiques des mesures, des pièces et des bâtiments (cf. annexe VII) ;
- l'application pour toute campagne de mesure dans les lieux ouverts au public, des recommandations du guide DGS-DGUHC : « mesure du radon dans les lieux ouverts au public » ; le questionnaire correspondant devra être rempli précisément.

4.1.6. Des campagnes de mesure des concentrations représentatives et comparables

Pour pouvoir estimer la distribution des niveaux de radon en région comme en France, et en suivre l'évolution, le groupe de travail recommande que :

- des mesures exhaustives ou selon un tirage au sort et un plan de sondage assurant la représentativité de l'échantillon (notamment en stratifiant sur le type de bâtiment ou la zone géologique quand l'information est disponible) soient réalisées ;
- les campagnes soient renouvelées à intervalle régulier (tous les dix ans par exemple pour la surveillance).

4.2. Mettre en place un système d'information et de suivi

Il s'agit de structurer le recueil et la compilation des informations apportées par les mesures de radon en harmonie avec les informations complémentaires nécessaires pour remplir les objectifs précédemment cités. Pour cela, le groupe de travail recommande que soit mis en place à terme, un réseau d'informations multidisciplinaire et permanent.

4.2.1. Mise en place d'un réseau de bases de données sur les expositions au radon

Dans un premier temps, il s'agit de constituer les bases de données sur les niveaux de radon dans les différents bâtiments.

Aussi, le groupe de travail recommande la centralisation et l'informatisation des données par les organismes qui sont en charge du recueil des mesures du radon.

Les mesures peuvent être centralisées à plusieurs endroits mais il serait plus performant qu'elles soient centralisées dans une seule base pour chaque catégorie de bâtiments (bâtiments abritant des lieux ouverts au public, bâtiments résidentiels, bâtiments abritant des locaux à usage professionnel) sous forme d'une information commune minimale et transmissible aux différents acteurs concernés par la gestion du radon et la connaissance du risque associé. Il s'agit d'un préalable à la création d'un réseau permettant l'utilisation de l'ensemble des données portant sur les mesures existantes de radon dans les différents types de bâtiments.

Dans les bâtiments résidentiels, les mesures faites par les différents services délocalisés de l'Etat, devraient compléter les bases de données actuellement existantes à l'IRSN.

Dans les lieux ouverts au public, des milliers de mesures ont actuellement été effectuées. Leur informatisation dans une base de données commune (Appliradon) de la DGS et de la DGSNR est en cours. Cet outil est indispensable pour valoriser et rendre disponibles les mesures effectuées dans les lieux ouverts au public.

Le décret n°2003-296 du 31 mars 2003 (63) en application de la loi sur l'exposition renforcée aux rayonnements d'origine naturelle va amener à la réalisation d'un certain nombre de mesures de radon dans les environnements professionnels. Le groupe de travail invite la Direction des relations au travail à centraliser et exploiter les données correspondantes.

Pour mener à bien cette centralisation et permettre la valorisation de ces données, le groupe de travail recommande :

- *l'analyse des conditions juridiques de recueil de l'information produite, de sa centralisation et de son informatisation d'une part, de propriété des informations et de leur mise à disposition de tiers d'autre part ;*
- *la création d'un comité technique inter-organismes qui veille à la mise en cohérence des informations apportées par les différentes bases de données afin de préparer leur échange ou leur mise à disposition de ceux qui en ont besoin ;*
- *la constitution d'un comité directeur qui aurait pour mission de définir les règles et objectifs de partage de l'information.*

4.2.2. Faciliter le recours à l'information complémentaire pour caractériser les expositions au radon et le risque associé

Pour caractériser l'exposition, il est nécessaire tout d'abord de disposer d'une bonne expertise sur la valeur des informations issues des mesures du radon. Il est nécessaire ensuite de disposer d'informations complémentaires :

- sur les caractéristiques des bâtiments existants (bâtiments résidentiels comme locaux ouverts au public) (CSTB, IRSN, Insee) et la densité de leur distribution (Insee) ;
- sur les caractéristiques climatiques locales, en particulier la température afin de corriger les mesures en fonction des périodes de pose des dosimètres (données Météo-France) ;
- sur les budgets espace temps des différentes populations qui fréquentent les bâtiments (données Insee).

Pour estimer le risque de cancer du poumon en regard, il est nécessaire de se procurer de l'information sur les caractéristiques démographiques des populations concernées et les prévisions d'évolution (Ined), sur l'exposition des cofacteurs (dont le tabagisme) et leurs prévisions d'évolution. L'Observatoire de la qualité de l'air intérieur devrait collecter une information utile dans ce dernier domaine.

Compte-tenu de ces considérations, le groupe de travail recommande les mesures suivantes :

- lors des travaux de caractérisation du risque d'une région, la réalisation d'une expertise des données existantes en collaboration avec les organismes gestionnaires des bases de données recueillant l'information sur l'exposition au radon ;
- l'identification des informations nécessaires et disponibles pour caractériser le risque radon dans une région ou en France, ainsi qu'une analyse de leurs limites et utilité. Le guide méthodologique pour la caractérisation du risque radon dans une région ou en France (cf. chapitre formation) pourrait contenir ce type d'information.

4.2.3. Faciliter le recours à l'information complémentaire pour définir des zones à potentiel radon

La cartographie du potentiel radon d'une région nécessite une mise en relation des informations sur les mesures de radon dans les bâtiments, dans le sol, à sa surface ou dans l'atmosphère avec les caractéristiques géologiques et pédologiques locales. De même, l'information sur la densité des bâtiments par catégorie sera nécessaire pour définir les zones de mesurage ou d'action prioritaires, puis pour estimer la proportion de bâtiments dont les niveaux de radon dépassent certaines valeurs.

Dans ce contexte, le groupe de travail recommande :

- le bilan par les organismes chargés de la recherche ou de l'expertise sur la définition des zones à potentiel radon, d'une part des informations dont ils disposent et d'autre part, des informations dont ils ont besoin (données géologiques, géophysiques, géochimiques et pédologiques pertinentes..) ;
- le bilan par les organismes chargés du recueil de l'information géologique, géophysique, géochimique et pédologique (BRGM, INRA....) de l'information dont ils disposent, et de leur disponibilité (échelle, support,...) ;
- le géo-référencement de toutes les données provenant de ces sources d'informations.

4.2.4. Suivi des politiques de gestion du risque lié aux expositions au radon

Si la stratégie de gestion des risques radon ne concerne pour l'instant que la réalisation d'actions d'information et l'établissement de recommandations pour le mesurage radon et la définition de zones prioritaires, elle est appelée à toucher d'autres objectifs dans la durée tels que par exemple l'accréditation d'entreprises compétentes dans le diagnostic ou le traitement, ou la définition de réglementations dans le domaine de la construction.

- Le groupe de travail insiste sur la nécessité de définir des indicateurs permettant de mesurer l'atteinte des objectifs et de mettre en place, dans un système de surveillance, les moyens de suivre ces indicateurs.

Les indicateurs pourront concerner la connaissance et la perception des risques radon par la population avant et après une campagne d'information. Ils pourront concerner le nombre de maisons mesurées et/ou traitées et les résultats sur le nombre de maisons existantes d'une zone. Ils pourront aussi renseigner sur les caractéristiques socio-démographiques de la population ayant agit/n'ayant pas agit (tabagisme, composition de la famille, âge moyen, CSP).

Il paraît important aussi qu'un fond de retour et de suivi d'expériences des actions entreprises soit géré et partagé par les différents organismes.

Un certain nombre des informations recueillies devraient figurer dans les bases de données (citons l'objectif de la campagne dont fait partie la mesure, le caractère de diagnostic ou de contrôle post-intervention de la mesure, le type d'intervention entreprise sur le bâtiment ou son absence).

Un objectif de dépistage induira la nécessité d'enregistrer dans la (les) base(s) de données radon toutes les mesures effectuées indépendamment de leur qualité. Cependant un étiquetage de leur qualité est nécessaire.

4.3. Continuer les recherches scientifiques

Le bilan des connaissances scientifiques et épidémiologiques justifie la mise en place d'actions pour gérer le risque lié à l'exposition domestique au radon. Aujourd'hui, l'intérêt de poursuivre les recherches sur le radon et ses effets sur la santé porte surtout sur l'apport d'informations permettant d'adapter les stratégies de gestion du « risque » radon et la mise en place du système de surveillance en regard.

Les questions qui se posent ainsi sont celles de la quantification du risque aux plus faibles doses rencontrées fréquemment dans les logements, l'identification de populations plus sensibles aux effets du radon ou pour lesquelles le risque se modifie, l'influence des interactions avec d'autres facteurs de risques de cancer du poumon.

Pour toutes ces raisons, le groupe de travail soutient fortement la poursuite de la recherche sur les relations entre exposition au radon et risque sanitaire.

4.3.1. Sur les relations entre expositions au radon et effets

Afin de mieux connaître l'impact de l'exposition domestique au radon aux plus faibles doses, le groupe de travail recommande de s'assurer que les moyens seront mis en œuvre pour :

- continuer à suivre et analyser les cohortes de mineurs français et étrangers ;
- mener à terme le projet de recherche européen multidisciplinaire géré par l'IRSN pour l'évaluation des risques dus au radon aux faibles doses ;
- réaliser une analyse de la fiabilité des mesures d'exposition cumulée au radon au moyen du plomb-214 dans le verre comparée à celle de la méthode classique basée sur les dosimètres. Les conclusions d'une telle analyse pourront contribuer à justifier la relance de nouvelles études cas-témoin.

Afin de mieux connaître les particularités des risques radon dans certaines sous-populations, le groupe de travail recommande :

- un ciblage des recherches sur les effets des expositions au radon durant l'enfance ;
- le lancement de recherches sur des sensibilités particulières de certaines populations aux effets des rayonnements alpha et sur les moyens d'identifier ces sensibilités (tests génétiques ou tests de réparation de l'ADN après irradiation) ;
- l'intégration systématique de mesures précises des expositions cumulées au radon dans les futures études épidémiologiques qui portent sur les relations entre un facteur de risque environnemental et le cancer du poumon ;
- des recherches poussées pour mieux connaître les formes de l'interaction entre tabac et radon ;
- la prolongation du suivi et de l'analyse des cohortes de mineurs français et étrangers.

Le pool important des données issues des analyses cas-témoin faites à l'échelle européenne et des USA devrait permettre la réalisation d'analyses stratifiées sur certaines sous populations : les femmes, les cancers du poumon survenus à un âge jeune, les cancers du poumon survenus chez les non fumeurs.

L'enjeu étant de faciliter la réalisation des futures études épidémiologiques sur les facteurs de risque de cancer du poumon dont le radon, le groupe recommande l'étude de la qualité et la fiabilité des sources d'information pour renseigner sur le cancer du poumon (données de mortalité produites par le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc) de l'Inserm, données du PMSI, données des services d'anatomo-pathologie).

Ces sources devront en particulier être étudiées en tenant compte des critères suivants :

- permettre si nécessaire d'identifier l'individu afin de rendre possible l'interrogatoire direct ou des proches et le retour au dossier clinique, ainsi que le croisement avec d'éventuelles mesures d'exposition individuelle aux facteurs de risques ;
- fonctionner de façon pérenne étant donné que les cancers associés aux facteurs de risque peuvent survenir plusieurs années après l'exposition ;
- couvrir l'ensemble du territoire étant donné la mobilité des populations et le délai nécessaire entre l'exposition aux facteurs de risque et l'apparition du cancer du poumon ;
- renseigner sur les caractéristiques histologiques des tumeurs observées.

4.3.2. Sur l'évaluation des risques en France et dans les régions

La production d'une évaluation de risque fiable, claire et orientant les mesures de santé publique est un enjeu important pour une gestion pertinente des risques liés au radon.

Le groupe de travail recommande la poursuite des recherches dans ce domaine et plus particulièrement sur :

- l'analyse et la prise en compte des différentes sources d'incertitude pour pouvoir connaître la distribution de celle-ci autour des valeurs d'impact produites ; il s'agit d'un élément important de crédibilité des évaluations ;

- la production d'indicateurs d'impact pertinents pour rendre compréhensibles les évaluations des risques et orienter les politiques ;
- les moyens de comparer les risques liés au radon avec les risques liés à d'autres facteurs ;
- les moyens d'intégrer les prévisions d'évolution démographique, d'évolution d'exposition aux autres facteurs de risque, d'évolution de l'exposition au radon en fonction des stratégies de gestion du risque.

4.3.3. Sur l'identification de critères de fort potentiel radon dans les zones ou les bâtiments

Compte tenu des orientations actuellement prises dans la gestion du risque radon centrée sur la détection de bâtiments où les niveaux de radon dépassent les valeurs de référence (400, 1 000 Bq.m⁻³), la mise au point d'outils permettant de détecter ces bâtiments est une priorité de recherche. La première étape consiste à définir des zones à potentiel radon où la fréquence de valeurs élevées est importante.

C'est pourquoi le groupe de travail recommande :

- la poursuite des recherches permettant d'identifier et de définir les zones prioritaires quant au mesurage ;
- l'orientation des recherches permettant de déterminer l'influence des caractéristiques des bâtiments sur les niveaux de radon.

4.3.4. Sur la perception des risques et les comportements à l'égard du risque radon

Quel que soit le pays, les politiques de gestion du risque radon se heurtent plus à l'absence d'action de la part des particuliers à l'égard de valeurs élevées de radon (29;44;45), qu'à des réactions de peur exagérée à l'égard de ce gaz.

Le groupe de travail recommande que soient effectuées des recherches sur la perception des risques, les attitudes et les comportements adoptés par les différents acteurs à l'égard du radon et de sa gestion.

4.4. Partager la veille scientifique et technique

Une bonne connaissance de l'état d'avancement de la recherche scientifique et de l'expertise technique est un des éléments indispensables permettant aux experts de la surveillance de sélectionner et de structurer les outils nécessaires, de motiver les acteurs du système pour le recueil des informations pertinentes, et d'apporter une information utile aux différents acteurs de la gestion des risques.

Dans le domaine scientifique, la veille portera notamment sur les performances des appareils et des méthodes de mesure pour estimer les expositions, sur l'identification des dangers, sur la connaissance des modifications des relations dose – effets (dont aux faibles doses).

Dans le domaine technique, elle portera sur les modifications des techniques de ventilation et architecturales susceptibles d'agir sur le comportement du gaz dans les bâtiments.

La veille scientifique fonctionne encore trop de façon unilatérale à l'intérieur de chaque organisme concerné par la recherche ou la radioprotection.

Le groupe de travail propose que les différents organismes étudient les modalités de mise en commun des différentes activités de veille scientifique de façon à pouvoir les mettre à disposition de ceux qui en ont besoin.

Il s'agit de contribuer à lancer une dynamique de partage des connaissances scientifiques et des cultures entre les experts. Il s'agit aussi de rendre accessible l'information apportée par les publications scientifiques aux différents acteurs concernés par la gestion des risques liés aux expositions au radon. Il s'agit enfin de faire comprendre aux différents acteurs les répercussions de ces avancées en matière de gestion du risque radon ou de surveillance.

Pour répondre à ces objectifs, le groupe de travail propose de faire paraître de façon régulière et chaque fois sur un thème différent sélectionné par un comité scientifique et d'experts, une synthèse critique des publications concernant les recherches sur les expositions au radon et ses effets sur la santé.

Un éditorial sur chaque thème synthétisera l'état des connaissances et discutera des implications en termes de santé publique et de gestion qui peuvent en résulter.

Cette parution peut aussi être l'occasion de faire le point sur l'état d'avancement de différents domaines pouvant influencer les niveaux de radon (législation, politiques de santé publique, dosimétrie, architecture et ingénierie du bâtiment). Au besoin, des experts étrangers pourront participer à cette activité de veille scientifique et technique, afin de permettre des comparaisons entre pays.

4.5. Renforcer les compétences sur le terrain, la formation et l'information des acteurs

Les campagnes de mesure du radon, comme les travaux de réduction des niveaux de radon entrepris nécessitent la mise à contribution de différentes compétences provenant de différents organismes et d'acteurs locaux. Compte tenu de la dispersion de ces missions, le système de surveillance ne peut donc fonctionner que sous forme d'un réseau d'acteurs régionaux et nationaux avec une centralisation et une mise en commun d'une partie des informations. Il s'agit d'assurer un soutien et une participation pertinente des différents acteurs au système de surveillance.

4.5.1. Renforcer l'information des acteurs

Il faut tout d'abord sensibiliser les différents acteurs au risque radon.

A ce titre, les séminaires interrégionaux sur le radon organisés en 2001 et 2002 par l'IRSN (ex IPSN), la DGS et les Drass (à Rennes, Montluçon et Lyon) devraient être reproduits dans d'autres régions.

Les différents acteurs de terrain doivent voir une utilité à être associés à l'effort de production d'une information de qualité. *Dans cette optique :*

- *les informations apportées par les outils de surveillance au niveau national comme local doivent être régulièrement synthétisés et transmis aux différents acteurs. Il en est de même des résultats de la veille scientifique ;*
- *les acteurs locaux, fournisseurs des données doivent avoir accès à la (aux) base(s) de données afin de permettre la valorisation de leur information et des comparaisons entre les résultats des informations qu'ils ont apportées et d'autres.*

Enfin, l'information doit pouvoir être adaptée à la problématique spécifique du radon. *En vue d'adapter cette information, le groupe de travail recommande que soit fait le bilan des campagnes d'informations en France et à l'Étranger sur le radon ainsi que les autres risques d'origine naturelle ou liés à l'activité domestique (UV, cuisine au charbon de bois).*

4.5.2. Renforcer la formation des acteurs locaux sur la gestion du « risque » radon

Afin de permettre la mise en place d'une politique de gestion des risques liés au radon et d'assurer le succès du système de surveillance des expositions au radon, il s'agit de former les acteurs à l'aide de modules sur les risques liés au radon, son mesurage, sa gestion, sa surveillance. Ces modules pourraient être introduits dans les modules de formation des techniciens du bâtiment, des ingénieurs sanitaires, des intervenants de santé publique, des gestionnaires de collectivités locales (maires...).

Des actions dans ce sens ont déjà été lancées par l'IRSN, la DGS (avec la participation de l'InVS), et l'ENSP. Elles doivent être poursuivies, renforcées et élargies à d'autres partenaires.

4.5.3. Transférer les connaissances pour la caractérisation des risques liés au radon auprès des acteurs de santé publique régionaux

L'expérience montre que même si la production générale d'informations sur le risque radon devrait suffire à estimer l'impact du radon dans une situation particulière, l'application de l'estimation des risques aux conditions locales a l'avantage de rendre l'estimation plus compréhensible et moins abstraite pour les différentes personnes impliquées. Les services d'expertise nationaux ne peuvent à eux seuls assurer toutes les productions locales d'une telle information. L'enjeu est donc de transférer les connaissances méthodologiques et les outils d'exploitation nécessaires auprès des intervenants locaux de santé publique (Cire, Drass, Ddass, DDE, autres...).

Le groupe de travail recommande que soit mis au point une méthodologie de quantification locale des risques radon facilement réalisable par les acteurs locaux.

Il s'agira d'abord, avec la collaboration des organismes d'expertise nationaux et des représentants des intervenants locaux de santé publique, d'identifier les différentes situations pour lesquelles des travaux de caractérisation des risques liés au radon peuvent être demandés. Il s'agira ensuite de définir les objectifs de ces caractérisations des risques, puis de définir pour chacun d'entre eux les mesures d'exposition nécessaire, les modèles de relation dose-effet à employer ainsi que les indicateurs d'impact, leurs pertinences et leurs limites. Cette analyse devrait donner lieu à la réalisation d'un guide méthodologique qui permette de mieux comprendre les méthodes employées ainsi que l'intérêt et les limites des résultats. Ce guide devra aussi comporter un volet faisant la liste des informations nécessaires et des sources où il est possible de se les procurer en France et à l'étranger. Enfin, il pourra servir de cahier des charges pour la réalisation d'un logiciel permettant la caractérisation des risques radon ou l'adaptation des outils existants (ex. : European Commission Radon Software (17)).

5. Conclusion

Le radon est reconnu comme cancérigène pulmonaire certain chez l'homme (CIRC). Aujourd'hui, le faisceau de résultats des études épidémiologiques sur les effets du radon apporte des arguments de plus en plus convergents et convaincants sur le caractère cancérigène pulmonaire de l'exposition domestique à ce gaz. De plus, l'extrapolation des relations trouvées chez les mineurs à l'exposition au radon de la population générale en fait un des principaux cancérigènes pulmonaires en terme d'impact collectif quoique loin après le tabac. Or, il est possible de réduire les niveaux de radon dans les bâtiments.

Sur la base de ces arguments, le gouvernement français a initié une politique de gestion du risque radon centrée sur le mesurage des concentrations de radon dans les lieux ouverts au public, sur le traitement des pièces présentant les niveaux les plus élevés, et sur l'information des acteurs dans le domaine technique et décisionnel. Cette politique est appelée à se renforcer et à s'élargir à d'autres actions : définition de zones justifiant d'adaptations dans le domaine de la construction, accréditation d'entreprises expertes dans le diagnostic et le traitement...

L'application de cette politique est à l'origine de la production d'une grande quantité d'informations, laquelle va encore s'accroître. Il est nécessaire de structurer cette masse d'informations afin qu'elle soit utile aux différents acteurs, ainsi qu'à l'orientation et au suivi des actions dans une perspective de santé publique.

En réponse à ces préoccupations, le groupe de travail a proposé de compléter les actions déjà entreprises par la mise en place d'un système de surveillance des expositions au radon et des risques associés. Ce système doit aussi intégrer le recueil des informations permettant de suivre l'efficacité des politiques de gestion des risques liés au radon. De même, un certain nombre de recommandations sont faites en faveur du prolongement de la recherche, du développement d'activités de formation au niveau des différents acteurs impliqués dans le domaine, et du partage de la veille scientifique afin que les résultats de la recherche et des progrès techniques puissent être traduits en temps voulu en termes opérationnels dans la surveillance à des fins de santé publique.

Le succès d'une telle entreprise repose sur la coordination et sur la cohérence des différents organismes impliqués dans la réalisation des actions proposées et qui sont concernés par la radioprotection ou la santé publique. La mise en œuvre de ces actions impose de disposer des moyens financiers et humains nécessaires à l'atteinte de ces objectifs.

Enfin, compte tenu que le radon n'est qu'un des facteurs de risque du cancer du poumon d'une part et des déterminants de la qualité de l'air intérieur d'autre part, la gestion du problème de santé publique lié au radon impliquera probablement un champ d'acteurs plus large que le seul champ de la radioprotection. En conséquence, le système de surveillance des expositions au radon devra permettre de partager et de comparer ses informations avec celles concernant les expositions aux autres facteurs de risque de cancer du poumon. Le groupe de travail souligne à ce sujet l'importance d'un point de vue de santé publique de disposer d'une véritable politique de gestion et de surveillance du tabagisme et de la qualité de l'air intérieur en France.

Références Bibliographiques

1. Ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001 relative à l'introduction dans le code de la santé publique de l'article L1333-10. article L1333-10 du code de la santé publique. 2001.
2. ALAPETITE C, COSSET JM, BOURGUIGNON MH, MASSE R. Genetic susceptibility to radiations. Which impact on medical practice? *Q J Nucl Med* 2000; 44(4):347-354.
3. ALAVANJA MC, LUBIN JH, MAHAFFEY JA, BROWNSON RC. Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri. *Am J Public Health* 1999; 89(7):1042-1048.
4. ÅKERBLOM GV, WILSON C. Radon gas. A radiation hazard from radioactive bedrock and building materials. *Intern Assoc Engineering Geology Bulletin* 1981; (23):51-61.
5. BALL TK, CAMERON DG, COLMAN TB. Aspects of radon potential mapping in Britain. *Radiat Prot Dosimetry* 1992; 45:211-214.
6. BALL TK, MILES JCH. Geological and geochemical factors affecting the radon concentration in homes in Cornwall and Devon U.K. *Env Geochem Health* 1993; (15):27-36.
7. BLOT WJ, XU ZY, BOICE JD, JR., ZHAO DZ, STONE BJ, SUN J et al. Indoor radon and lung cancer in China. *J Natl Cancer Inst* 1990; 82(12):1025-1030.
8. BONJOLY D, PERRIN J, TRUFFERT C, ASFIRANE F. Couverture géophysique aéroportée du Massif armoricain. BRGM R 40471, 1-75. 1999.
9. BOWLES CG, REIMER GM. Short term fluctuations in barometric pressure, soil-gas radon and gamma radiation:U.S.Geological survey. Open file report n°91-641, 1-7. 1991.
10. CIRP. Protection against radon-222 at home and at work. 1-45. 1993.
11. COHEN AJ. Outdoor air pollution and lung cancer. *Environ Health Perspect* 2000; 108 Suppl 4:743-750.
12. Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Health effects of exposure to radon. BEIR VI. Washington: 1999.
13. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. (Extraits). In: National Academy Press, editor. Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. Washington:1988:1-27.
14. DARBY S, DEO H, DOLL R. A parallel analysis of individual and ecological data on residential radon and lung cancer in South-West England. *J Air Statist Soc* 2001; 164(1):193-203.
15. DARBY S, WHITLEY E, HOWE GR, HUTCHINGS SJ, KUSIAK RA, LUBIN JH et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst* 1995; 87(5):378-384.
16. DARBY S, WHITLEY E, SILCOCKS P, THAKRAR B, GREEN M, LOMAS P et al. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. *Br J Cancer* 1998; 78(3):394-408.
17. DEGRANGE JP, LEVY FP, BIRCHALL A, MARSH JW, MUIRHGEAD CR, HAYLOCK RGE. EC Radon Software. A tool for risk calculation and evaluation of countermeasures. European Commission, editor. 2000. Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire ; National Radioprotection Board.
18. DEMONGEOT S. Recherche des différents paramètres caractérisant le potentiel d'exhalation en radon des sols. Université de Franche-Comté, 1997.
19. DGS-DGUHC. Circulaire conjointe n°99/46 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon. 1999.

20. DGS. Circulaire n°289 du 20 mai 1999 relative à l'interprétation sanitaire des mesures en concentration de radon : actions à prendre. Circulaire n°289. 1999.
21. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. Exposure Factors Sourcebook for European Populations (with focus on UK Data). Technical Report n° 79. 2001. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals.
22. FERRY C, IELSCH G, BENEITO F, RICHON P. Etude expérimentale des concentrations de radon dans l'air d'un bâtiment : Bilan au 1er juillet 2002. Rapport technique DPRE / SERGD / 02-33. 2002.
23. FERRY C. RADON2 : un outil de calcul des niveaux de radon dans les bâtiments : version1.0. Rapport Technique/DPRE-SERGD 01-16. 2001.
24. FIELD RW, SMITH BJ, STECK DJ, LYNCH CF. Residential radon exposure and lung cancer: variation in risk estimates using alternative exposure scenarios. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2002; 12(3):197-203.
25. FIELD RW, STECK DJ, NEUBERGER JS. Accounting for random error in radon exposure assessment [letter; comment]. *Health Physics* 1997; 73(1):272-273.
26. FIELD RW, STECK DJ, PARKHURST MA, MAHAFFEY JA, ALAVANJA MC. Intercomparison of retrospective radon detectors. *Environ Health Perspect* 1999; 107(11):905-910.
27. FIELD RW, STECK DJ, SMITH BJ, BRUS CP, FISHER EF, NEUBERGER JS et al. The Iowa radon lung cancer study—phase I: Residential radon gas exposure and lung cancer. *Sci Total Environ* 2001; 272(1-3):67-72.
28. FIELD RW, STECK DJ, SMITH BJ, BRUS CP, FISHER EF, NEUBERGER JS et al. Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa Radon Lung Cancer Study. *Am J Epidemiol* 2000; 151(11):1091-1102.
29. FORD ES, KELLY AE, TEUTSCH SM, THACKER SB, GARBE PL. Radon and lung cancer: a cost-effectiveness analysis. *Am J Public Health* 1999; 89(3):351-357.
30. GAMBARD JP, MITTON N, PIRARD P. Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon IPSN-DGS. Bilan et représentation cartographique des mesures au 01 janvier 2000. IPSN, DGS, editors. 2000.
31. GIMENO L. Le budget espace temps des français. 1996. Université Joseph Fournier, Grenoble.
32. GOLDBERG M, BANEI A, GOLDBERG S, AUVERT B, LUCE D, GUÉGUEN A. Past occupational exposure to asbestos among men in France. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health* 2000; 26(1):52-61.
33. GOLDSMITH JR. The residential radon-lung cancer association in U.S. counties: a commentary. *Health Phys* 1999; 76(5):553-557.
34. Greenland S, Robins J. Ecologic studies: biases, misconceptions, and counterexamples. *Am J Epidemiol* 1994; 139:747-760.
35. GRIMLER G. Les rythmes quotidiens en France. Résultats de l'enquête «Les emplois du temps des Français en 1985-86. Insee Résultats n°167-8, Consommation-Mode de vie n°34-5. 1992. Insee.
36. GUNDERSEN LCS, SCHUMANN RR. Mapping the radon potential of the United States: examples from the Appalachians. *Environment International* 1996; 22(1):S829-S837.
37. HILL C. Trends in tobacco smoking and consequences on health in France. *Prev Med* 1998; 27(4):514-519.
38. IARC. Evaluation of carcinogenic risk to humans: man made mineral fibers and radon. Lyon IARC Monographs, editor. 43. 1-1-1988.
39. IELSCH G. Cartographie du potentiel d'exhalation du radon des sols. IPSN, editor. DPRE/SERGD 01-41, 1-30. 2001.
40. IELSCH G, FERRY C, TYMEN G, ROBÉ M-C. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate. *Journal of Environmental Radioactivity* 2002; 63(1); 15-33.
41. IELSCH G, HARISTOY D. Mise au point d'une méthodologie permettant l'élaboration d'un outil cartographique prédictif en vue d'identifier les zones potentiellement exposées à de fortes concentrations de radon ; Programme environnement et santé 1997 (2 volumes). Rapport IPSN-BRGM Réf. IPSN/DPRE/SERGD RT 01-05. 2001. IPSN, BRGM.
42. IELSCH G, THIÉBLEMONT D, LABED V, RICHON P, TYMEN G, FERRY C et al. Radon (²²²Rn) level variations on a regional scale: influence of the basement trace elements (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates. *Journal of Environmental Radioactivity* 2001; 53(1):75-90.
43. Insee. Recensement général de la population de 1990. Logements - population - emplois. Insee, editor. 1991. Paris, Insee.

44. IPSN. Perception des risques et de la sécurité. Résultats du sondage d'octobre 1999. 1-98. 1999.
45. IPSN. Perception des risques et de la sécurité. Résultats du sondage de novembre 2001. 1-90. 2001.
46. KAFADAR K, FREEDMAN LS, GOODALL CR, TUKEY JW. Urbanicity-related trends in lung cancer mortality in US counties: white females and white males, 1970-1987. *Int J Epidemiol* 1996; 25(5):918-932.
47. KENDALL GM, MILES JCH, CLIFF KD, GREEN BMR, MUIRHEAD CR, DIXON DW et al. Exposure to radon in U.K. dwellings. NRPBR272. 1994. London, National Radioprotection Board.
48. KIES A, BIELL A, ROWLINSON L, FEIDER M. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg - indoor measurements related to house features, soil, geology and environment. *Environment International* 1996; 22(suppl.1):S805-S808.
49. KREUZER M, GERKEN M, KREIENBROCK L, WELLMANN J, WICHMANN HE. Lung cancer in lifetime non-smoking men - results of a case-control study in Germany. *Br J Cancer* 2001; 84(1):134-140.
50. LAGARDE F, PERSHAGEN G. Parallel analyses of individual and ecologic data on residential radon, cofactors, and lung cancer in Sweden. *Am J Epidemiol* 1999; 149(3):268-274.
51. LAURIER D, VALENTY M, TIRMARCHE M. Radon exposure and the risk of leukaemia: a review of epidemiological studies. *Health Phys* 2001; 81(3):272-288.
52. LUBIN JH, BOICE JD, JR. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. *J Natl Cancer Inst* 1997; 89(1):49-57.
53. LUBIN JH, BOICE JD, JR., EDLING C, HORNING RW, HOWE G, KUNZ E et al. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground miners studies. N.I.H. publication n°94-3644. 1-1-1994. Washington D.C. U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Health, National Cancer Institute.
54. LUBIN JH, TOMASEK L, EDLING C, HORNING RW, HOWE G, KUNZ E et al. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat Res* 1997; 147(2):126-134.
55. MARCINOWSKI F, LUCAS RM, YEAGER W.M. National and regional distributions of airborne radon concentrations in U.S. homes. *Health Physics* 1994; 66(6):699-706.
56. MÉTIVIER H, ROBÉ M-C. Le radon. De l'environnement à l'homme. 1998.
57. MILES J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. *Health Physics* 1998; 74 (3):370-378.
58. MILES J, BALL K. Mapping radon-prone areas using the house radon data and geological boundaries. *Environment international* 1996; 22(Suppl.1):S779-S782.
59. MILLER RC, RANDERS-PEHRSON G, GEARD CR, HALL EJ, BRENNER DJ. The oncogenic transforming potential of the passage of single alpha particles through mammalian cell nuclei. *Proc Natl Acad Sci USA* 1999; 96(1):19-22.
60. ministère de l'Emploi et de la Solidarité. Campagne 1999-2000 de mesure du Radon dans les établissements recevant du public. Bilan intermédiaire novembre 2000. 1-16. 2000.
61. ministère de l'Emploi et de la Solidarité. Circulaire DGS n°2001/303 du 02 juillet 2001 relative à la gestion du risque lié au radon dans les établissements recevant du public. Circulaire DGS n°2001/303. 2001.
62. ministère de l'Emploi et de la Solidarité. Décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants. Décret n°2002-460. 2003.
63. ministère des Affaires sociales, du Travail, et de la Solidarité. Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Décret n° 2003-296. 31-3-2003.
64. MONCHECOURT D. Utilisation des modèles développés par la CIPR et le BEIR pour évaluer le risque lié à une exposition domestique au radon en France. INSTN Saclay, 2000.
65. NERO AV, LEIDEN SM, NOLAN DA, PRICE PN, REIN S, REVZAN KL et al. Statistically based methodologies for mapping of radon «actual» concentrations: the case of Minnesota. *Radiation Protection Dosimetry* 1994; 56(1-4):215-219.
66. NEUBERGER JS, LYNCH CF, KROSS BC, FIELD RW, WOOLSON RF. Residential radon exposure and lung cancer: evidence of an urban factor in Iowa. *Health Physics* 1994; 66(3):263-269.
67. PIRARD P. Analyse écologique de la relation entre l'exposition au radon dans l'habitat et la mortalité par cancer du poumon en France. IPSN, Inserm, editors. 1-178. 2000.

68. PIRARD P, HUBERT P. Le radon en Bretagne. Evaluation de l'exposition et du risque associé. IPSN, editor. 1-69. 2000.
69. POPE CA, III, BURNETT RT, THUN MJ, CALLE EE, KREWSKI D, ITO K et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287(9):1132-1141.
70. PRICE PN, NERO AV, GELMAN A. Bayesian prediction of mean indoor radon concentrations for Minnesota counties. *Health Phys* 1996; 71(6):922-936.
71. REIMER GM, GUNDERSEN LCS. A direct correlation among indoor Rn, soil gas Rn and geology in the reading prong near Boyertown, Pennsylvania. *Health Physics* 1989; 57:155-160.
72. REIMER GM, GUNDERSEN LCS, SZARZI SL, BEEN JM. Reconnaissance approach to using geology and soil-gas radon concentrations for making rapid and preliminary estimates of indoor radon potential. *Radiat Prot Dosimetry* 1993; 45:171-181.
73. RICAN S, SALEM G, JOUGLA E. Geographic differences of broncho-pulmonary cancer mortality in France and spatial scales of analysis: significance of scale change in health geography. *Rev Epidemiol Sante Publique* 1999; 47(5):411-420.
74. RICHARDSON RB, EATOUGH JP, HENSHAW DL. Dose to red bone marrow from natural radon and thoron exposure. *Br J Radiol* 1991; 64(763):608-624.
75. ROGEL A, LAURIER D, TIRMARCHE M, QUESNE B. Lung cancer risk in the French cohort of uranium miners. *J Radiol Prot* 2002; 22(3A):A101-A106.
76. SACHS HM, HERNANDEZ T.L, RING JW. Regional geology and radon variability in buildings. *Environment International* 1982; 8(1-6):97-103.
77. STRAND T, GREEN BMR, LOMAS PR. Radon in Norwegian dwellings. *Radiat Prot Dosimetry* 1992; 45(1/4): 503-508.
78. STRANDEN E. Radon-222 in Norwegian dwellings. In: Hopke PK ed. *Radon and its decay products: Occurrence, properties, and health effects*. Washington, DC: American Chemical Society, 1987: 70-83.
79. TANNER AB. Indoor radon and its sources in the ground: U.S. Geol. Survey. Open File Report 86-222, 1-5. 2003.
80. TIRMARCHE M. [Radon and cancer risk: epidemiological studies after occupational or domestic exposure]. *Rev Epidemiol Sante Publique* 1995; 43(5):451-460.
81. TUBIANA M. The carcinogenic effect of low doses: the validity of the linear no-threshold relationship. *Int J Low Radiat* 2003; 1(1).
82. United Nations. Sources and effects of ionizing radiation. United Nation Scientific Committee on the effects of atomic radiation, 1994 report to the general assembly, with scientific annexes. E.94.IX.11. 1994. New York, United Nations.
83. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000.
84. WRIXON AD, GREEN BMR, LOMAS PR, MILES JCH, CLIFF KD, FRANCIS EA et al. Natural radiation exposure in UK Dwellings. Natural Radiological Board, editor. 1-188. 1988.

7. Définition des sigles utilisés

Afnor	Association française de normalisation
BEIR	Biological Effects of Ionizing Radiations
Bq.m ⁻³	Becquerels par mètre cube
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CépiDc	Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc)
Circ	Centre international de recherche sur le cancer (Circ)
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
CSP	Catégories socio-professionnelles
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
Ddass	Direction départementale des affaires sanitaires et sociales
DGS	Direction générale de la santé
DGSNR	Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection
DGUHC	Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction
Drass	Direction régionale des affaires sanitaires et sociales
DDE	Direction départementale de l'équipement
ENSP	Ecole nationale de santé publique
H.A.P	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
Ined	Institut national d'études démographiques
Inra	Institut national de recherche agronomique
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
InVS	Institut de veille sanitaire (InVS)
InVS-DSE	Institut de veille sanitaire - Département santé environnement
IPSN	Institut de protection et de sûreté nucléaire
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
IRSN-DPRE	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'environnement
IRSN-DPHD	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'homme et de dosimétrie
MEDD-DPPR	ministère de l'Ecologie et du Développement durable - Direction de la protection et de la prévention des risques
NRPB	National Radioprotection Board
PMSI	Programme médicalisé des systèmes informatiques
UV	Ultraviolets
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WLM	Working Level Month

8. Glossaire

Activité volumique : activité (radioactivité) des radio nucléides par unité de volume.

Analyse épidémiologique conjointe : caractérisée par la mise en commun des données brutes de plusieurs études épidémiologiques pour la réalisation de l'analyse.

Bâtiment résidentiel : bâtiment accueillant uniquement des logements.

Bâtiment résidentiel individuel : bâtiment n'accueillant qu'un logement. Appelé aussi pavillon.

Bâtiment résidentiel collectif : bâtiment accueillant plusieurs logements.

Bq : unité exprimant l'activité. Elle correspond à une désintégration par seconde.

Bq.m⁻³ : unité de mesure de l'activité volumique du radon = nombre de désintégrations par seconde par mètre cube.

Débit d'exposition (de dose) : quantité de dose absorbée délivrée par unité de temps.

Demi-vie radioactive : temps nécessaire à une substance radioactive pour perdre 50 % de son activité de désintégration.

Déviat ion géométrique standard : la déviat ion géométrique standard d'une distribution log-normale est l'exponentielle de la déviat ion standard de la distribution normale associée.

Distribution log-normale : distribution telle que les logarithmes des valeurs d'un échantillon tiré au sort ont une distribution normale.

Distribution normale : distribution qui se réfère à la courbe en forme de cloche symétrique de part et d'autre d'une valeur centrale formée par un échantillon tiré au sort.

Dose : quantité d'énergie délivrée à un tissu à la suite d'une exposition.

Dose absorbée : quantité d'énergie moyenne distribuée par une radiation ionisante à une matière quelconque par unité de masse.

Effet de débit d'exposition (de dose) inverse : effet tel que la probabilité de survenue du cancer, pour une exposition (une dose) donnée augmente quand le débit d'exposition (de dose) diminue.

Effet sub-multiplicatif : effet inférieur à l'effet anticipé si les effets joints de deux agents causaux étaient le produit de leurs risques propres, mais supérieur à l'addition de ces risques.

Energie alpha potentielle : l'énergie alpha potentielle se définit comme la somme des énergies des particules alpha des descendants du radon qui sont émises lorsque tous les produits de filiation à vie courte du radon, contenu à un instant donné dans un volume d'air pris comme unité, se sont désintégrés.

Equilibre radioactif : l'état d'équilibre radioactif est atteint quand l'activité volumique du radon gaz est égale à l'activité volumique de tous les produits de filiation du radon. Cet état est atteint dans un système fermé (pas d'ajout de source, pas de sortie de descendants) au bout d'un certain temps.

Etude écol ogique : méthode d'analyse épidémiologique dans laquelle, pour le radon, les taux régionaux d'incidence de cancer (ou de mortalité spécifique) son reliés à des estimateurs régionaux de concentration de radon (le plus souvent moyenne ou médiane de la distribution des concentrations du radon).

Exposition : condition de contact entre un organisme et un agent physique ou chimique. Elle dépend du temps de présence en contact et de la quantité contactée.

Exposition domestique au radon : exposition au radon et à ses descendants par la fréquentation de son logement.

Facteur d'équilibre : les descendants à vie courte du radon 222 sont des particules solides. Aussi, en pratique, ils se déposent en partie sur les parois ou sont éliminés par la ventilation. L'état d'équilibre n'est jamais atteint. Ils ne contribuent pas tous à l'exposition et ne sont pas tous mesurables. Aussi pour

qualifier cet état de déséquilibre, on utilise le facteur F qui est le rapport entre l'énergie alpha potentielle d'un mélange de descendants du radon et l'énergie alpha potentielle relative au mélange s'il était en équilibre avec le radon.

Gray (Gy) : unité de dose absorbée. Un Gy est équivalent à la délivrance d'une Joule par kg.

Ingestion : action d'amener de l'air, un liquide ou un solide dans les voies digestives par déglutition. L'ingestion du radon ou de ses descendants contenus dans l'eau peut être une voie d'exposition, la plupart du temps mineure, mais pouvant être parfois plus importante.

Inhalation : action d'amener de l'air dans les poumons par inspiration. Il s'agit de la principale voie d'exposition au radon et à ses descendants.

Isotopes : les nucléides qui ont un même nombre de protons dans leur noyau ont le même nombre atomique. Mais ils peuvent différer par le nombre de leurs neutrons et donc par leur nombre de masse. On les appelle alors des isotopes. Ils ont presque toujours les mêmes propriétés chimiques, mais certains sont plus instables que d'autres d'où leurs propriétés radioactives.

Lieux ouverts au public : dénomination officielle des pièces ou atmosphères accueillant du public. Nouvelle dénomination officielle comprenant à la fois les établissements et bâtiments recevant du public, et aussi les atmosphères confinées des grottes et espaces souterrains.

Locaux à usage professionnel : locaux utilisés pour exercer une profession. Dénomination officielle des pièces ou des atmosphères intérieures dans lesquelles des professions sont exercées.

Moyenne géométrique : la moyenne géométrique d'un échantillon de nombres positifs est l'exponentielle de la moyenne arithmétique de leurs logarithmes.

Particule alpha : particule formée de deux neutrons et deux protons émise du noyau de certains isotope radioactifs lors du processus de désintégration. Cette particule est positivement chargée et ne peut être distinguée du noyau d'un atome d'Hélium.

Radiation : énergie émise sous forme d'ondes ou de particules par des atomes radioactifs résultant de la désintégration de ceux-ci.

Radiation gamma : champs électromagnétiques de très courte fréquence d'origine nucléaire, similaires aux rayons X mais usuellement d'énergie supérieure (100 KeV à 1 MeV).

Radiations à haut degré d'énergie (high let radiations) : elles concernent les particules chargées et lourdes comme les alpha ou les protons qui ont la particularité de provoquer une grande densité d'événements ionisants proches les uns des autres à l'échelle d'un noyau cellulaire.

Radiation ionisante : radiation suffisamment énergétique pour déloger un électron d'un atome causant la formation d'une paire d'ion. Les radiations ionisantes incluent les rayons gamma et x, les particules alpha (noyaux d'Helium), les particules beta (électrons) et d'autres formes de noyaux chargés. Les neutrons ont une action ionisante indirecte en percutant en premier les composants des noyaux.

Radioactivité : propriété liée à la désintégration d'un nucléide produisant des ondes ou des particules.

Radioactivité naturelle : il existe sur la terre plus de 50 radio nucléides d'origine naturelle.

Radio-nucléide : atome spécifique que la constitution de son noyau rend radioactif.

Radon : gaz radioactif d'origine naturelle provenant de la chaîne de désintégration de l'uranium et produisant des descendants particuliers radioactifs.

Temps de latence : il s'agit du temps nécessaire à la manifestation d'une maladie après une exposition à un facteur causant. Pour le cancer et les radiations, ce temps est de plusieurs années.

Working Level : unité de mesure de l'énergie alpha potentielle contenue dans un volume d'air utilisée dans les mines d'uranium. 1 WL est égal à $2,08 * 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}$.

WLM (Working Level Month) : unité d'exposition utilisée pour les mineurs d'uraniums équivalent au fait de travailler 170 h (un mois) dans une atmosphère de 1 WL.

9. Annexes

- Annexe I :** Lettre DGS du 12 mars 2001 : « relative au programme de travail sur la surveillance des effets sur la santé liés à des expositions aux rayonnements ionisants »
- Annexe II :** Présentation des projets d'arrêté relatifs aux modalités de gestion du risque lié au radon et à l'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public
- Annexe III :** Principes, construction et présentation des coefficients de risque proposés par la CIPR 65 et le BEIR VI, précisions sur les incertitudes associées
- Annexe IV :** Travaux effectués par le BRGM et énoncé des informations à réunir pour la base de données
- Annexe V :** Précisions sur les limites de la cartographie (BRGM)
- Annexe VI :** Présentation plus détaillée et plus complète des indicateurs d'impact pouvant être utilisés pour caractériser les risques liés au radon
- Annexe VII :** Identification des informations associées aux variables qu'il est souhaitable d'intégrer dans la base de données
- Annexe VIII :** Données disponibles concernant la géologie
- Annexe IX :** La cartographie du potentiel d'exhalation du radon des sols (IRSN)^o

Annexe I

Lettre DGS

 **MINISTÈRE DE L'EMPLOI
ET DE LA SOLIDARITÉ**

Institut de Veille Sanitaire
15 MARS 2001
ARRIVÉE

République Française
Paris, le 12 MARS 2001

Direction Générale de la Santé
Sous-direction de la gestion des risques des milieux
DGS/SD7D n° 0 1 - 3 8 3

Personne chargée du dossier: C. Rougy
Tél. : 01 40 56 50 35
E-mail: christel.rougy@sante.gouv.fr
L-gt.doc

**Monsieur le Directeur Général de
l'Institut de Veille Sanitaire**
12 rue du Val d'Osne
94415 St Maurice Cedex

A l'attention de M. Philippe Quénel – Département Santé-Environnement

Objet : Programme de travail sur la surveillance des effets sur la santé liés à des expositions aux rayonnements ionisants

Par lettre du 11 février 2000, l'InVS proposait au directeur général de la santé de présider une réunion pour le lancement d'un programme de travail sur la surveillance des effets des rayonnements ionisants sur la santé, ce travail s'inscrivant à la suite des propositions du Pr. Spira. Ce programme devait permettre de définir les actions prioritaires à inscrire dans le contrat d'objectifs et de moyens de l'InVS.

Suite à la réunion du 27 avril 2000, quatre thèmes ont été retenus:

- ◆ les expositions des populations aux rayonnements ionisants dans le cadre des applications médicales chez les travailleurs du secteur médical comme en population générale,
- ◆ la préparation aux situations accidentelles et au suivi post-accidentel,
- ◆ le développement des registres de pathologies (leucémies, cancers de la thyroïde...),
- ◆ la surveillance autour des sites en tirant parti du retour d'expérience de ce qui a été fait dans le Nord-Cotentin.

L'InVS a alors constitué trois groupes de travail: surveillance épidémiologique des risques liés aux rayonnements ionisants autour des sites et préparation épidémiologique aux situations accidentelles, surveillance des expositions aux rayonnements ionisants dans le cadre des applications médicales, surveillance des expositions aux rayonnements ionisants d'origine naturelle.

Lors des dernières réunions de travail de ces groupes, il est apparu nécessaire de définir des orientations prioritaires de travail en raison du temps imparti, les recommandations pratiques devant être finalisées pour septembre 2001. Ainsi, je tiens à vous faire part des priorités envisagées par mon département ministériel.

8, avenue de Ségur, 75350 PARIS 07 SP p.1/3

Groupe de travail "surveillance des expositions aux rayonnements ionisants d'origine naturelle"

Concernant l'exposition de la population générale aux rayonnements ionisants d'origine naturelle, il semble que **la priorité doit être donnée à l'exposition au radon**, car d'une part l'exposition au radon représente une part importante de l'exposition moyenne de la population aux rayonnements ionisants toutes sources confondues et d'autre part, il est possible d'agir sur cette exposition dans le cadre d'une stratégie de gestion des risques, ce qui est moins le cas de l'exposition aux rayonnements gamma. L'objectif serait de mieux cerner les expositions au radon de la population générale et en particulier des enfants, de façon à pouvoir procéder à une évaluation du risque à l'échelle de la population française tout en faisant apparaître les disparités régionales.

A ce titre, il est demandé à l'institut de réfléchir à l'opportunité de reproduire le travail effectué par l'IPSN à la demande de la DRASS Bretagne (rapport joint), pour d'autres régions de France où le risque sanitaire lié à l'exposition au radon est susceptible d'être important en terme de dose collective.

Le groupe pourra également réfléchir à l'opportunité de mener de nouvelles études épidémiologiques concernant l'exposition au radon.

Par ailleurs, il se dégage de la précédente réunion un thème qui dépasse le seul cadre de travail du groupe exposition aux rayonnements d'origine naturelle. Il s'agirait de mieux caractériser l'exposition de la population aux rayonnements ionisants toutes sources confondues. L'objectif est de disposer d'un outil permettant de caractériser, plus précisément qu'à l'heure actuelle, l'exposition de population en fonction de son lieu de résidence, de son âge, de ces habitudes de vie, etc... en vue d'une aide à la gestion des risques associés à l'exposition aux rayonnements ionisants aussi bien dans un contexte de crise que hors contexte de crise (ex: gestion de crise du type de celles concernant la découverte de radioactivité sur les plages de Camargue, comparaison de l'exposition de la population à la limite annuelle de 1 mSv retenu par la directive EURATIOM 96/29 pour les pratiques). Ce thème paraît aujourd'hui moins prioritaire que le radon et pourrait être traité après la mise en place du futur IRSN.

Groupe de travail "surveillance des expositions aux rayonnements ionisants dans le cadre des applications médicales"

L'exposition médicale à but diagnostique est estimée en moyenne à 1,5 mSv/an, ce qui représente une part importante de l'exposition globale moyenne aux rayonnements ionisants (4 mSv/an). Ainsi, je suis favorable à l'orientation prioritaire dégagée par le groupe de travail de mieux caractériser et estimer les expositions médicales. Ceci afin de mettre en place un système de surveillance, basé sur la mise en commun des données disponibles ou de données supplémentaires à recueillir, pour mettre en relation les expositions médicales et les risques associés. Le groupe de travail pourra également retenir des populations particulières (ex: prématurés) ou des pratiques médicales d'exposition aux rayonnements ionisants (ex: tomodensitométrie, panoramique dentaire) sur lesquelles des études plus spécifiques, rétrospectives ou prospectives, pourraient être mises en place.

La réflexion devra tenir compte des travaux déjà engagés, notamment ceux entamés dans le cadre de la transposition de la directive EURATOM 97/43.

Groupe de travail "surveillance épidémiologique des risques liés aux rayonnements ionisants autour des sites et préparation épidémiologique aux situations accidentelles"

Ce groupe de travail, lors de sa dernière réunion, a retenu deux axes de travail:

- l'élaboration d'une doctrine sanitaire pour préciser les outils de surveillance autour des sites nucléaires (utilité des études épidémiologiques spécifiques autour d'un site nucléaire, registres des cancers,...).
- définition et modalité de recueil des données sanitaires pendant la phase d'urgence des accidents nucléaires pour conduire les études épidémiologiques de la phase post-accidentelle.

Il apparaît aujourd'hui, que les recommandations qui pourraient être issues de ce groupe, seraient très dépendantes, pour leur mise en œuvre pratique, de la création de la DGSNR. Dans ce contexte, les travaux de ce groupe, malgré leurs intérêts, me paraissent moins prioritaires pour la DGS et pourraient être repris après la mise en place de cette nouvelle direction interministérielle.

Par ailleurs, j'attire votre attention sur la nécessité d'établir une convention de collaboration entre l'InVS et l'IPSN (ou le futur IRSN) dans le domaine des rayonnements ionisants. Ceci afin de pouvoir mobiliser les équipes des deux instituts sur des projets communs (études épidémiologiques ou des évaluation des risques), s'appuyant sur les recommandations qui seront issues des groupes de travail et dans le cadre des priorités définies ci-dessus, en particulier en ce concerne les expositions au radon.

Le directeur général de la santé



Professeur Lucien ABENHAIM

Annexe II

Présentation des projets d'arrêté relatifs aux modalités de gestion du risque lié au radon et à l'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public

Rédacteur :

Christel ROUGY Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR)

Le contexte – rappel sur les textes antérieurs encadrant la gestion du risque radon

La recommandation européenne du 21 février 1990 relative à la protection de la population contre les dangers résultant de l'exposition au radon à l'intérieur des bâtiments est le premier texte européen donnant des règles de gestion du risque lié au radon. Elle recommande, notamment, que les États membres mettent en place « une information adéquate de la population » et un « système approprié de réduction de toute exposition au radon à l'intérieur des bâtiments ». Pour cela, elle propose des niveaux de référence à comparer à la valeur moyenne annuelle de radon dans les bâtiments. Au-delà de ces niveaux, des mesures « d'abaissement du niveau de radon seront envisagées ». La recommandation propose des niveaux de référence de 400 Bq/m³ pour les bâtiments existants, et un niveau de 200 Bq/m³ pour les bâtiments futurs.

En France, jusqu'à la publication de l'ordonnance du 28 mars 2001, la gestion du risque lié au radon était encadrée par voie de circulaires. Il existe trois circulaires principales :

- la circulaire DGS/DGUHC du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon ;
- la circulaire DGS du 20 mai 1999 relative à l'interprétation sanitaire des mesures de concentration du radon ;
- la circulaire DGS du 2 juillet 2001 relative à la gestion du risque lié au radon dans les établissements recevant du public (ERP).

Ces trois circulaires organisent la stratégie de la gestion du risque radon en France. Elle est basée sur les principaux points suivants :

niveaux de référence :

La circulaire du 27 janvier 1999 introduit trois niveaux de référence : 400 et 1 000 Bq/m³ pour les bâtiments existants, et 200 Bq/m³ pour les bâtiments à construire, niveau qui devait être fixé par voie réglementaire pour tenir compte des phénomènes de vieillissement des bâtiments. Le niveau de 1 000 Bq/m³ est issu de l'avis du CSHPF-Section radioprotection concernant le radon dans les habitations et les établissements recevant du public (ERP).

Ainsi, pour les bâtiments existants, la circulaire indique qu'en dessous de 400 Bq/m³, la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière, entre 400 et 1 000 Bq/m³, il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples et au-dessus de 1 000 Bq/m³, des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être conduites à bref délai. La fermeture de l'établissement peut être également envisagée au-delà de ce niveau jusqu'à la réalisation des actions correctrices, en fonction de la fréquentation du lieu.

zones géographiques prioritaires :

Les circulaires du 27 janvier 1999 et du 2 juillet 2001⁹ définissent une liste de départements prioritaires pour la gestion du risque radon. Ces départements ont été déterminés sur la base des mesures de radon déjà réalisées par l'IPSN et les Ddass lors de plusieurs campagnes de mesure du radon dans l'habitat domestique. Lorsque la moyenne des mesures dépasse 100 Bq/m³, le département est classé comme prioritaire. Dans ces départements, les Préfets doivent établir un plan d'action qui comporte une campagne de mesures systématiques dans les ERP, en particulier les établissements scolaires et les établissements sanitaires et sociaux, et un dispositif d'information des populations.

Sur les autres départements, avant la réalisation du plan d'action, une recherche des zones à fort potentiel d'exhalaison de radon doit être menée. La campagne de mesure se déroule ensuite dans les ERP de ces zones.

Construction de la base juridique pour gérer le risque lié au radon en France

Ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001

La transposition de la directive EURATOM 96/29 fixant les normes de base relatives à la protection de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants a permis d'introduire par voie d'ordonnance un nouvel article dans le code de la santé publique. Cet article (L.1333-10) traite des questions relatives à l'exposition aux rayonnements naturels. Il introduit l'obligation, pour les propriétaires de lieux ouverts au public, de «mettre en œuvre des mesures de surveillance de l'exposition, lorsque celle-ci est de nature à porter atteinte à la santé du public».

Décret n°2002-460 du 4 avril 2002

En application de l'article L.1333-10, le décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants apporte des précisions complémentaires.

- *Article R. 43-10.* : l'obligation de surveillance du radon est applicable dans des zones géographiques où le radon d'origine naturelle est susceptible d'être mesuré en concentration élevée et dans des locaux où le public est susceptible de séjourner pendant des périodes significatives, les mesures devront être réalisées par des organismes agréés par le ministre chargé de la Santé, ces mesures devront être effectuées dans un délai de 2 ans à compter de la publication des arrêtés d'application et elles seront répétées tous les 10 ans et à chaque fois que sont réalisés des travaux modifiant la ventilation ou l'étanchéité du bâtiment vis-à-vis du radon.
- *article R. 43-11.* : les résultats de mesures sont communiqués aux personnes qui fréquentent l'établissement, au chef d'établissement, aux représentants du personnels et aux médecins du travail lorsque l'immeuble comporte des locaux de travail, ils sont tenus à disposition des agents de services de l'Etat concernés, des inspecteurs du travail et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Deux arrêtés d'application sont prévus par ce décret : un arrêté des ministres chargés de la Santé et de la Construction pour définir les critères d'agrément des organismes chargés de réaliser les mesures de radon et un arrêté des ministres chargés de la Santé, du Travail, de la Construction et de l'Environnement, qui précise les conditions d'application de l'article R. 43-10.

Présentation des projets d'arrêté (version de mars 2003 encore susceptible de modifications)

Projet d'arrêté relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public

Ce projet d'arrêté précise les zones géographiques et les lieux ouverts au public pour lesquels les mesures de radon sont rendues obligatoires :

- les zones géographiques correspondent aux départements classés comme prioritaires dans les circulaires présentées précédemment. Cette liste sera mise à jour après avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire ;
- les catégories de lieux ouverts au public concernés par les obligations de mesures du radon sont les établissements d'enseignement, les établissements sanitaires et sociaux qui hébergent des personnes, les établissements thermaux, les établissements pénitentiaires ;

⁹ La circulaire du 2 juillet 2001 a mis à jour la liste des départements prioritaires en ajoutant 4 départements : l'Ariège, la Haute-Marne, les Hautes-Pyrénées, la Saône et Loire.

- en dehors des départements prioritaires, le propriétaire d'une des catégories d'établissements citées précédemment dans lesquels est mesuré un niveau de radon qui dépasse 400 Bq/m³ est soumis aux prescriptions de l'arrêté.

De plus, le projet d'arrêté définit les obligations du propriétaire de l'établissement.

- Il fait réaliser un dépistage de son bâtiment, puis, si au moins un des résultats dépasse le niveau d'action de 400 Bq/m³, le propriétaire fait mettre en œuvre des actions immédiates pour abaisser l'exposition des personnes au radon (rectification des dysfonctionnements des systèmes de ventilation, étanchement de voies de pénétration du radon dans le bâtiment).
- L'efficacité des mesures immédiates peut être définitive ou provisoire. Le propriétaire doit alors vérifier l'efficacité de ces actions. Si le niveau de radon persiste au-dessus de 400 Bq/m³, le propriétaire doit faire réaliser des investigations complémentaires pour identifier la source, les voies d'entrée et de transfert du radon dans le bâtiment.
- Sur la base de ces investigations complémentaires et d'un diagnostic du bâtiment, le propriétaire fait réaliser des travaux dans un délai de 1 an. Enfin, l'efficacité de ces travaux est vérifiée selon les mêmes conditions de mesures qu'employées pour le dépistage.
- Les propriétaires ayant déjà réalisé des mesures de radon avant la publication de l'arrêté seront dispensés de les réaliser à nouveau.
- Les propriétaires ayant réalisé des mesures de radon et, le cas échéant, des travaux, doivent consigner dans un registre les résultats de mesures, l'emplacement du bâtiment où ont été réalisées ces mesures et les coordonnées des organismes les ayant effectuées. Ces registres sont tenus à disposition des agents chargés du contrôle. En cas de changement de propriétaire, ce registre doit être transmis au nouveau propriétaire.

Projet d'arrêté relatif aux conditions d'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public

L'arrêté prévoit 2 niveaux d'agrément : un premier niveau pour les étapes de dépistage et de contrôle de l'efficacité des travaux de remédiation et un deuxième niveau pour les investigations complémentaires (investigations préalables aux travaux qui permettent de déterminer les voies d'entrées du radon dans le bâtiment) qui demandent de maîtriser toutes les techniques de mesures du radon (intégrée, ponctuelle, en continu).

Les organismes seront agréés sur plusieurs critères : l'indépendance par rapport aux organismes susceptibles de proposer des travaux de remédiation, la mise en place d'un système d'assurance qualité, la formation ou la qualification du personnel pour la mesure du radon, les matériels utilisés, la qualité des rapports d'intervention déjà réalisés le cas échéant. Pour un renouvellement d'agrément, la qualité de l'activité de l'organisme sera également évaluée. Les organismes devront déposer un dossier de demande d'agrément à la DGSNR.

L'agrément est accordé ou refusé après avis d'une commission nationale d'agrément composée de représentants des ministères chargés de la Santé, du Logement et du Travail, d'organismes techniques (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Centre scientifique et technique du bâtiment, Conseil supérieur d'hygiène publique de France, Comité professionnel de la prévention et du contrôle technique dans la construction) et des professionnels concernés par la mesure du radon.

L'agrément sera accordé, pour un premier agrément, pour une période de 1 an, et, pour un renouvellement d'agrément, pour une période de 3 ans.

Les organismes agréés doivent établir un rapport d'activité annuel et le transmettre à la DGSNR. Ce rapport comprend notamment par département le nombre de lieux ouverts au public investigués et les résultats de ces investigations.

Annexe III

Principes, construction et présentation des coefficients de risque proposés par la CIPR 65 et le BEIR VI, précisions sur les incertitudes associées

Rédacteur :

Philippe PIRARD Institut de veille sanitaire – Département santé environnement (InVS-DSE)

CIPR 65

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) est une organisation internationale non gouvernementale qui effectue des synthèses et des propositions de gestion du risque radiologique. Le modèle développé par la CIPR65 (2) se base sur les résultats du BEIR IV (4) qui tient compte de la durée de temps depuis l'exposition et de l'âge atteint permettant **de calculer un coefficient de risque relatif**. Une transformation du coefficient de risque est appliquée quand on passe des mineurs aux expositions domestiques pour tenir compte des différences de débit de dose et de durée d'exposition au risque (vie entière). **Ce coefficient de risque relatif est de 0,8 % pour un an passé dans une maison présentant en moyenne 230 Bq/m³ de radon (1WLM)**. Avec cette valeur, il faut passer environ 30 ans dans une habitation avec une concentration moyenne de 1 000 Bq.m⁻³ au radon pour doubler le risque de base. La CIPR considère que le temps moyen de présence au domicile est 80 % de l'année et que le facteur d'équilibre est égal à 0,4.

L'objectif de la construction du modèle de la CIPR est de proposer un indicateur résumé et facile à utiliser qui est une probabilité de décéder au cours de sa vie d'un cancer du poumon (risque absolu vie entière : RAVE ; en anglais (life long risk probability of radon induced cancer death)) lié à une exposition au radon pour un an passé dans une maison à une concentration donnée. Le risque absolu de décéder sur la vie entière est alors obtenu sur la base des courbes de survie de populations standard européennes, américaines et japonaises. **Une personne séjournant un an dans un domicile où la concentration en radon est en moyenne 230 Bq.m⁻³ augmente de 2,83.10⁻⁴ sa probabilité de décéder d'un cancer du poumon dans sa vie (RAVE # 3.10⁻⁴)**. Le modèle proposé est le même pour les hommes, les femmes, les fumeurs et non fumeurs, les enfants et les adultes. Il s'agit donc d'un indicateur " très global " à utiliser dans une optique de gestion générale. De plus, l'exposition est considérée ponctuellement (sur un an) et les expositions antérieures ou postérieures n'ont pas d'influence. Un tel coefficient présente l'avantage de donner très rapidement un ordre de grandeur de l'impact d'une exposition pour une personne « moyenne ». Ce n'est par contre en aucun cas un outil qui permet de prédire de façon fiable et précise une probabilité de décès pour un individu donné. En effet, il est très dépendant du risque de base de décéder d'un cancer du poumon en dehors de l'exposition au radon. Celui ci est par exemple très différent chez un fumeur et un non fumeur. Un fumeur a près d'une chance sur 10 de mourir d'un cancer du poumon, tandis qu'un non fumeur a près d'une chance sur 100. Multiplier ces risques de base n'a en réalité pas le même impact absolu. Si une personne est fortement exposée au radon, par exemple à une concentration durant une période donnée qui multiplie le risque par 2, la probabilité pour une personne de décéder d'un cancer du poumon en rapport avec cette exposition sera de 2 % pour le non fumeur et 20 % pour le fumeur.

BEIR VI

Le modèle de prédiction de risque utilisé par le comité du BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiations de l'Académie nationale des sciences des Etats-Unis (3) se base sur les résultats de l'analyse conjointe des cohortes de mineurs en 1994 (5). Il est destiné à estimer l'impact du radon dans les logements sur l'ensemble d'une population, même si moyennant quelques modifications, il peut être utilisé dans d'autres situations. Il retient des paramètres plus nombreux. Ce modèle est un modèle multiplicatif qui

estime un coefficient d'excès de risque relatif par unité d'exposition. **Il tient compte de l'âge atteint et du délai écoulé depuis l'exposition, ainsi que de la durée de l'exposition ou de son intensité.** Le BEIR VI propose une alternative que l'utilisateur doit trancher. Le modèle "exposition-âge-concentration" accorde plus d'importance à l'effet de la concentration (intensité) qu'à celui de la durée de l'exposition pour une même exposition cumulée. Le modèle "exposition-âge-durée" accorde plus d'importance à l'effet de la durée de l'exposition qu'à celui de la concentration. Les paramètres du modèle, contrairement à la CIPR, portent aussi sur les expositions antérieures et postérieures. Le BEIR VI ne fournit donc pas de coefficient "résumé", mais une équation qu'il faut appliquer à la population d'une zone, dont il faut connaître la démographie (taux de décès généraux et taux de décès pour le cancer du poumon, car le BEIR VI ne fournit que le risque relatif) et le profil de l'exposition au cours de la vie pour estimer âge par âge, la probabilité de décéder d'un cancer du poumon due à l'exposition cumulée au radon. Il n'y a donc pas d'indicateur synthétique.

Pour estimer le risque, les experts du BEIR VI considèrent que le facteur d'équilibre est de 0,4 et que les particuliers passent 70 % de leur temps à domicile et non 80 % comme cela est stipulé dans la CIPR. Ceci introduit une légère différence pour l'extrapolation à partir des données des mineurs, que l'on peut cependant juger négligeable au vu des incertitudes du calcul.

Les coefficients de risque relatif sont identiques pour les deux sexes. Pour tenir compte de l'effet conjoint du tabac et du radon, l'utilisateur doit faire un choix. Les experts du BEIR ont noté que l'interaction n'était pas parfaitement multiplicative, les risques relatifs étant plus élevés chez les mineurs non fumeurs que chez les mineurs fumeurs ou ex-fumeurs. Les estimations n'étant pas très précises, ils laissent cependant choisir entre l'utilisation de deux coefficients ou d'un coefficient unique (c'est-à-dire que proportionnellement le radon a le même effet chez les fumeurs que chez les non fumeurs).

Précisions sur les hypothèses scientifiques avancées pour justifier de la plausibilité de l'effet aux plus faibles expositions

Si les résultats des études épidémiologiques plus récentes apportent un faisceau d'arguments en faveur de la cancérogénicité des expositions au radon à des niveaux et des débits fréquemment rencontrés dans l'habitat, ils ne peuvent être informatifs pour les expositions les plus courantes qui sont de quelques dizaines de $Bq.m^{-3}$. Il existe cependant une base théorique en faveur de l'absence d'effet seuil dans le domaine de l'exposition au radon et du risque de cancer pulmonaire (3). L'énergie déposée par une particule alpha est suffisante pour induire des lésions de l'ADN telles que les mécanismes de réparation peuvent être mis en défaut. Les mécanismes de la cancérogénèse sont en faveur d'une origine monoclonale possible. On découvre par ailleurs l'existence de by-standing effects entraînant des modifications de l'ADN de cellules non directement touchées par les rayonnements. Les résultats de certaines études expérimentales ont montré un effet mutagène des rayonnements alpha sur les cellules pour une exposition de l'ordre d'un rayon durant la vie de celles-ci. De tels travaux demandent cependant à être confirmés et précisés (6). On attend beaucoup de la biologie moléculaire et d'une meilleure compréhension des modèles de cancérogénèse pour confirmer et préciser ces effets.

Précisions sur l'état des connaissances quant au risque de cancer du poumon lié à l'exposition au radon durant l'enfance

La même question se pose au sujet des expositions durant l'enfance. Il existe notamment des différences de physiologie respiratoire qui peuvent modifier les niveaux d'exposition pour un même niveau d'activité volumique. Un certain nombre d'arguments plaident en faveur d'un plus grand impact possible de l'exposition au radon. Le renouvellement plus important des cellules chez un être en croissance et en formation devrait entraîner une plus grande sensibilité au pouvoir carcinogène du radon (7). L'espérance de vie plus longue est responsable d'un temps d'exposition au risque de cancer plus important. Mais les informations épidémiologiques actuellement disponibles ne semblent pas confirmer cette hypothèse. Sur les mineurs, on a observé que le risque de développer un cancer du poumon en relation avec le radon diminue avec le temps écoulé depuis l'exposition (3). Il existe un sous-groupe des études de cohorte sur les mineurs d'uranium, entrés durant l'adolescence qui ne présente pas un coefficient de risque différent de celui de l'ensemble de la cohorte (1).

Etudier le risque de cancer du poumon en relation avec une exposition au radon dans l'enfance, nécessiterait de s'intéresser aux cas de cancer du poumon très précoces en population générale. Or ceux-ci sont rarissimes, l'essentiel des cancers du poumon se déclarant à partir de 50 ans. Les difficultés méthodologiques pour différencier l'exposition durant l'enfance de l'exposition à l'âge adulte dans le risque induit de cancer du poumon en fin de vie, expliquent ainsi sans doute pourquoi il n'existe aucune étude épidémiologique portant directement sur l'impact de l'exposition au radon dans l'enfance.

Bibliographie

1. BLOT WJ, XU ZY, BOICE JD JR., ZHAO DZ, STONE BJ, SUN J et al. Indoor radon and lung cancer in China. J Natl Cancer Inst 1990; 82(12):1025-1030.
2. CIRP. Protection against radon-222 at home and at work. 1-45. 1993.
3. Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Health effects of exposure to radon. Beir VI. Washington: 1999.
4. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. (Extraits). In: National Academy Press, editor. Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. Washington:1988:1-27.
5. LUBIN JH, BOICE JD JR., EDLING C, HORNUNG RW, HOWE G, KUNZ E et al. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground miners studies. NIH publication n°94-3644. 1-1-1994. Washington D.C. U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Health, National Cancer Institute.
6. MILLER RC, RANDERS-PEHRSON G, GEARD CR, HALL EJ, BRENNER DJ. The oncogenic transforming potential of the passage of single alpha particles through mammalian cell nuclei. Proc Natl Acad Sci USA 1999; 96(1):19-22.
7. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000.

Annexe IV

Travaux effectués par le BRGM et énoncé des informations à réunir pour la base de données

Rédacteurs :

D. BONIJOLY	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
J.C. BAUBRON	Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM)
J. PERRIN	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
M. URVOIS	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Identification des zones exposées au radon

Analyse des méthodologies mises en œuvre à l'étranger

Dans de nombreux pays (USA, Suède, Royaume-Uni, etc.) le classement du radon comme cancérigène par l'OMS en 1987, a conduit les pouvoirs publics à lancer une cartographie du risque encouru par les habitants. Cette cartographie est basée essentiellement sur la spectrométrie gamma aéroportée, ce qui permet une maille de restitution de l'ordre de 4 km (NRPB/BRS-UK).

Le Service géologique fédéral des Etats-Unis (USGS) a mis en œuvre un plan de gestion stipulant d'identifier d'abord des zones potentiellement exposées au radon, puis d'organiser une campagne de mesures et enfin de mobiliser les services des Etats pour une information optimale du public concerné (cf. site Internet <http://sedwww.cr.usgs.gov:8080/radon/georadon/>).

Analyse des expériences françaises

Deux types de cartes sont actuellement en cours de réalisation : la cartographie des données radon brutes, qui est une méthode de mesure directe du gaz soit à la surface du sol, soit à l'intérieur des bâtiments, et la cartographie du potentiel d'émanation du gaz qui est une cartographie de prévision (du risque d'émanation du radon) basée sur la géologie du territoire.

Les zonages opérationnels

En France, c'est au début des années 80 que l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN ex IPSN) a commencé les premières mesures du radon dans les bâtiments tant publics que privés, au moyen de dosimètres. Une couverture systématique du territoire métropolitain a été réalisée par l'IRSN (ex IPSN) et on a ainsi pu commencer des analyses statistiques sur ces mesures. Il existe actuellement 13 000 mesures réparties irrégulièrement pour l'ensemble du territoire (2). Elles permettent actuellement, en première approximation, de restituer des niveaux moyens de radon par département (cf. le site Internet <http://www.irsn.fr/informations/>).

Les cartes des moyennes départementales indiquent des activités volumiques de radon dans l'habitat français. Comme pour tout document de planification de risques naturels, le lecteur est invité à relativiser les résultats en fonction de la densité des mesures sur le terrain, qui pour l'instant, est faible. En effet, en attendant de disposer d'une densité supérieure, on extrapole à l'ensemble d'un département ou d'une commune, les mesures effectuées dans quelques habitations sélectionnées par les maires de quelques communes particulières, sans aucune relation évidemment, avec la géologie du sous-sol. La nature du sous-sol conditionne en effet les concentrations en radon via les concentrations en uranium des roches sous-jacentes des habitations, l'uranium étant l'élément d'origine de la chaîne de désintégration radioactive produisant le radon.

On ne dispose actuellement que de 13 000 mesures dans les bâtiments résidentiels pour 36 000 communes. Cela signifie qu'on ne peut caractériser le risque radon au niveau des communes sur la base des seules mesures disponibles à ce jour. De plus, ces mesures sont souvent difficilement comparables, par exemple certaines ont été réalisées en été, d'autres en hiver ; il est alors délicat de régionaliser de telles variables.

Néanmoins, on constate d'ores et déjà que la distribution n'est pas uniforme sur le sol français et qu'il existe des régions (Corse, Massif Central, Massif armoricain, Alpes du Nord) où l'activité moyenne du radon est plus élevée que dans le Bassin parisien ou le Bassin aquitain. Les données de même type, disponibles sur les autres pays européens indiquent que la France, en moyenne, comme l'Allemagne et la Suisse, est plus affectée que les Pays-Bas et le Royaume-Uni mais moins que la Suède et la Finlande (4,5).

Sur cette base, en 1999, les autorités de la santé publique ont engagé des campagnes de mesures complémentaires et de correction des mesures en fonction notamment de l'effet « saison ». Elles ont décidé de mettre en œuvre des plans de gestion du risque pour les bâtiments recevant du public (circulaire DGS/DGUHC 99/46 du 27 janvier 1999) (1). En Lorraine, le BRGM et l'IRSN ont effectué une première interprétation des mesures disponibles en Meurthe-et-Moselle. Le BRGM a ensuite effectué, en collaboration avec les Ddass de Moselle et Meurthe-et-Moselle une campagne de mesures dans le périmètre du Bassin ferrifère lorrain afin de déterminer les critères de contamination des habitations en fonction de la nature des formations géologiques et de la présence d'anciens travaux miniers ennoyés ou non. De la même manière, le BRGM a été amené à proposer aux pouvoirs publics une interprétation pour les départements de la Meuse et de la Haute-Marne à partir des données publiées par l'IRSN.

Les cartes BRGM

Dans le cadre de sa mission de service public, le BRGM a mis en œuvre en partenariat avec le ministère chargé de l'Équipement, le ministère chargé de la Santé et l'IRSN, une méthodologie puis une cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols. Elle s'appuie d'une part sur les données disponibles sur la radioactivité, d'autre part sur la géologie du sol et du sous-sol et enfin sur un contrôle à partir des mesures d'activité volumique en radon de l'IRSN.

Cette cartographie a commencé sur plusieurs régions, pilotes de l'initiative, comme les Pays de Loire, l'Aquitaine et la Corse.

La méthode repose sur une analyse combinatoire des paramètres suivants :

- teneurs en uranium des roches (source du radon) issues de la banque litho-géochimique ou de couvertures spectrométriques aéroportées (base de données et couvertures BRGM) ;
- mesures effectuées dans les habitations (DGS et IRSN) ;
- distance aux failles et autres drains naturels susceptibles de véhiculer le radon vers la surface (analyse structurale). En fonction de la précision des informations, ce paramètre peut être pondéré si l'on maîtrise la capacité du champ de contrainte actuel à maintenir certaines familles de fractures ouvertes ;
- distance aux gisements et indices uranifères connus (banque des données du sous-sol) ;
- distance aux sources thermales ou thermo-minérales (banque de données BRGM) ; il est à noter que toutes les sources ne sont pas radioactives.

En fonction des données disponibles et du problème à traiter, cette analyse est effectuée à partir des informations issues de la carte géologique numérique à l'échelle adaptée au problème à traiter, de la banque de données du sous-sol avec une restitution dont la maille élémentaire est fonction de la résolution minimum des informations traitées.

Le résultat est d'abord une carte où les formations de socle à teneur moyenne anormale en uranium sont identifiées et classées (potentialités forte, moyenne et faible). On y intègre les données issues du traitement des mesures géophysiques lorsqu'elles sont disponibles (levés spectrométriques aéroportés pour les zones de socle, diagraphies gamma ray pour les formations sédimentaires), les données structurales (issues de la carte géologique et de levés de détail et/ou de cartes dérivées de mesures magnétiques aéroportées lorsqu'elles sont disponibles).

On individualise ainsi les zones sources présentant la probabilité/potentialité la plus élevée de pouvoir émettre du radon à l'interface sol-atmosphère. Les résultats des traitements sont ensuite replacés dans le cadre des limites des communes concernées.

Des traitements complémentaires permettent de prendre en compte l'effet de la topographie sur la concentration potentielle du radon. En effet, les zones de crêtes et les reliefs de forme convexe sont des sites facilitant la dilution du radon dans le sol par admission d'air par le vent alors que les fonds de vallées sont des sites le plus souvent mal aérés et qui sont susceptibles de favoriser la concentration de radon dans l'air.

Finalement, l'analyse combinée et la pondération de l'ensemble de ces paramètres (fig. 1 à 4) permettent de proposer un zonage, par entité administrative. Ce zonage donne aux pouvoirs publics certains critères de priorité pour ordonner des mesures radon ciblées, dans les parties des communes où les potentialités d'émanation en radon sont les plus fortes, et où les populations pourront d'ores et déjà, éventuellement être informées par les mairies.

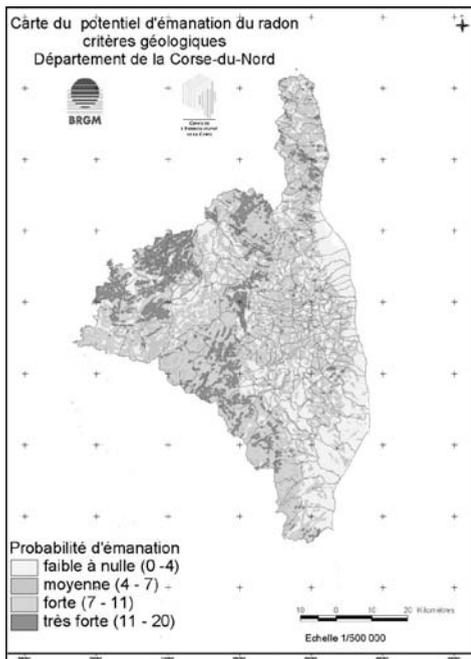


Fig. 1 : carte du potentiel d'émanation du radon basée sur des critères géologiques. Département de Haute-Corse

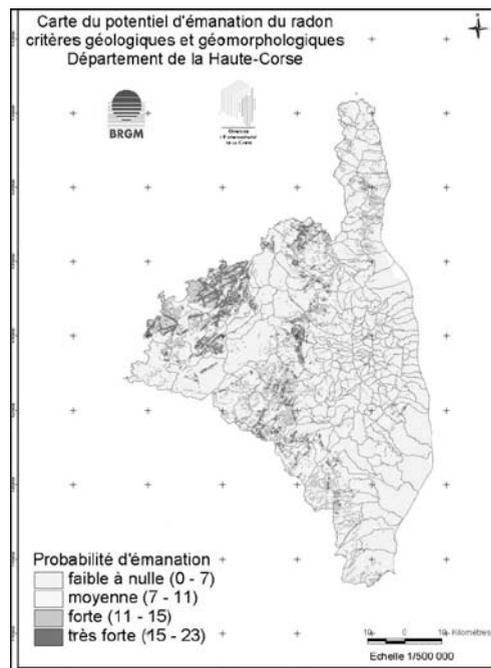


Fig. 2: carte du potentiel d'émanation du radon basée sur des critères géologiques et géomorphologiques. Département de Haute-Corse

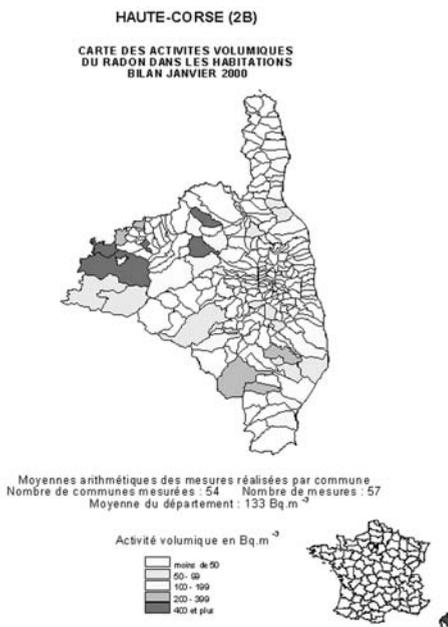


Fig. 3 : carte d'après Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon (IPSN-DGS)

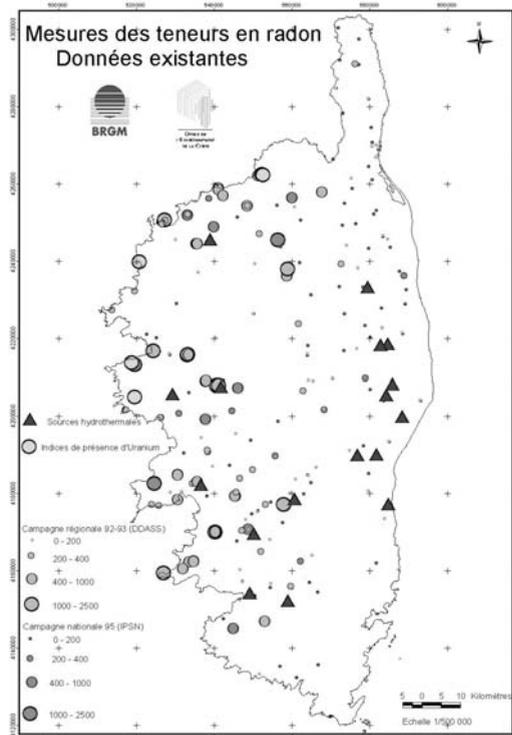


Fig. 4 : carte des mesures de radon (d'après campagne Ddass 1992-1993 et IPSN 1995), des indices de présence d'Uranium et des sources hydrothermales

Les recherches scientifiques d'accompagnement

Les cartographies de zonage proposées répondent essentiellement à des objectifs de zonage d'aléa car la densité et la qualité des données disponibles ne permettent pas encore de proposer de véritables cartes de risques d'exposition des populations dans les habitations.

Deux domaines sont traités en France afin d'améliorer cette situation.

Il s'agit tout d'abord de la capacité des données de géophysique aéroportée à fournir une meilleure représentation cartographique de la variabilité spatiale de l'activité volumique du radon du sol. Cette approche nécessite une calibration à partir de mesures sol avant toute régionalisation de ce paramètre.

La seconde concerne l'amélioration des modèles permettant d'estimer les flux de radon attendus à la surface du sol. Cette approche nécessite quant à elle la prise en compte des hétérogénéités spatiales des caractéristiques physico-chimiques des sols.

Valorisation des mesures spectrométriques aéroportées dans la cartographie prédictive du risque radon

La fiabilité des résultats acquis dans l'approche cartographique décrite ci-dessus dépend essentiellement de la représentativité des teneurs en uranium déterminées sur échantillons et attribuées aux formations géologiques cartographiées et sur le postulat que l'équilibre radioactif est conservé durant toutes les étapes de la désintégration. Afin d'améliorer la pertinence du potentiel d'émanation en radon du sol, une analyse théorique et bibliographique de l'intérêt des mesures du canal uranium de la spectrométrie aéroportée pour la cartographie des zones à fort potentiel d'émanation radon a été réalisée par le BRGM. Elle avait pour objectif d'établir une base scientifique fiable sur l'intérêt d'une telle approche. Une application a été entreprise sur le Massif Armoricain qui bénéficiait d'une couverture aéroportée complète à haute résolution (fig. 5) réalisée pour le compte du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie: espacements entre lignes de vol de 1000, 500, 250 et 125 m.

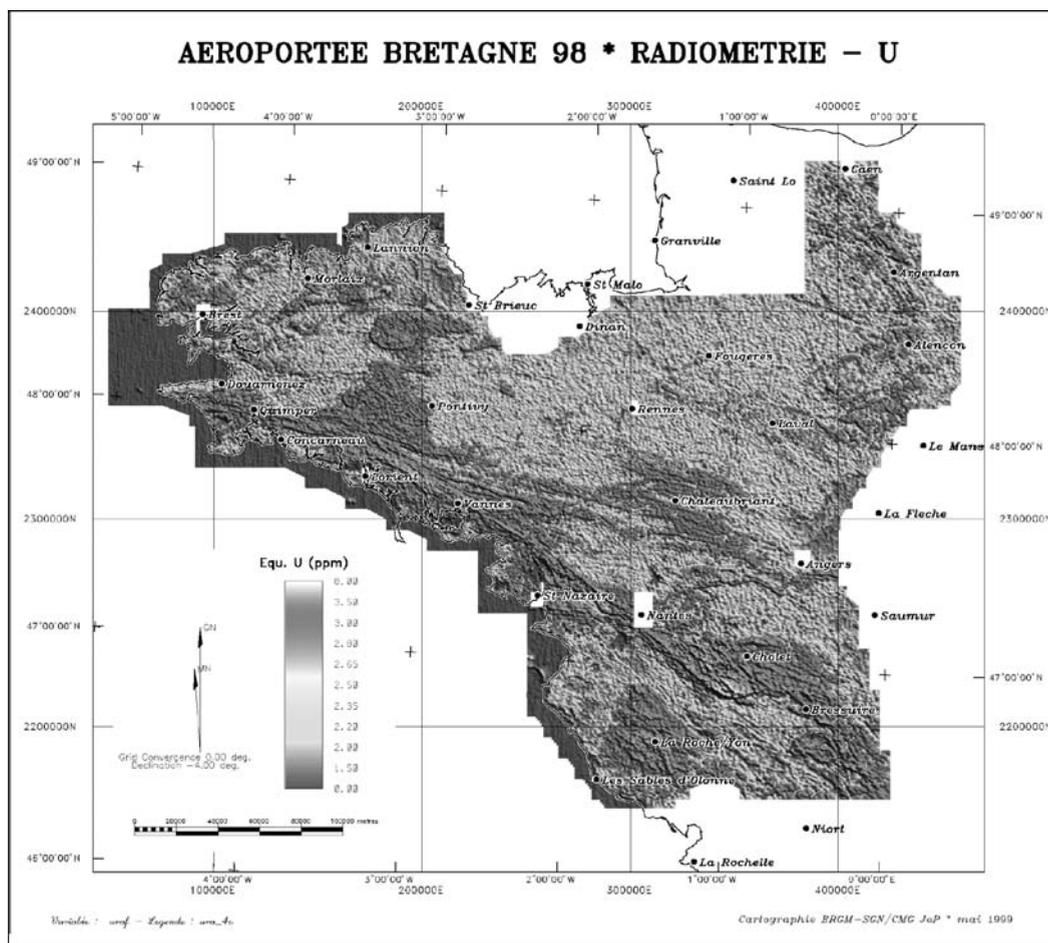


Fig. 5 : Cartographie par spectrométrie gamma du canal «Uranium» - Levé Bretagne
La cartographie fournie correspond aux teneurs équivalentes du ^{214}Bi , descendant du ^{222}Rn après 2 désintégrations successives (Polonium 218 et Plomb 214)

Une comparaison détaillée a été établie avec les résultats des travaux de l'IRSN acquis dans le cadre du programme environnement et santé et formalisés dans la thèse de G. Ielsch (3) sur la région de Lorient. Cette étude constituait un excellent étalonnage *in situ* de la réponse aéroportée et permettait de valider les calibrations de la méthode aéroportée.

La mesure Eq.U (équivalent uranium) en spectrométrie aéroportée est basée sur la mesure de l'intensité de la raie gamma du bismuth 214. Le bismuth 214 est en effet le 3^{ème} descendant du radon 222. Sa mesure apparaît bien représentative de l'activité radium des sols à quelques cm de profondeur. En effet, elle montre une assez bonne convergence avec la teneur volumique en radon de l'espace poreux libre des sols. La tendance observée sur la zone test de Lorient est conforme à la concentration radon maximale théorique attendue, compte tenu de la concentration des sols en radium (ou uranium à l'équilibre) et de leur densité. Des anomalies sont à interpréter, en fonction des flux de radon d'origines plus profondes.

Le canal uranium aéroporté, en raison de sa capacité à fournir une évaluation du contenu radon des sols, apparaît donc constituer un outil privilégié pour la cartographie des zones à fort potentiel. Toutefois, si la méthode aéroportée permet de couvrir rapidement et de façon homogène de grandes surfaces, il ne faut pas perdre de vue qu'elle est intégrante (l'avion parcourt 70 m pendant le processus d'acquisition d'une mesure) et sa précision est entachée d'erreurs statistiques.

Du point de vue de l'évaluation du risque d'émanation radon des sols, l'utilisation du canal U aéroporté devra donc être complétée par :

- une bonne connaissance des caractéristiques géochimiques des roches concernées afin de bien cerner le risque ; la carte géologique numérique, complétée par l'analyse combinée des autres canaux (potassium, thorium et comptage total) constitue alors un très bon outil pour la délimitation des formations géologiques à fort potentiel d'émanation radon ;
- une bonne connaissance structurale qui permet d'identifier les accidents pouvant jouer un rôle de drain susceptible de canaliser le radon d'origine profonde vers la surface ;
- l'étude de la perméabilité des terrains de surface, pouvant constituer un excellent écran empêchant le radon de diffuser vers l'atmosphère, ou pouvant, dans certains cas, permettre une accumulation de radon apte à diffuser par le biais d'installations.

Bibliographie

1. DGS-DGUHC. Circulaire conjointe n°99/46 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon. 1999
2. GAMBARD JP, MITTON N, PIRARD P. Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon IPSN-DGS. Bilan et représentation cartographique des mesures au 01 janvier 2000. IPSN, DGS, editors. 2000.
3. IELSCH G. Mise au point d'une méthodologie prédictive des zones à fort potentiel d'exhalation du radon. Thèse de Doctorat, spécialité Géosciences, Université de Bretagne Occidentale (Brest).
4. MÉTIVIER H, ROBÉ M-C. Le radon. De l'environnement à l'homme. 1998.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2000.

Annexe V

Précisions sur les limites de la cartographie (BRGM)

Rédacteurs :

D. BONIJOLY	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
J.C. BAUBRON	Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM)
J. PERRIN	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
M. URVOIS	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

L'ensemble des pays ayant défini une politique de maîtrise du risque radon, mène une démarche à peu près équivalente à celle menée en France en ce qui concerne la cartographie des zones à risque. Cette démarche repose essentiellement sur la valorisation des connaissances sur le sol et le sous-sol.

Cependant, il est nécessaire d'avertir les utilisateurs de ces documents sur les limites de ces cartographies. En effet, en fonction des données disponibles, la fiabilité du zonage est variable et dépend essentiellement du degré d'incertitude lié aux données utilisées.

En ce qui concerne la géologie, l'échelle des cartes support contraint la résolution de la différenciation faciologique des formations géologiques.

La densité des données géochimiques utilisées pour définir la teneur moyenne en uranium des roches contraint quant à elle l'incertitude sur cette valeur. Celle-ci peut-être réduite si des cartographies géophysiques aéroportées sont disponibles mais, en France, ces couvertures sont rares (Massif Armoricaïn, Ouest du Massif Central, Cévennes).

De plus, la précision du réseau de failles utilisé dans les analyses multi-critères dépend également de la qualité des levés géologiques, qui eux même dépendent des possibilités d'observation ou d'auscultation du sol.

De même, un des paramètres essentiels de cette approche cartographique est particulièrement mal renseigné, il s'agit de la cartographie des qualités minéralogiques et physiques (argilosité, perméabilité) des formations superficielles qui *in fine*, déterminent la capacité du sol à permettre la diffusion du gaz radon dans l'atmosphère.

Enfin, les récents travaux réalisés par l'IRSN démontrent une corrélation entre teneur en uranium dans les roches, teneurs en radon dans les sols et l'atmosphère qui devrait permettre d'espérer aboutir à une cartographie du risque d'exposition. Cependant, la densité des données de terrain (données cartographiques des types de bâtiment, mesures du radon dans le sol, l'atmosphère et dans les bâtiments) est très insuffisante pour établir des supports cartographiques qui permettraient de localiser les types d'habitations à risque. La question essentielle posée, c'est-à-dire la définition d'une méthode de cartographie du risque d'exposition des populations dans les habitations, reste donc toujours sans solution opérationnelle.

Annexe VI

Présentation plus détaillée et plus complète des indicateurs d'impact pouvant être utilisés pour caractériser les risques liés au radon

Rédacteur :

Philippe PIRARD Institut de veille sanitaire – Département santé environnement (InVS-DSE)

Le risque relatif est le rapport entre les risques de deux groupes caractérisés par une exposition différente au radon. Il permet d'estimer la proportion de risque en excès ou en défaut par rapport au risque de référence. Ce risque relatif peut être présenté sous la forme d'un excès de risque relatif (ERR) égal au risque relatif moins un. Le risque relatif de décéder d'un cancer du poumon peut être calculé sur une période de la vie ou sur la vie entière. Pour ce dernier calcul utilisé dans le BEIR VI, la démographie influe sur le calcul du risque relatif moyen, les risques relatifs étant pondérés par les taux de mortalité générale et spécifique à chaque âge attendus dans une population (1). Ainsi, même si les risques relatifs des hommes et des femmes, ou des fumeurs et des non-fumeurs sont identiques à chaque âge, les risques relatifs moyennés sur la vie peuvent s'avérer différents. La comparaison des données bretonnes aux données des USA montre cependant des écarts qui restent dans une fourchette assez restreinte (20 % au maximum) (3). Il est donc possible d'estimer très rapidement l'ordre de grandeur du risque relatif vie entière de décéder d'un cancer du poumon attendu dans une population d'une région par rapport au niveau moyen de radon dans les logements qui y est mesuré en consultant les tableaux du BEIR VI. Par exemple, on obtient un risque de 1,3 de décéder d'un cancer du poumon au cours de sa vie lié à une exposition vie entière au radon de 100 Bq/m³.

Le risque absolu vie entière (RAVE) est la probabilité de décéder sur la vie d'un cancer du poumon dû à une exposition au radon. Il présente un intérêt direct pour l'individu désireux d'estimer le risque qu'il encourt suite à son exposition à un facteur de risque. Cependant, ce risque est très tributaire du risque de base de décéder d'un cancer du poumon en l'absence d'exposition au radon pour ce même individu.

Deux indicateurs sont classiquement utilisés pour estimer l'impact de l'exposition au radon d'une population.

La fraction de risque attribuable représente la **fraction de cancers du poumon attribuables à un facteur de risque parmi les cas** qui se produisent au sein du groupe étudié. Cette fraction permet de comparer l'impact d'un facteur de risque par rapport à un autre : le radon par rapport au tabac par exemple. Il permet aussi d'estimer l'effet d'une réduction de la fréquence ou de l'importance de l'exposition. Dans le cas d'une population entièrement exposée au risque comme le radon, la fraction de risque attribuable vaut ERR/RR. Il est donc possible d'estimer très rapidement la proportion de cancers attribuables à l'exposition domestique au radon dans une région en utilisant la valeur moyenne des niveaux de radon. Pour une exposition d'une population entière à 100 Bq/m³, 23 % des décès par cancer du poumon sont attribuables au radon (3). La notion de fraction de risque attribuable est parfois mal interprétée. Quand il y a plusieurs facteurs de risque, les fractions de risque attribuables ne s'ajoutent pas. Par exemple, dans un groupe de fumeurs, il peut y avoir multiplication par 10 du taux de base d'incidence du cancer du poumon. Si ce groupe est fortement exposé au radon, par exemple à une concentration multipliant le risque par 2, on pourra dire à la fois que la fraction de risque attribuable au tabac est 90 % et la fraction de risque attribuable au radon est 50 %.

La fraction de risque attribuable permet enfin de calculer le **nombre de décès par cancer du poumon attribuables à un facteur de risque**. Ce dernier indicateur permet d'estimer directement l'impact du radon sur l'état de santé d'une population par la simple multiplication de la fraction de risque attribuable par le nombre de cancers du poumon observés dans la population. Il est cependant très dépendant du niveau de risque de cancer du poumon de la population lié aux expositions passées au radon et aux autres facteurs de risque. Il dépend par ailleurs du nombre de personnes habitant la zone. Enfin, ce risque est susceptible de bouger considérablement avec l'évolution de la mortalité par cancer du

poumon dans le temps. Or les habitudes tabagiques, principal facteur de risque du cancer du poumon, sont en pleine mutation dans la population française (2). Pour comparer l'impact du radon d'une région à une autre, il paraît donc préférable de comparer les fractions de risque attribuables.

D'autres indicateurs de risque peuvent être calculés :

La perte d'espérance de vie moyenne est la différence entre l'espérance de vie avec exposition au radon et l'espérance de vie sans exposition au radon. Au niveau collectif, il s'agit d'une simple sommation. C'est un indicateur qui complète les informations apportées par le RAVE et le nombre de cancers attendus vie entière. Ramené au nombre de cancers, il permet d'estimer le nombre d'années de vie perdues par décès par cancer du poumon dû au radon. Ces indicateurs peuvent être utiles pour comparer l'impact d'un facteur de risque par rapport à un autre facteur de risque dont l'effet peut se manifester plus tôt ou plus tard.

Une signification différente selon le niveau de référence pris en compte

Tous ces indicateurs permettent de calculer l'impact du radon. Il faut veiller cependant à savoir si les impacts sont calculés par rapport à une exposition nulle ou par rapport à une valeur de référence. Par rapport à une valeur nulle, c'est l'impact de l'exposition au radon qu'on estime. Par rapport à une valeur de référence, c'est l'excès de risque évitable qu'on exprime. La valeur de référence peut être le niveau de concentration en radon pouvant être atteint en cas de travaux de remédiation (valeur souhaitable ou valeur moyenne résultant de la distribution de départ et de l'efficacité moyenne de travaux).

Bibliographie

1. Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council. Health effects of exposure to radon. Beir VI. Washington:1999.
2. Hill C. Trends in tobacco smoking and consequences on health in France. *Prev Med* 1998; 27(4):514-519.
3. PIRARD P, HUBERT P. Le radon en Bretagne. Evaluation de l'exposition et du risque associé. IPSN, editor. 1-69. 2000.

Annexe VII

Identification des informations associées aux variables qu'il est souhaitable d'intégrer dans la base de données

Rédacteur :

Philippe PIRARD Institut de veille sanitaire – Département santé environnement (InVS-DSE)

Les mesures effectuées ou sélectionnées devront être certifiées comme ayant respecté les normes Afnor NF-M-60-766 et NF-M-60-771.

La base de données informatique et les questionnaires devront comporter l'information minimale pour estimer une exposition moyenne :

- identification du dispositif de mesure ;
- date début/fin de la mesure ;
- type de bâtiment, niveau dans le bâtiment ;
- type de pièce (salon, chambre), localisation géographique avec dénomination de la projection.

Il est en outre nécessaire d'ajouter pour les bâtiments publics,

- les données sur les caractéristiques de l'interface sol-bâtiment sous le local mesuré ;
- sur le type de ventilation de la pièce ;
- sur le nombre d'heures d'occupation par semaine et de personnes accueillies dans la pièce mesurée.

Devront figurer aussi des informations sur l'objectif de la campagne de mesure dont fait partie la mesure à laquelle on s'intéresse, sur le fait que ce soit une première mesure de diagnostic ou une mesure de contrôle, ou qu'existent d'autres mesures simultanées dans la même pièce ou le même bâtiment.

Annexe VIII

Données disponibles concernant la géologie

Rédacteurs :

D. BONIJOLY	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
J.C. BAUBRON	Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM)
J. PERRIN	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
M. URVOIS	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Géologie

Le BRGM a pour missions, d'une part d'établir la carte géologique de France à différentes échelles (1/50 000, 1/250 000, 1/1 000 000), et d'autre part de collecter, gérer et archiver les données sur le sous-sol français, en particulier celles résultant de sondages et travaux souterrains, d'inventaires géochimiques et géophysiques. Ces données d'intérêt général sont mises à la disposition du public sous forme papier et numérique.

Les données géologiques et structurales

Les données disponibles sont accessibles au public soit auprès des Services géologiques régionaux, soit à l'échelle nationale auprès des Editions du BRGM à Orléans pour ce qui concerne les cartes et les ouvrages.

Le catalogue des données existantes est également consultable sur le site InfoTerre™ du BRGM : infoterre.brgm.fr

Toutes les cartes géologiques au 1/50 000 publiées sont disponibles sous forme numérique image géo-référencée. Certaines d'entre elles sont également disponibles sous forme de carte vecteur à contours harmonisés. La disponibilité de ces documents est à demander auprès du Service connaissance et diffusion de l'information géologique du BRGM, Orléans.

Les données litho-géochimiques

Les données brutes sont réunies dans une base de données consultable au BRGM, Orléans. Ces données ne peuvent être utilisées directement pour une cartographie des unités litho-géochimiques homogènes. Elles nécessitent une exploitation préliminaire de l'information à commander auprès du Service connaissance et diffusion de l'information géologique du BRGM, Orléans.

Les données géophysiques aéroportées

Ces données couvrent quatre régions de France : la Bretagne, les Pays-de-Loire, le Limousin et les Cévennes.

Ces données sont stockées dans une banque de données non publique dont l'accès est réglementé par une convention de mise à disposition. Son exploitation pour une cartographie du potentiel d'émanation en radon des roches nécessite un traitement spécifique à commander auprès du Service connaissance et diffusion de l'information géologique du BRGM, Orléans.

Les données des ressources minérales

Ces données couvrent l'ensemble du territoire métropolitain. Elles sont consultables sur le site InfoTerre™ et peuvent être également obtenues auprès du Service connaissance et diffusion de l'information géologique du BRGM, Orléans.

Les données concernant les sources minérales et thermo-minérales

Ces données sont gérées et archivées dans une banque de données non publique. Elles peuvent être commandées auprès du Service eau du BRGM, Orléans.

Annexe IX

La cartographie du potentiel d'exhalation du radon des sols (IRSN)^o

Rédacteur

Géraldine IELSCH Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Département de protection de l'environnement (IRSN-DPRE)



INSTITUT DE PROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE
DÉPARTEMENT DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT
Service d'Études et de Recherches sur la Géosphère et l'élimination des Déchets

Cartographie du potentiel d'exhalation du radon des sols

G. IELSCH

NOTE TECHNIQUE n° 01- 41

SOMMAIRE

Introduction	3
1. Le radon : de l'environnement à l'Homme	4
1.1. Origine du radon	4
1.2. De l'émanation à l'exhalation du radon	6
1.3. Le radon dans les bâtiments	7
2. La cartographie du potentiel radon des territoires : état de l'art.....	10
2.1. Les méthodologies mises en oeuvre en France et à l'étranger pour cartographier le potentiel radon dans l'habitat ou dans l'environnement d'une région.	10
2.2. Les travaux menés à l'IPSN depuis 1994.....	13
3. Les données existantes en France	16
3.1. Les données géologiques.....	17
3.2. Les données pédologiques.....	17
3.3. Les données radon	18
4. Axe de recherche poursuivi par l'IPSN pour la cartographie du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols	18
4.1. Première étape de cartographie du potentiel d'exhalation du radon par une étude litho-géochimique : application à une zone située dans le Massif armoricain	19
4.2. Seconde étape de cartographie par la prise en compte de l'hétérogénéité des sols afin d'améliorer la résolution cartographique de la première zonation « litho-géochimique » : application à une zone située dans le Massif armoricain.	20
Conclusion	21
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	22

INTRODUCTION

Le radon 222 est un gaz radioactif d'origine naturelle, produit par la désintégration du radium 226 lui-même descendant de l'uranium 238 présent dans les roches et les sols. Ce gaz, omniprésent, peut s'accumuler dans les milieux confinés tels que les bâtiments. Or, l'inhalation du radon et de ses descendants constitue un risque sanitaire potentiel pour l'Homme.

Afin de gérer le risque relatif au radon dans les bâtiments, en 1996, un groupe de travail rassemblant des experts de divers organismes (CSTB, OPRI, IPSN, CIRC,...) était créé sous l'égide du ministère de l'emploi et de la solidarité. Le thème du travail était « la gestion du risque radon dans les habitations et les bâtiments ouverts au public ». En 1998, le Conseil Supérieur d'Hygiène publique de France s'appuyant sur les travaux de ce groupe de travail émettait un avis concernant le radon dans les habitations et les établissements recevant du public, et fixait un seuil d'alerte à 1000 Bq. m⁻³ en valeur moyenne annuelle. Le 27 janvier 1999, une circulaire conjointe DGS et DGUHC relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon était émise. Cette circulaire a été accompagnée d'un document d'application à l'attention des DDASS et des DDE. Deux autres circulaires ont été émises par la DGS en mai 1999 et juillet 2001 portant respectivement sur l'interprétation des résultats du radon et sur le renforcement de la campagne de mesures du radon dans les ERP. Deux projets d'arrêtés sur ces sujets sont en cours de préparation par les ministères concernés.

La principale difficulté rencontrée dans la gestion du risque radon est liée à la grande variabilité de l'exposition au radon sur le territoire national. En conséquence, toute politique de dépistage implique la mise en œuvre de moyens importants. Dans la perspective d'une amélioration des programmes de gestion du risque, il apparaît alors nécessaire de développer une méthodologie prédictive permettant de définir les zones où la densité des bâtiments à forts niveaux de radon est susceptible d'être la plus importante. L'identification de zones prioritaires permettrait alors de cibler les actions des pouvoirs publics, en particulier les mesures de dépistage dans les bâtiments existants.

C'est pourquoi l'IPSN s'est engagé depuis plusieurs années dans des programmes de recherche visant à établir une méthodologie prédictive permettant de cartographier le potentiel radon du territoire. Dans ce document, nous synthétisons les résultats de ces recherches et explicitons les axes de poursuite envisagés. Nous discutons également des conditions nécessaires à la réalisation d'une cartographie et des limites de celle-ci. Auparavant, nous faisons un rappel sur les mécanismes de genèse et de transfert du radon dans l'environnement et dans les bâtiments et nous résumons les différentes approches de cartographies testées jusqu'à ce jour dans les différents pays.

1. Le radon : de l'environnement à l'Homme

1.1. Origine du radon

Sur la Terre, on dénombre une vingtaine de radionucléides primordiaux. Parmi eux, l'uranium 235, l'uranium 238 et le thorium 232 conduisent, par décroissance radioactive α ou β , à plusieurs produits de filiation, eux-mêmes radioactifs, puis à un isotope stable du plomb (Figures 1, 2, 3).

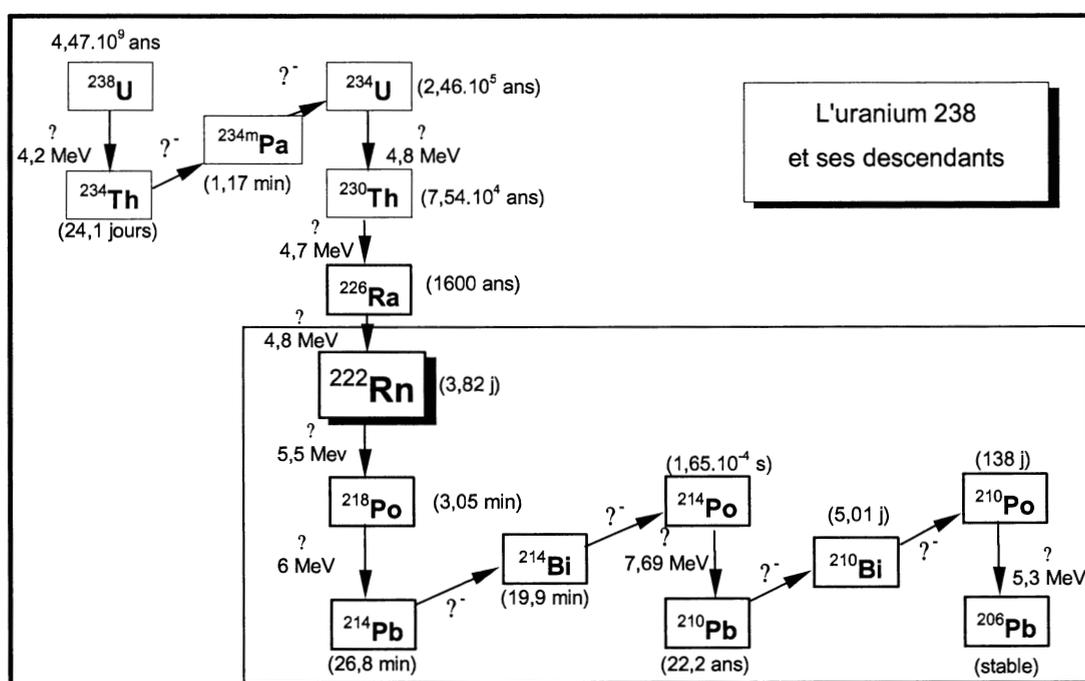


Figure 1 : L'uranium 238 et ses descendants.

Ces éléments sont essentiellement présents dans la croûte terrestre et constituent les trois grandes familles radioactives naturelles. Chacune d'entre elles contient un isotope du radon, seul descendant à l'état de gaz dans les conditions environnementales. Le radon est en effet produit par la désintégration alpha de l'élément radium. Un atome de radium solide se désintègre pour former un atome de radon gaz, en perdant deux protons et deux neutrons, c'est-à-dire un noyau d'hélium ou particule alpha.

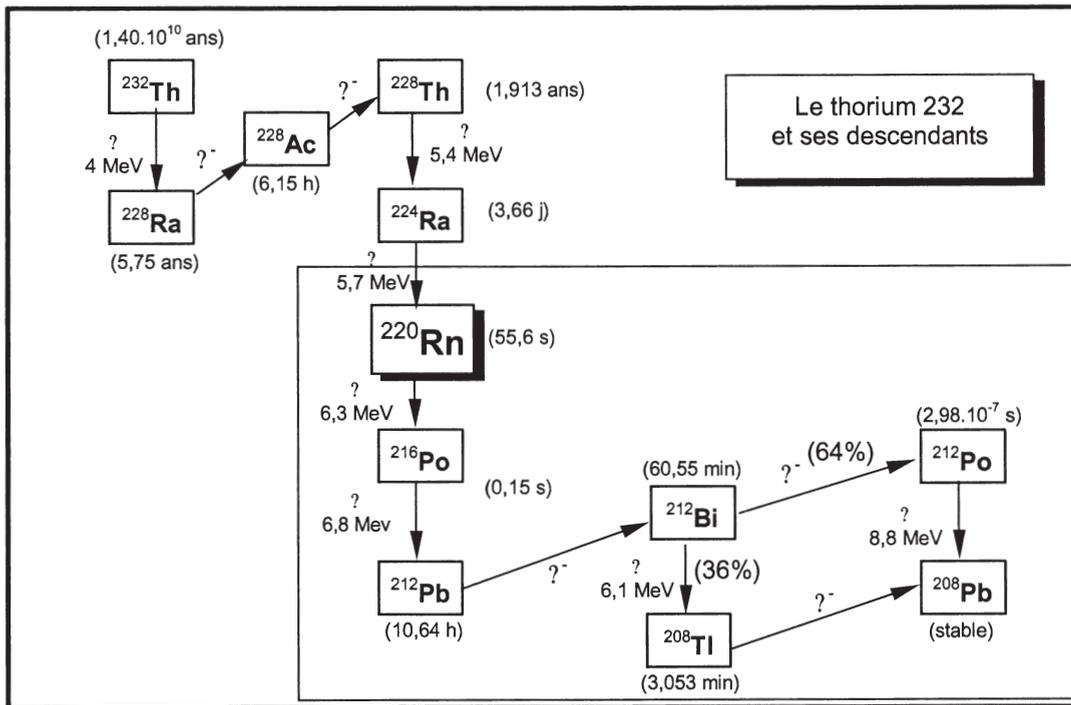


Figure 2: Le thorium 232 et ses descendants.

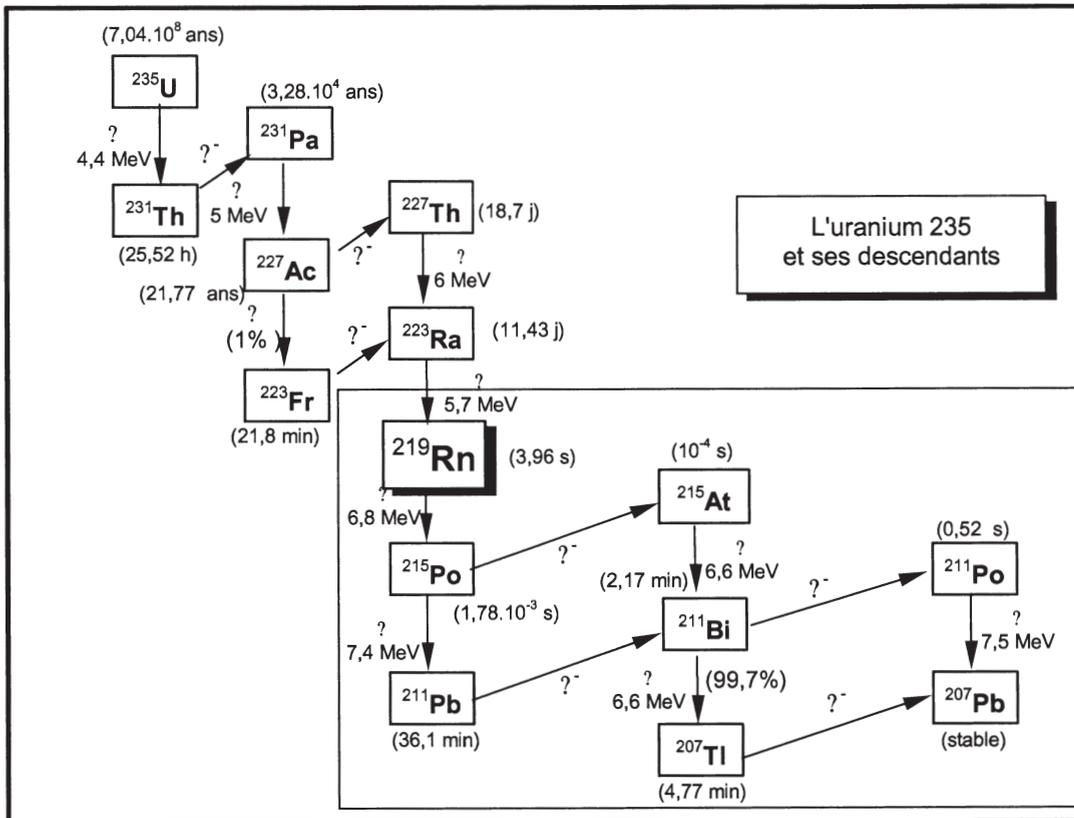


Figure 3 : L'uranium 235 et ses descendants.

Parmi les 27 isotopes actuellement connus du radon, les trois principaux sont le radon 219 ou actinon, le radon 220 ou thoron, et le radon 222. Ces isotopes proviennent respectivement de la

décroissance du radium 223, 224 et 226, eux-mêmes produits de filiation respectifs de l'uranium 235, du thorium 232 et de l'uranium 238. Les isotopes 219 et 220 ont une période de désintégration courte de 3,96 s et 55,6 s respectivement, et le radon 222, une demi-vie d'un peu moins de 4 jours (3,82 jours).

Le radon est lui-même radioactif et se désintègre par émission alpha. Il donne naissance à des radionucléides à vie courte comme le polonium, le bismuth, le plomb, puis à du plomb stable (figures 1, 2, 3). Par exemple, le radon 222 engendre successivement des atomes de polonium 218, de plomb 214, de bismuth 214 et de polonium 214 (figure 1). Ceux-ci sont présents dans l'atmosphère sous forme de particules submicrométriques. L'isotope stable est le plomb 206.

C'est le **radon 222**, avec une période radioactive relativement longue ($\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ et $T = 3,82 \text{ j}$) et du fait de l'abondance naturelle de son précurseur relativement plus élevée (^{238}U), qui est l'isotope le plus communément rencontré. Ainsi, dans les propos qui suivent, nous nous attacherons à étudier exclusivement le radon 222 et le terme radon y fera référence.

1.2. De l'émanation à l'exhalation du radon

On définit l'exhalation du radon par le nombre d'atomes de radon émis à l'air libre, à la surface du matériau dans lequel il s'est formé. L'exhalation du radon à la surface du sol est le résultat des mécanismes gouvernant d'une part, la genèse et la libération du radon gaz dans les pores de son milieu source et d'autre part, sa migration depuis sa source jusqu'à l'interface sol/atmosphère. L'exhalation du radon en surface peut subir l'influence d'autres paramètres tels que les conditions atmosphériques.

1.2.1. Genèse et libération du radon : son émanation

L'émanation du radon est un mécanisme physique à étudier à l'échelle de l'assemblage microscopique des grains solides et des vides interstitiels constituant un milieu poreux (Tanner, 1964, 1980). Considérons, en effet, une roche ou un sol dont les grains minéraux contiennent du radium. L'émanation du radon est le mécanisme par lequel un atome de radon est libéré du grain solide et atteint l'espace libre des pores.

1.2.2. Les voies et mécanismes de transport du radon dans les roches et les sols

Les processus gouvernant le transport du radon depuis son milieu source (roche et/ou sol) jusqu'à l'atmosphère sont à relier à la taille et à la distribution des espaces que peut occuper le

gaz. A l'échelle microscopique, ses voies de transport sont les pores ou macropores de la roche ou du sol. Il peut, en outre, atteindre des espaces gazeux plus importants. A l'échelle des formations géologiques, il s'agit, par exemple, des fractures, des failles, des cavités souterraines (grottes, environnements karstiques, réseaux hydrogéologiques...), des conduits volcaniques (dégazage des magmas) etc. Les mécanismes de migration du radon peuvent être classés en deux catégories : d'une part, les processus microscopiques ou à grande échelle intervenant dans l'espace poreux, c'est-à-dire essentiellement la diffusion moléculaire et, d'autre part, l'advection-convection, permettant le transport du radon sur de plus grandes distances.

1.3. Le radon dans les bâtiments

1.3.1. Les sources de radon

Le radon se trouve en concentration généralement plus importante dans les maisons que dans l'atmosphère extérieure en raison des plus faibles taux de renouvellement de l'air à l'intérieur. A l'inverse de l'atmosphère libre où le radon se dilue puis est transporté à de hautes altitudes, le radon s'accumule dans l'air des bâtiments et ceci d'autant plus que la ventilation est faible.

Dans les maisons, le radon trouve son origine principale dans le sol sous-jacent et parfois les matériaux de construction. Les activités volumiques du radon dépendent également des diverses caractéristiques de l'habitat :

- nature du soubassement (vide sanitaire, cave, présence de sol en terre battue, ...),
- présence ou non d'étages,
- voies de transfert entre les différents niveaux (passages de canalisations, escaliers, ...),
- ventilation et habitudes de vie des occupants (figure 4).

Plus rarement, l'eau du robinet peut être riche en radon (par exemple lorsqu'elle provient d'un puits dans un terrain granitique uranifère) et son dégazage constitue une source significative. Selon les régions, l'air extérieur est également une source à considérer. Parfois, le gaz naturel brûlé dans les habitations peut aussi constituer une source de radon.

Les concentrations mesurées dans les habitations sont très variables selon les lieux et les pays (10 à 10 000 Bq.m⁻³). L'UNSCEAR (Unsear, 1993) propose une valeur moyenne à l'échelle de la Terre de 40 Bq.m⁻³.

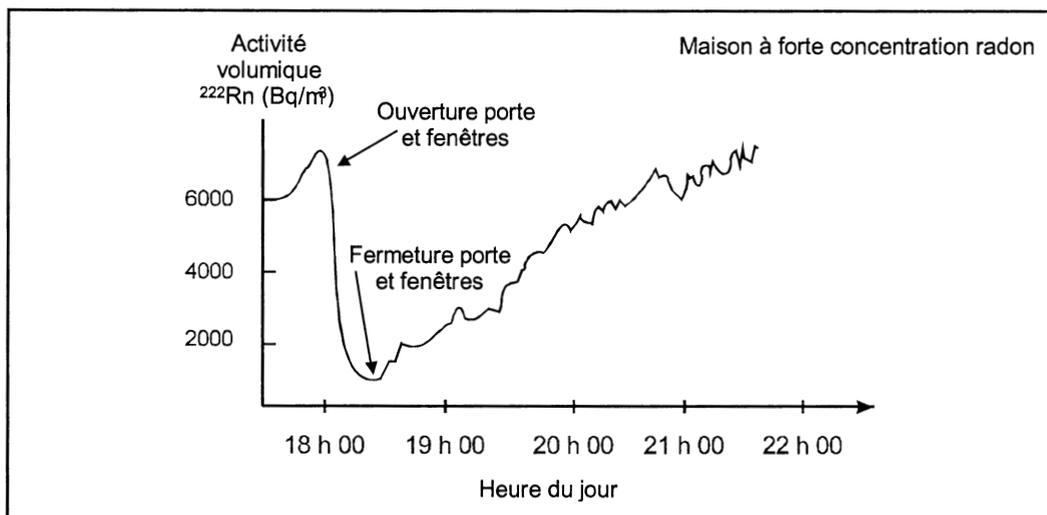


Figure 4 : Exemple d'évolution des concentrations en radon dans une maison : mise en évidence de l'effet d'une ventilation naturelle.

1.3.2 Les voies d'entrée

L'entrée de radon dans une habitation ne se fait généralement pas de façon uniforme sur toute sa surface. Des études menées sur quelques habitations ont montré qu'il existe des voies d'entrée préférentielles à certains endroits comme par exemple des fissures dans la dalle de fondation, des passages de canalisations ou encore le sol en terre battue d'une cave (figure 5).

Le bâtiment est généralement en dépression par rapport au sol, ce qui a tendance à favoriser le transfert du radon du sol vers le bâtiment.

Le mode de vie des occupants n'est pas non plus sans influence (par exemple, ouverture plus ou moins fréquente des portes et des fenêtres).

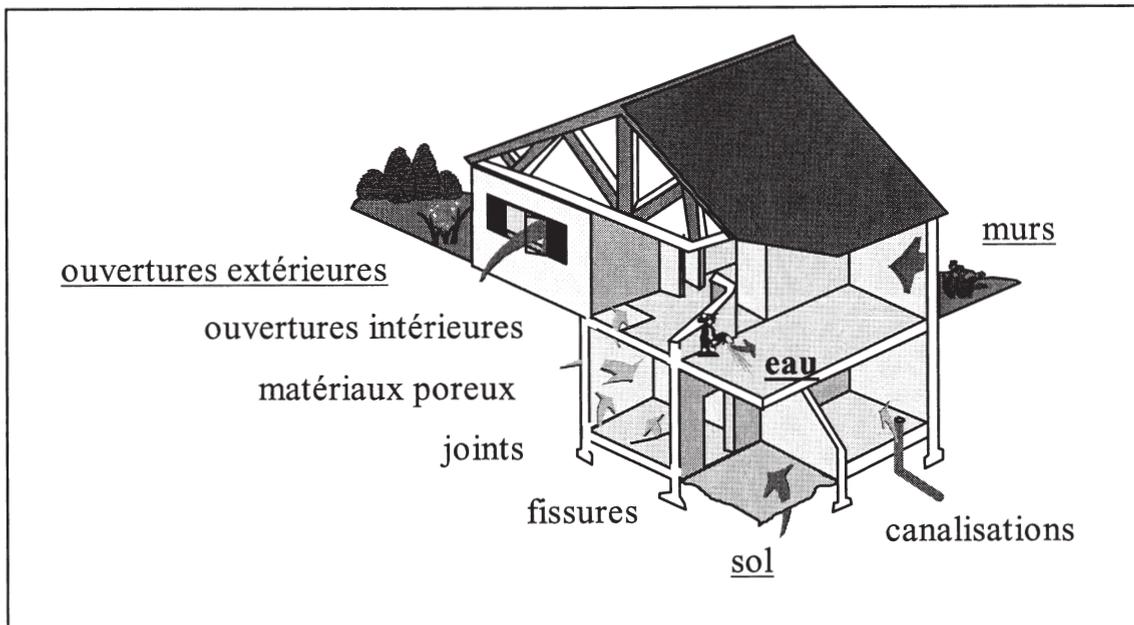


Figure 5 : Les voies d'entrée et de transfert du radon dans une habitation

En définitive, la présence de radon en grande quantité dans certaines habitations s'explique la plupart du temps par l'entrée directe de ce gaz en provenance du sol. Cette entrée est d'autant plus grande que le sol est potentiellement "riche" en radon (c'est-à-dire qu'il contient du radium ou de l'uranium et qu'il est perméable), que les conditions météorologiques sont favorables à des phénomènes de convection et que les caractéristiques architecturales sont propices aux infiltrations : mauvaise étanchéité des sols de fondation, passages de canalisations entre le sous-sol et les cellules habitées, faible taux de renouvellement d'air.

2. La cartographie du potentiel radon des territoires : état de l'art

2.1. Les méthodologies mises en oeuvre en France et à l'étranger pour cartographier le potentiel radon dans l'habitat ou dans l'environnement d'une région.

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses mesures de la concentration de radon dans l'habitat ont été réalisées en Europe, aux Etats Unis et au Canada. C'est au début des années 1980 que des travaux réalisés en Suède et au Canada indiquèrent que les fortes concentrations de radon mesurées dans certaines habitations, pourraient être le résultat de l'infiltration du radon provenant du radium contenu dans le sol (Åkerblom et Wilson, 1981). Les études menées depuis 20 ans ont alors visé à mettre en place une méthode, ou à développer des procédures, permettant de gérer au mieux le risque sanitaire lié au radon dans l'habitat.

Un des axes de gestion de ce risque consiste à identifier les zones du territoire qui présentent un fort potentiel d'exhalation du radon. Cette « cartographie du radon » présente un double objectif : il s'agit, d'une part, d'identifier les zones caractérisées par un potentiel d'émission du radon important et pour lesquelles des mesures de précaution pourraient éventuellement être prises dans les constructions futures, et d'autre part d'orienter les campagnes de mesures dans les bâtiments qui sont susceptibles de présenter des concentrations de radon supérieures aux seuils d'alerte ou de précaution fixés. En Suède, par exemple, de telles cartes sont utilisées par les entreprises du bâtiment pour mettre en oeuvre de nouvelles techniques, et/ou de nouveaux matériaux de construction « résistant au radon ». Ces cartes du potentiel d'exhalation du radon des sols sont en aucun cas des cartes de risque sanitaire. En outre, il est nécessaire d'avertir les utilisateurs de ces documents que la fiabilité du zonage dépend du degré d'incertitude lié aux données utilisées qui est fonction de la densité des données existantes et de leur validité. De plus, l'échelle de restitution des cartes prédictives réalisées est définie par l'échelle cartographique de base des données disponibles.

Le lien entre la géologie et les niveaux de radon dans l'environnement est documenté depuis la fin des années 70, plus particulièrement dans la littérature spécialisée dans l'exploration des gisements d'uranium. Ce sont les travaux de Sachs et al. (1982) qui ont mis pour la première fois en évidence une corrélation entre les variations géologiques régionales et les concentrations de radon dans l'habitat. Des études plus récentes ont néanmoins démontré que cette relation est complexe car elle fait intervenir non seulement la contribution de la composition chimique et de la structure des roches, mais encore d'autres paramètres notamment pédologiques et climatiques, et éventuellement les caractéristiques architecturales des habitations. Rappelons que les fortes activités volumiques du radon dans une habitation résultent de plusieurs facteurs : i) concentration élevée du radon dans le sol, ii) perméabilité suffisante pour faciliter la migration verticale du gaz

jusqu'aux fondations d'un bâtiment, iii) toute forme de voies d'accès dans les fondations facilitant la pénétration du radon. En outre, il semblerait que la diffusion du radon à travers les pores du sol, ou à travers les matériaux de construction comme le béton, conduise parfois à des concentrations de radon élevées (Nielson et Rogers, 1990 ; Tanner, 1991).

Ainsi, les sources de données utilisées par les scientifiques pour cartographier le radon dans l'habitat, ou dans l'environnement d'une région, sont multiples et résultent de la complexité des interactions existant entre les différents facteurs à prendre en compte. Les informations utilisées peuvent être les niveaux de radon mesurés dans l'habitat, dans le sol, à sa surface ou dans l'atmosphère, et/ou les caractéristiques géologiques et pédologiques locales et éventuellement l'architecture des bâtiments. Les paramètres utilisés sont soit directement caractérisés *in situ* ou en laboratoire, soit estimés indirectement grâce à d'autres outils comme les cartes géologiques, pédologiques, radiométriques etc.

Les méthodes développées actuellement pour tenter de cartographier les niveaux de radon dans l'habitat sont de trois types. Elles sont synthétisées dans le tableau annexe 1.

2.1.1. Cartographie à partir des mesures de l'activité volumique du radon dans l'habitat

Cette approche s'attache à réaliser des cartes du potentiel radon dans l'habitat à partir des mesures existantes dans l'habitat. Un maillage régulier est effectué sur la zone étudiée et un potentiel est affecté à chaque maille, à partir de l'extrapolation des données disponibles dans l'habitat. Dans certains cas, le traitement cartographique et statistique effectué permet d'estimer la proportion des maisons où l'activité volumique du radon dépasse les valeurs d'intérêt fixées par les pouvoirs publics. En France, la cartographie est dressée sur la base de la campagne nationale de mesures des niveaux de radon dans l'habitat que mène l'IPSN et la DGS depuis plus de 20 ans. Cette approche est résumée dans le tableau annexe 2. Néanmoins, celle-ci reste très imprécise du fait de plusieurs difficultés :

- la densité et la qualité des données existantes sur les niveaux de radon mesurés dans les bâtiments ne permettent pas encore de proposer de véritables cartes de l'exposition des populations dans les habitations ;

- les niveaux de radon dans les bâtiments résultent de l'interaction de nombreux paramètres liés au terrain mais aussi liés aux caractéristiques propres aux habitations et peu renseignés sur le parc français (caractéristiques architecturales, mode de ventilation, mode de vie des occupants...), et de phénomènes physiques complexes encore en cours d'études, dont les résultats ne permettent pas d'aboutir à des prévisions dans l'habitat.

2.1.2. Cartographie à partir des mesures de l'activité volumique du radon dans l'habitat et des données géologiques

Cette seconde approche est une méthode semi-directe, qui consiste à cartographier les concentrations en radon potentielles dans l'habitat, à partir des mesures existantes dans l'habitat et des données géologiques (et plus rarement les informations pédologiques). Les formations géologiques sont souvent classées par type lithologique, et chaque polygone ainsi différencié est relié à une classe de potentiel radon, déterminée sur la base des mesures disponibles dans l'habitat (annexe 1).

En France par exemple, le BRGM a mis en œuvre une cartographie prédictive basée sur la géologie et sur un contrôle des prévisions à partir des mesures de l'activité volumique du radon de la campagne nationale menée par l'IPSN et la DGS (annexe 2).

Ce type de méthode permet d'étendre la cartographie du radon dans l'habitat à des régions où l'on ne dispose d'aucune mesure du radon dans l'habitat. Néanmoins, elle rencontre des difficultés de précision pour des raisons identiques à celles évoquées dans le chapitre précédent, puisqu'elle exploite également les mesures du radon disponibles dans l'habitat. De plus, ne prenant en compte que les formations géologiques, la discrétisation du territoire reste grossière et la « couverture pédologique » sus-jacente aux roches est ignorée.

2.1.3. Cartographie basée sur le potentiel d'exhalation du radon des sols

Afin de surmonter les difficultés rencontrées par l'application des deux précédentes méthodes, différents pays ont tenté de développer une troisième approche, indirecte. Celle-ci consiste à déterminer un potentiel d'exhalation du radon des sols à partir des paramètres géologiques et pédologiques locaux. Cette estimation s'appuie également sur des mesures *in situ* de la concentration en radon dans le sol, éventuellement du flux de radon en surface et le cas échéant, de mesures des concentrations en radon effectuées dans les bâtiments. Cette méthode est résumée dans le tableau annexe 1.

Ainsi, une méthodologie a été mise au point dans le cadre des programmes de recherche engagés à l'IPSN. Cette approche impose le développement et l'amélioration des modèles permettant d'estimer les flux de radon attendus à la surface des sols. Elle nécessite aussi la prise en compte des caractéristiques physiques et chimiques d'une part, des formations géologiques et d'autre part, des sols sus-jacents (annexe 3).

En outre, l'utilisation de mesures spectrométriques aéroportées a parfois été étudiée afin de cartographier le potentiel radon des sols. Cette approche a notamment été appliquée aux Etats

Unis et au Royaume Uni. Elle a également fait l'objet d'un travail de recherche au BRGM (Bonijoly et al., 1999) résumé dans le tableau annexe 3.

2.2. Les travaux menés à l'IPSN depuis 1994

2.2.1. Les premiers travaux

Tout d'abord, les travaux de thèse de Demongeot (1997) ont mis en évidence l'influence des paramètres pédologiques sur l'exhalation du radon. Ils ont tout d'abord conduit à la mise au point d'une méthode d'estimation du potentiel d'exhalation, basée sur les caractères morphologiques et la composition du sol, estimés par des levés de terrain, et sa teneur en radium. En outre, dans le cadre de ce travail, un modèle simplifié de la migration du radon par diffusion à travers un profil de sol considéré homogène, a également été développé. Celui-ci a permis d'effectuer des premiers tests de quantification du flux de radon en surface du sol et de la concentration en radon dans le sol, à partir des caractéristiques physiques et chimiques du sol. Les résultats obtenus ont notamment montré l'influence de l'état hydrique du sol, donc de sa perméabilité, sur l'exhalation du radon. Cette méthode ainsi que le code développé ont été testés sur une zone caractérisée par différents types de sols, situés sur un sous-sol homogène au potentiel source faible.

2.2.2. Le programme *Environnement et Santé*

Suite aux premiers résultats obtenus, un travail de recherche a été mené pendant 3 ans, dans le cadre du programme Environnement et Santé 1997 des ministères de l'Environnement et de la Santé. Une seconde thèse s'inscrivait dans le cadre de ce programme (Ielsch, 2000).

2.2.2.1 Cadre et objectifs du programme de recherche.

L'objectif principal était de cibler, de manière plus précise, les populations les plus exposées au radon. Il visait à mettre au point et valider une méthodologie prédictive des zones géographiques présentant un fort potentiel d'émission du radon à la surface du sol, c'est-à-dire où la densité des bâtiments à fort niveaux de radon est susceptible d'être la plus importante (rapport scientifique final : Ielsch et Haristoy, 2001).

Les principaux objectifs spécifiques de ce programme de recherche ont été de :

- proposer une classification des types de sous-sols et de sols quant à leur potentiel d'exhalation du radon, à partir d'une analyse de l'influence des paramètres pédologiques et géologiques sur l'émission de radon en surface (exhalation) : confrontation des contextes

géologiques et pédologiques locaux aux niveaux de radon mesurés dans l'environnement et les habitations ;

- valider le code de calcul TRACHGEO, décrivant la migration du radon dans le sol et développé à l'IPSN, en tant qu'outil prédictif des flux surfaciques d'exhalation du radon. La confrontation des valeurs prédites par le code et des valeurs mesurées sur le terrain a permis de valider les approches faites dans le modèle et de corréliser certaines configurations géologiques et pédologiques aux niveaux de radon à la surface du sol.

Ce projet a été réalisé par l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Ce travail impliquait les unités suivantes :

- le Laboratoire d'Etudes et d'Interventions Radon et Polluants Atmosphériques (LEIRPA) du Service d'Etudes et de Recherches sur la Géosphère et l'élimination des Déchets (SERGD) du Département de Protection de l'Environnement (DPRE) de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN),

- le Laboratoire d'Epidémiologie et d'Analyse du Détriment Sanitaire (LEADS) du Service d'Evaluation et Gestion des Risques (SEGR) du Département de Protection de la santé l'Homme et Dosimétrie (DPHD) de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN),

- le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, Orléans) et le Service Géologique Régional de Lorraine (BRGM, Nancy).

Ce programme a également suscité la participation de l'INRA de Rennes et des autorités locales (DDASS de Quimper, Montpellier et Pau), et ainsi favorisé des échanges efficaces entre des spécialistes de compétences différentes.

2.2.2.2. La démarche adoptée

La démarche adoptée s'appuie sur une quantification du flux de radon à la surface des sols, à partir d'une caractérisation précise des principaux paramètres géologiques et pédologiques locaux, qui contrôlent la source du radon ainsi que son transport jusqu'à l'interface sol/atmosphère. Elle est décrite dans le tableau annexe 3. Cette méthodologie combine une analyse cartographique croisée des paramètres intégrés dans un Système d'Information Géographique et l'utilisation d'un modèle simplifié du transport vertical du radon par diffusion dans l'espace poral du sol. Ce dernier, appelé TRACHGEO (Transport du RADon dans une Couche Homogène limitée à sa base par une formation GEOlogique) permet de quantifier le flux de radon en surface, en fonction des propriétés chimiques et physiques de la roche et du sol. L'ensemble des données a été analysé à une échelle cartographique précise (1/50 000).

L'étude des paramètres géologiques a plus particulièrement consisté à cartographier les différentes lithologies observées et à quantifier leurs teneurs en uranium. La fracturation a également été cartographiée, mais son impact sur l'exhalation du radon n'a été considérée que dans une seconde étape d'interprétation. La présence de failles est en effet un paramètre supplémentaire à prendre en compte, dans des cas particuliers, pour expliquer certaines anomalies locales du flux de radon. Même s'il est reconnu que la fracturation a parfois une forte incidence sur l'exhalation, notamment dans les zones sismiquement actives, nous avons choisi d'orienter tout d'abord notre étude vers un cas dit « simplifié », où l'impact de la fracturation n'est considéré que secondaire par rapport à celui de la géochimie du sous-sol.

La caractérisation pédologique est axée sur une cartographie des différentes unités de sols et sur la quantification et l'analyse de certaines de leurs propriétés chimiques (activité en radium-226) et physiques (épaisseur, porosité, humidité) qui contrôlent l'émanation du radon et sa migration dans la colonne de sol.

La méthodologie proposée a été validée sur 5 transects-types, représentatifs de la diversité géologique de la France et s'étendant chacun sur une superficie d'environ 20 X 50 km, à partir de mesures *in situ* du flux de radon à la surface du sol, de l'activité volumique du radon dans le sol, dans l'atmosphère et dans l'habitat. Ces cinq zones sont situées en Haute-Marne, dans les Pyrénées Atlantiques, le Puy de Dôme, en Bretagne sud (Finistère-Morbihan) et dans l'Hérault.

La zone de Haute-Marne a fait l'objet d'une étude préliminaire permettant de déterminer plus précisément les paramètres influençant l'exhalation du radon à la surface du sol. En outre, les mesures réalisées sur cette zone ont conduit à une analyse statistique de la répartition spatiale des niveaux de radon, afin de tester la représentativité de la relation entre les niveaux de radon mesurés dans les habitations et les valeurs observées dans le sol. Cette première investigation a constitué une base de travail pour l'élaboration de la méthodologie proposée à l'heure actuelle, qui a été appliquée sur les 4 autres transects-types sélectionnés. La démarche a tout d'abord été développée et validée sur les deux premiers transects situés en Bretagne et dans l'Hérault (Ielsch, 2000). La méthodologie a pu ensuite être appliquée aux deux autres zones du programme situées dans le Puy de Dôme et les Pyrénées. Les résultats obtenus sont précisément décrits et discutés dans le Rapport synthétique final de ce programme de recherche (Ielsch et Haristoy, 2001).

2.2.2.3 Les principaux résultats

Les principales conclusions tirées de ce travail ont tout d'abord montré que la teneur en uranium des formations géologiques semble être le paramètre primordial qui influence l'exhalation du radon à la surface du sol (Ielsch et al. 2001) et qu'il est alors possible de proposer une classification de chaque unité litho-géochimique (lithologie associée à une gamme probable de teneurs en U) en fonction de son potentiel d'exhalation. L'application de celle-ci peut alors

conduire à des cartes de zonation du potentiel d'exhalation du radon basées sur la chimie des formations géologiques. Un exemple d'application de ce type de classification a été réalisée pour les 4 transects étudiés (Ielsch et Haristoy, 2001). En outre, après la comparaison de la classification du potentiel d'exhalation du radon des différentes unités litho-géochimiques, aux niveaux de radon mesurés dans l'habitat sur ces différentes classes, il est apparu que globalement ces niveaux seraient cohérents avec le potentiel d'exhalation. Nous pouvons toutefois **souligner la difficulté d'effectuer une telle classification** qui est à relier :

- à la variabilité naturelle des teneurs moyennes en U des formations géologiques. Il est possible d'attribuer à chaque formation une gamme probable de variations de la teneur moyenne en U, à partir des analyses directes disponibles sur les formations étudiées ou à partir d'informations indirectes. Toutefois, nous pouvons noter que les gammes ainsi déterminées se recouvrent en partie, d'où la difficulté à classer certaines formations géologiques qui peuvent être à la limite entre deux classes litho-géochimiques;

- à l'effectif des mesures des niveaux de radon disponibles sur chaque lithologie qui peut être très variable et ainsi à leur représentativité statistique.

Par ailleurs, nos mesures du flux de radon ont révélé une forte variabilité spatiale sur les lithologies uranifères. Les premières esquisses de cartes du potentiel d'exhalation du radon, déterminée uniquement à partir de l'étude litho-géochimique, sur-estime donc parfois ce potentiel. Les tests de l'outil TRACHGEO qui quantifie le flux de radon en surface à partir des propriétés chimiques et physiques, non seulement de la roche, mais également du sol, ont montré la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques pédologiques (humidité et porosité en particulier) pour améliorer, autant que possible, la résolution cartographique. Les calculs du flux de radon obtenus par cet outil ont, en effet, permis d'expliquer la variabilité de l'exhalation du radon observée sur une même litho-géochimie, en particulier sur le transect qui présente les plus fortes variations des niveaux de flux de radon : les prévisions permettent de distinguer plus précisément les zones à fort potentiel d'exhalation s'étendant sur quelques kilomètres carrés (Ielsch et al., in press).

3. Les données existantes en France

L'application d'une méthodologie de cartographie prédictive par les experts compétents dépend de la densité et de la validité des données existantes, mais également de l'accessibilité de ces informations, qui sont souvent stockées dans des bases de données appartenant à différents organismes.

3.1. Les données géologiques

La carte géologique de France est réalisée par le BRGM à différentes échelles (1/50 000, 1/250 000, 1/1 000 000). Le BRGM a également pour mission de collecter, gérer et archiver les données géochimiques et géophysiques sur le sous-sol français. Les données disponibles sont accessibles au public auprès des Editions du BRGM à Orléans. Toutes les cartes géologiques à 1/50 000 publiées sont disponibles sous forme papier ou numérique (image géoréférencée). Certaines d'entre elles sont également disponibles sous forme de carte vecteur. Les données géochimiques, géophysiques et structurales du BRGM sont soit réunies dans des bases de données consultables au BRGM (Orléans), soit stockées dans des banques de données non publiques dont l'accès est réglementé.

Des données géochimiques et structurales existent également en grand nombre dans les universités ou autres organismes de recherche.

Toutefois, précisons que la densité des données géochimiques disponibles sur les formations géologiques de France est très inhomogène. Les formations sédimentaires en particulier sont très peu documentées. De plus, la qualité des levés géologiques dépend des possibilités d'observation du sous-sol. En outre, l'échelle des cartes supports de cartographie contraint la résolution de la différenciation faciologique des formations géologiques. Enfin, il existe très peu d'informations cartographiques sur les propriétés physiques (étendue, épaisseur, porosité ...) des formations géologiques superficielles qui peuvent également contrôler le transfert du radon vers l'atmosphère.

3.2. Les données pédologiques

Il existe une grande disparité dans la couverture nationale des données pédologiques, dans le détail de ces informations et la densité de celles-ci. Ces données sont à rechercher essentiellement au niveau des études cartographiques menées par l'INRA, ou encore dans les documents émis par les Chambres d'Agriculture ou les travaux universitaires. De plus, ces informations peuvent se présenter globalement sous deux formes :

- soit il s'agit d'informations ponctuelles obtenues par sondages pédologiques et/ou analyses d'échantillons de sols en laboratoire ;

- soit les données peuvent être rattachées à une unité de sol définie selon l'échelle de précision des levés cartographiques en question (échelle du 1/50 000, voire du 1/10 000, du 1/100 000 ou du 1/250 000) et sont, dans ce cas, généralisables à l'ensemble de cette unité.

En outre, les caractéristiques chimiques et physiques des sols ne sont pas cartographiées de manière systématique sur le territoire français. En effet, il existe une grande disparité dans la couverture nationale des données pédologiques : densité, forme (sondages, cartes) et échelle de restitution cartographique des informations existantes.

3.3. Les données radon

La validité des différentes approches testées est dépendante de la représentativité statistique des mesures des niveaux de radon disponibles et utilisées pour valider ces méthodologies.

Les mesures des niveaux de radon dans l'environnement disponibles sont celles réalisées par l'IPSN dans le cadre de ses programmes de recherche.

Les mesures réalisées dans l'habitat dans le cadre de la campagne nationale de l'IPSN et de la DGS sont stockées dans une base de données à l'IPSN. Un bilan au 1^{er} janvier 2000 et une représentation cartographique des résultats a été réalisé et publié dans un rapport (Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon IPSN/DGS, Note technique IPSN-DPHD/SEGR/LEADS-2000/14).

La répartition et la densité de ces mesures est inhomogène sur le territoire.

Précisons également que toutes les données nécessaires à l'application et à la validation des méthodologies (informations géologiques, pédologiques et mesures sur le terrain des niveaux de radon dans l'environnement et dans les bâtiments) doivent être géoréférencées.

4. Axe de recherche poursuivi par l'IPSN pour la cartographie du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols

Les résultats des programmes de recherche menés jusqu'à présent ont démontré qu'il est possible d'attribuer à une entité cartographique, définie par sa litho-géochimie et les propriétés de la couverture de sol sus-jacente, un niveau de potentiel d'exhalation, numérique ou non. A chaque classe correspond alors une gamme de variation du flux de radon.

Ces programmes ont apporté des indications quant au choix des paramètres et la pertinence des outils à utiliser pour l'élaboration d'une cartographie prédictive. Toutefois, à l'heure actuelle, il

n'existe pas d'assurance sur la disponibilité et la représentativité statistique des données nécessaires, à l'échelle du territoire français.

C'est pourquoi, la première phase du programme de recherche engagé à l'IPSN consistera à appliquer la méthodologie de cartographie prédictive déjà élaborée (Ielsch et Haristoy, 2001) sur une zone d'une superficie supérieure aux transects précédemment étudiés (superficie de chaque transect d'environ 1000 km²), c'est-à-dire équivalente à celle d'un département (7000 km²). Cette nouvelle zone d'étude, située dans le Massif armoricain, a été choisie de manière à couvrir la gamme des teneurs en uranium pouvant être observées dans les roches et en fonction de la densité de mesures des niveaux de radon dont dispose l'IPSN sur la zone. Cette première phase devrait permettre, d'une part, de tester la validité de la méthodologie existante sur la base d'un échantillon de données disponibles à l'échelle équivalente à celle d'un département et d'autre part, de rendre compte ou non de l'utilité de cartes prédictives du potentiel radon des terrains, pour les autorités compétentes, en matière de gestion du risque sanitaire lié au radon dans les bâtiments.

La précision des cartes réalisées dépend des données pouvant être utilisées : deux étapes de cartographie, la première basée sur les informations géologiques, la seconde fondée sur les caractéristiques du sous-sol mais également des sols, sont alors à distinguer.

4.1. Première étape de cartographie du potentiel d'exhalation du radon par une étude litho-géochimique : application à une zone située dans le Massif armoricain

Cette première étape de cartographie est décrite dans l'annexe 4.a. Elle comprend deux volets.

4.1.1. Attribution d'une gamme de teneurs moyennes en uranium aux formations géologiques et définition des classes litho-géochimiques

La teneur en uranium des roches contrôle le terme source du radon dans le sous-sol. Ce paramètre est évalué à partir des levés géologiques au 1/50 000 et de l'information géochimique disponible sur ces formations géologiques. En effet, l'objectif est de pouvoir affecter à chaque formation une gamme de teneurs probables en uranium. Une formation géologique est définie par la nature des roches qui la composent, ou lithologie, et par son âge. La lithologie étant un caractère déterminant sur les teneurs en uranium, il est tout d'abord indispensable d'établir une définition lithologique des formations géologiques. Ce travail est réalisé par une analyse critique des notices de cartes géologiques. Ensuite, une gamme de teneurs en uranium est attribuée à

chaque classe lithologique, selon les deux approches: une première, directe, et une seconde constituant une approche indirecte ou « litho-géochimique ».

* La méthode directe est basée sur les analyses chimiques d'échantillons prélevés sur le terrain. Ces analyses proviennent soit des données issues de la Carte Géologique de France (BRGM), soit de travaux de recherche réalisés dans des universités ou d'autres organismes.

* La méthode indirecte est une méthode alternative qui consiste à attribuer une gamme probable de variation des teneurs en uranium à une formation géologique présentant une lithologie donnée, à partir des analyses de roches, appartenant à cette classe lithologique, publiées dans la littérature, ou à partir des gammes de variation des teneurs en U d'un type de roche donné également publiées dans la littérature.

Les deux méthodes sont utilisées conjointement, sachant que la densité des analyses directes disponibles sur une unité géologique peut être insuffisante pour être représentative de la géochimie de la formation. Le travail de géoréférencement des données utilisées, indispensable, est déjà entamé.

4.1.2. Classification des litho-géochimies en fonction de leur potentiel d'exhalation du radon

Le volet d'interprétation suivant consiste à attribuer un potentiel d'exhalation du radon à chaque type litho-géochimique défini. En l'état des expériences et connaissances actuelles, cette classification ne peut se reposer que sur les résultats obtenus dans le cadre du programme de recherche Environnement et Santé. Un exemple de classification est d'ailleurs donné dans le rapport final de ce programme (Ielsch et Haristoy, 2001). Cette classification est issue de la comparaison des gammes de teneurs en uranium des roches (litho-géochimie) et des niveaux de flux de radon mesurés sur chaque type litho-géochimique.

4.2. Seconde étape de cartographie par la prise en compte de l'hétérogénéité des sols afin d'améliorer la résolution cartographique de la première zonation « litho-géochimique » : application à une zone située dans le Massif armoricain.

Une seconde étape peut être utilisée afin d'améliorer la précision cartographique des prévisions du potentiel d'exhalation reposant uniquement sur les caractéristiques géologiques. Il s'agit alors de définir des classes de potentiel d'exhalation à partir des estimations quantitatives du flux de radon en surface par le modèle TRACHGEO développé à l'IPSN, tenant compte à la fois de la litho-géochimie et des caractéristiques physiques et chimiques du sol (annexe 4.b). Un exemple de classification a été donné dans le rapport final du programme Environnement et Santé (Ielsch et

Haristoy, 2001).

Il est important de préciser que les cartes ainsi réalisées sont basées sur les limites naturelles des unités géologiques et pédologiques, et sont indépendantes des limites administratives. Les résultats des traitements cartographiques peuvent ensuite être restitués dans le cadre des limites administratives souhaitées (régionales, départementales ou communales).

CONCLUSION

Depuis quelques années, des programmes de recherche ont été lancés en France dans le but de développer des méthodologies permettant de cartographier le potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols sur le territoire national. A terme, cette cartographie devrait permettre de cibler des zones prioritaires pour les mesures de dépistage du radon dans les bâtiments et ainsi aider les pouvoirs publics dans la gestion du risque radon.

Les résultats de ces recherches ont permis d'acquérir une meilleure connaissance du phénomène d'exhalation du radon et ont apporté des indications quant au choix des paramètres géologiques et pédologiques impliqués dans ce processus et la pertinence des outils à utiliser pour la réalisation d'une cartographie prédictive. Toutefois, ces résultats ont également souligné les difficultés de réalisation d'une cartographie prédictive liées d'une part aux incertitudes sur l'estimation du potentiel d'exhalation et d'autre part, à la densité, la validité et la disponibilité des informations géologiques et pédologiques nécessaires à la cartographie. A l'heure actuelle, il n'existe pas d'assurance sur la disponibilité et la représentativité statistique de ces données, à l'échelle du territoire français.

C'est pourquoi, il est encore nécessaire de continuer les travaux dans ce domaine. L'IPSN s'engage à poursuivre l'axe de recherche engagé depuis quelques années en appliquant la méthodologie de cartographie prédictive déjà élaborée (Ielsch et Haristoy, 2001) sur une zone d'une superficie supérieure aux transects précédemment étudiés (superficie de chaque transect d'environ 1000 km²), c'est-à-dire équivalente à celle d'un département (7000 km²).

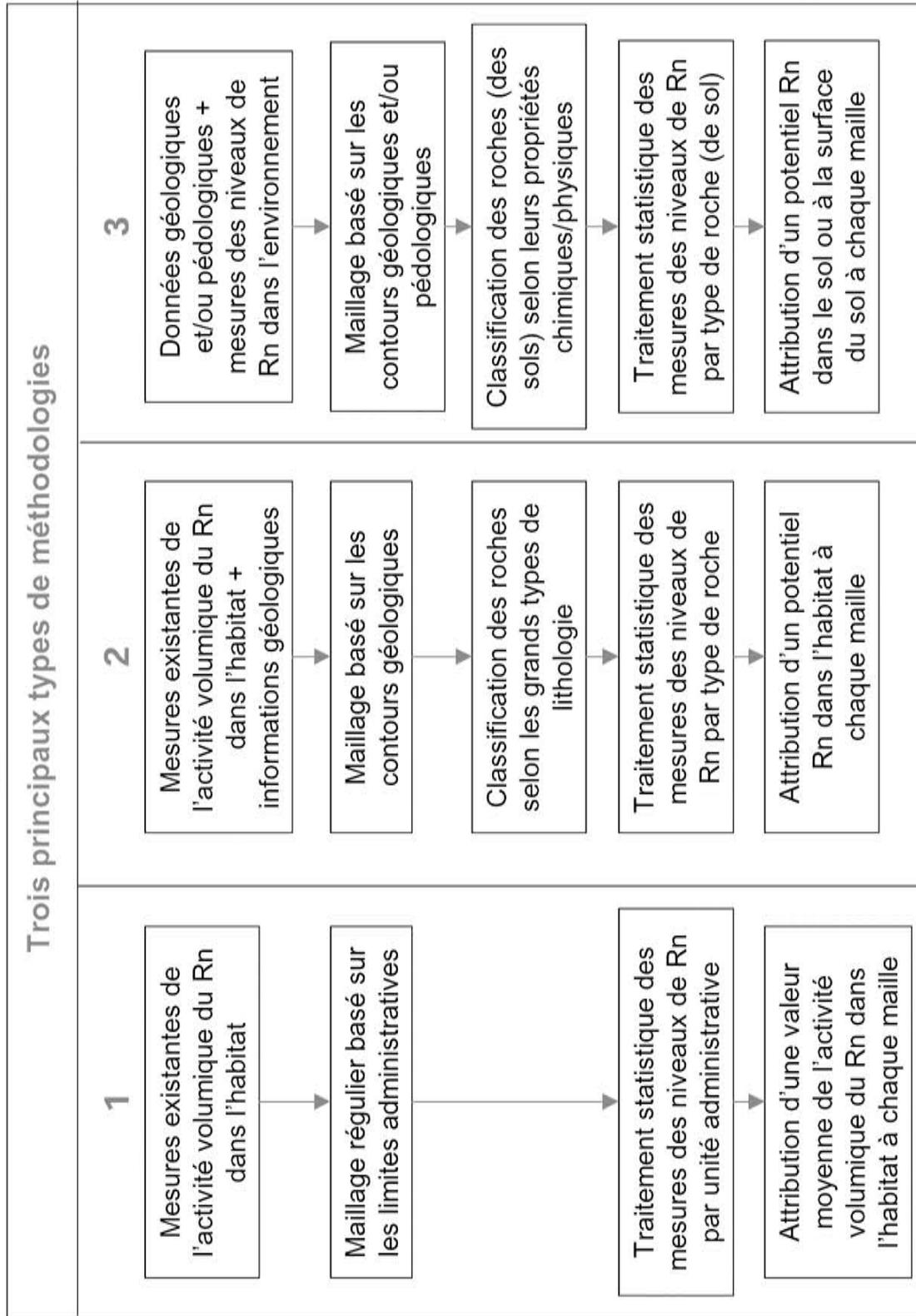
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Äkerblom, G.V. et Wilson, C. (1981). Radon gas. A radiation hazard from radioactive bedrock and building materials : Internat. Assoc. Engineering Geology Bulletin, 23 : 51-61.
- Bonijoly, D., Perrin, J., Truffert, C. et Asfirane, F. (1999). Couverture géophysique aéroportée du Massif armoricain. Rap. BRGM R 40471, 75 p., 13 fig., 12 tabl., 2 ann.
- Demongeot, S. (1997). Recherche des différents paramètres caractérisant le potentiel d'exhalation en radon des sols. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 253 p.
- Ielsch, G., Ferry, C., Tymen, G. et Robé, M.-C. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate. Sous presse dans le Journal of Environmental Radioactivity.
- Ielsch, G. et Haristoy D. (2001). « Mise au point d'une méthodologie permettant l'élaboration d'un outil cartographique prédictif en vue d'identifier les zones potentiellement exposées à de fortes concentrations de radon » (2 Volumes). Programme Environnement et Santé 1997. Rapport IPSN-BRGM Réf. IPSN/DPRE/SERGD RT 01-05.
- Ielsch, G., Thiéblemont, D., Labed, V., Richon, P., Tymen, G., Ferry, C., Robé, M.C., Baubron, J.C. et Béchenec, F. (2001). Radon (^{222}Rn) level variations on a regional scale : influence of the basement trace elements (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates. Journal of Environmental Radioactivity, 53(1) : 75-90.
- Ielsch, G., Ferry, C., Tymen, G., Haristoy D. & Robé, M.-C. (2001). Quantification of the radon exhalation rate at the surface of the soil : a new predictive tool based on the physical and chemical properties of geological formations and soils. "Third European Symposium on Protection against Radon" (Liège, 10-11 mai 2001).
- Ielsch, G. (2000). Mise au point d'une méthodologie prédictive des zones à fort potentiel d'exhalation du radon. Thèse de Doctorat, spécialité Géosciences, Université de Bretagne Occidentale (Brest), 276 p.
- Nielson, K.K. et Rogers, V.C. (1990). Radon transport properties of soil classes for estimating indoor radon entry. *In* : Cross, Fredrick T., ed., Indoor Radon and Lung Cancer: Reality or Myth ? Twenty-ninth Hanford Symposium on Health and the Environment, Richland, Wash., October 15-19, 1990, Proceedings : Richland, Wash, Battelle Memorial Press, Part 1, p 357-372 [NTIS]
- Sachs, H.M., Hernandez T.L. et Ring, J.W. (1982). Regional geology and radon variability in buildings. Environment International, 8(1-6) : 97-103.
- Tanner, A.B. (1964). Radon migration in the ground : a review. *In* : Adams, J.A.S.; Lowder, W. M., eds. The natural radiation environment, Chicago : University of Chicago Press, p 161-190.

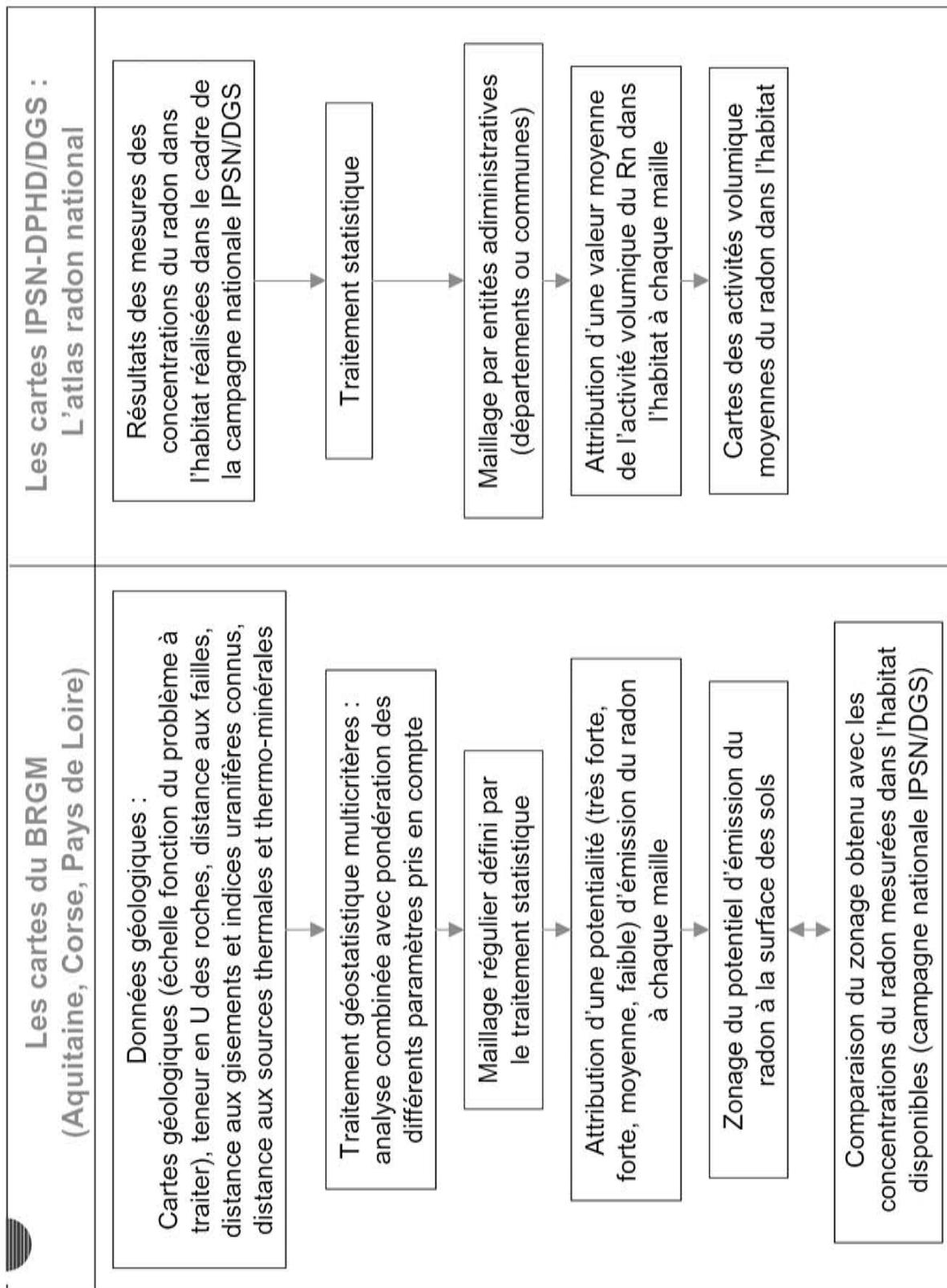
- Tanner, A.B. (1980). Radon migration in the ground : a supplementary review. *In* : Natural Radiation Environment III, Technical Information Center/U. S. Department of Energy, Springfield, VA, p. 5-56.
- Tanner, A.B. (1991). The role of diffusion in radon entry into houses. *In* : The 1990 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, Atlanta, Ga., 19-23 February 1990 : Research Triangle Park, N.C., U.S. Environmental Protection Agency Rept. EPA600/9-91-026b, Proceedings, Vol. 2 : Symposium Oral Papers, Paper N° V-2, p.5-21-5-32.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), (1993). Sources and effects of ionizing radiation ; Report to the General assembly with Scientific annexes, New-York : United Nations.

TABLEAUX ANNEXES

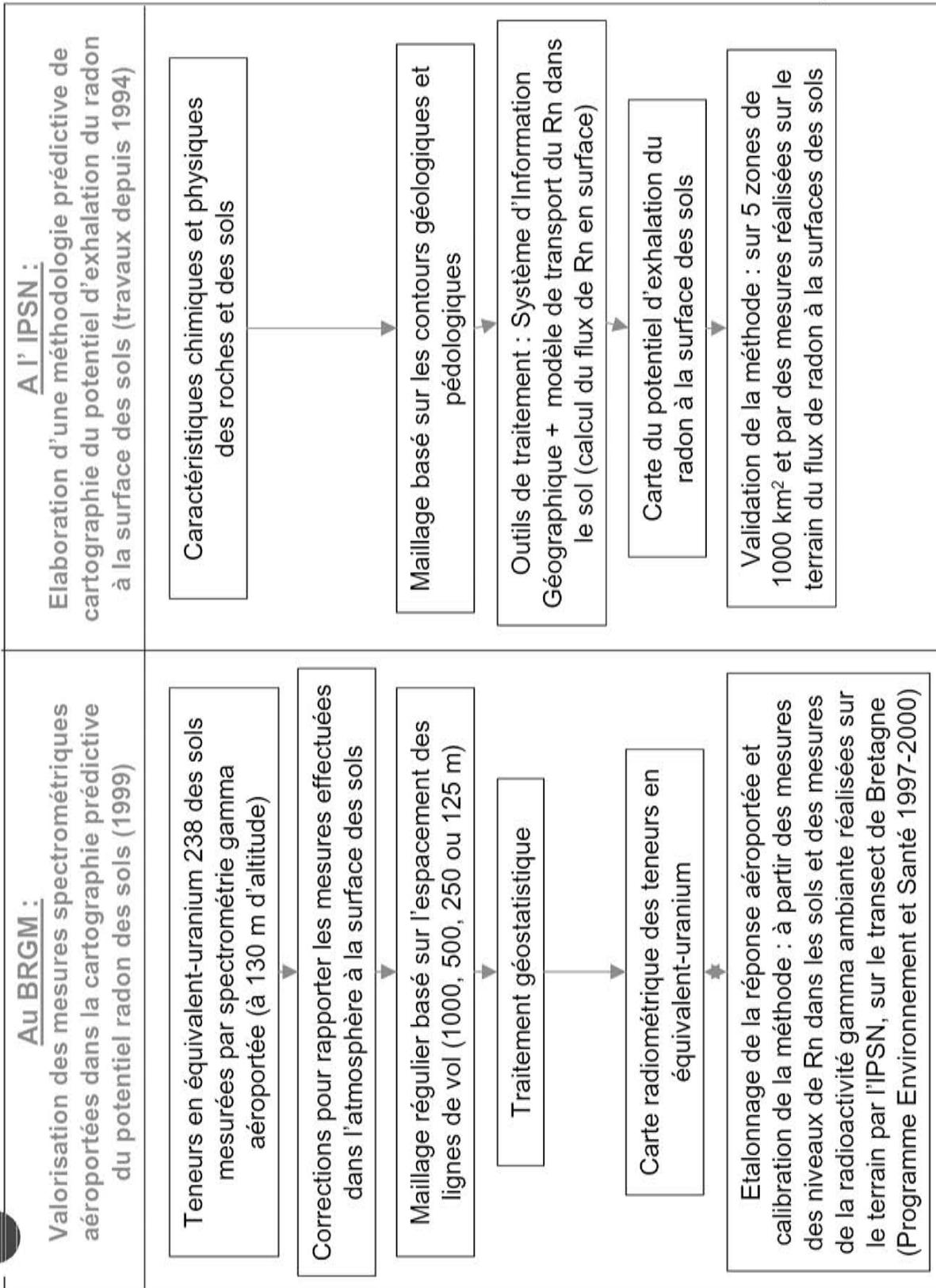
Annexe 1 - La cartographie du potentiel radon des territoires : état de l'art sur les différentes approches testées en France et à l'étranger



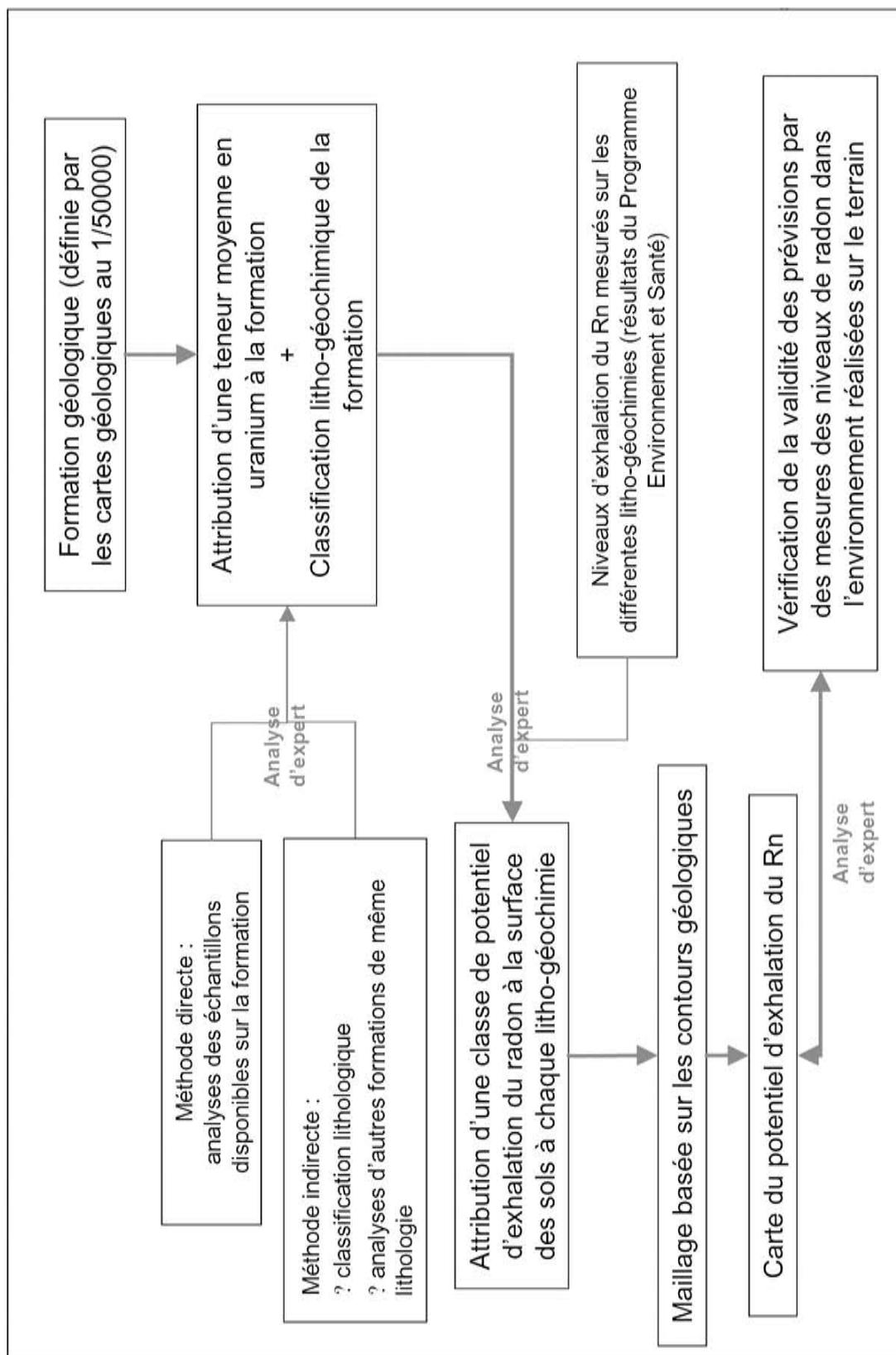
Annexe 2 - Les cartes existantes en France



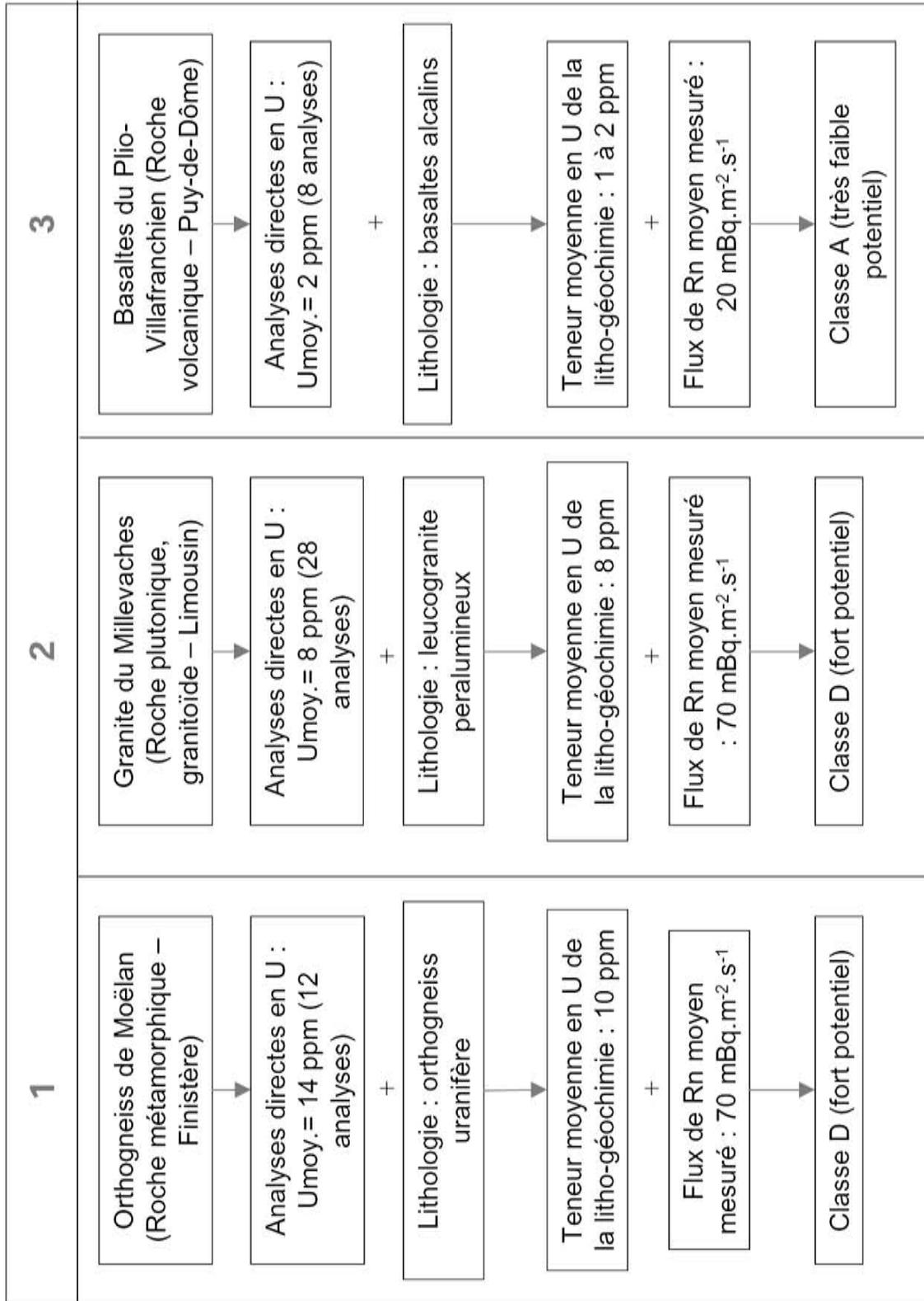
Annexe 3 - Les programmes de recherche déjà réalisés en France



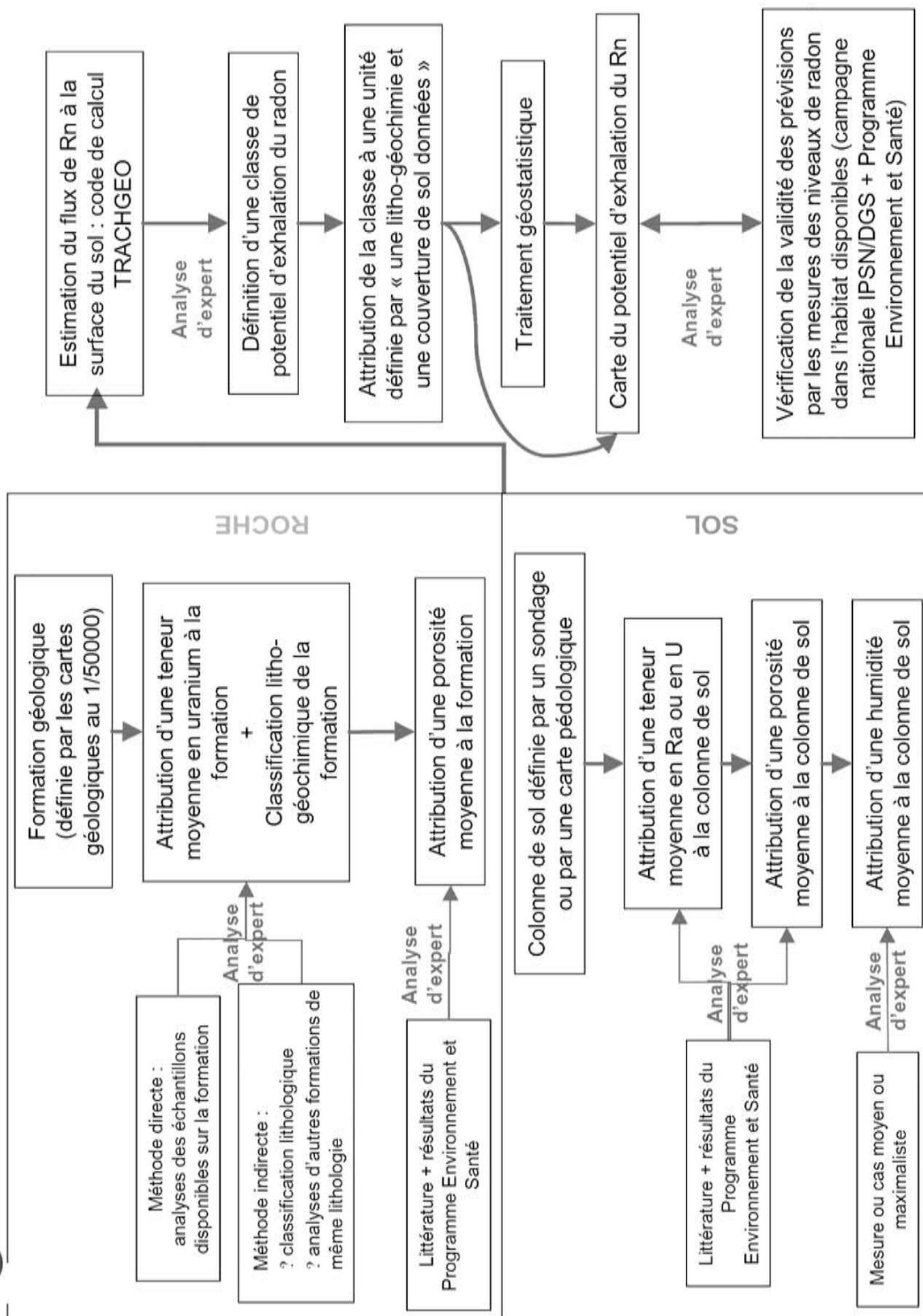
Annexe 4.a - Axe de recherche de l'IPSN pour cartographier le potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols : la 1ère étape de la démarche



Annexe 4.a (suite) La 1ère étape de la démarche (suite) : exemples d'application



Annexe 4.b - Axe de recherche de l'IPSN pour cartographier le potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols : la 2nde étape de la démarche



Notes

Notes