

MÉTHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DES ZONES PRIORITAIRES

pour la gestion du risque lié au radon

Géraldine IELSCH, Edward Marc CUSHING
Bureau d'évaluation des risques liés à la radioactivité naturelle

Philippe COMBES
Geoter

Le radon est un gaz radioactif naturel omniprésent à la surface de la Terre. L'isotope 222, produit par la désintégration du radium 226, lui-même descendant de l'uranium 238 présent naturellement dans les roches et les sols, est le plus couramment rencontré dans l'environnement, du fait de sa période radioactive relativement longue (3,8 jours). Le flux de radon émis à la surface des sols est variable et fonction de différents paramètres, liés notamment aux propriétés des roches et des sols qui ont donné naissance à ce gaz, et au travers desquels il peut migrer plus ou moins facilement par différents processus physiques, jusqu'à l'atmosphère. Le radon peut s'accumuler dans l'air plus confiné des bâtiments où l'homme passe la majeure partie de son temps. La présence de ce gaz, reconnu cancérogène pulmonaire avéré depuis 1988, peut alors induire une exposition par inhalation et constituer un risque sanitaire. Parmi les axes de la politique de gestion de ce risque, une étape particulière consiste à délimiter les zones où, compte tenu de leurs caractéristiques naturelles (géologiques en particulier), les cas de présence de radon en concentration importante dans les bâtiments sont les plus susceptibles de se produire. Cette étape consiste à établir ce qu'on a coutume d'appeler une « cartographie du radon ».

Introduction

La cartographie radon à l'international

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses mesures de la concentration du radon dans l'habitat ont été réalisées en Europe, aux États-Unis et au Canada. Un lien entre la géologie et les activités du radon dans les bâtiments a été constaté depuis le début des années 1980. Les études menées depuis vingt ans ont visé à mettre en place des méthodes permettant de gérer au mieux le risque lié au radon dans l'habitat.

Un des axes utiles à cette gestion consiste à cartographier les zones du territoire sur lesquelles les cas de concentration élevée du radon

dans les bâtiments sont les plus susceptibles d'être rencontrés. La cartographie (dite « cartographie du radon ») obtenue a un double objectif : d'une part, orienter les campagnes de mesures dans les bâtiments existants qui peuvent présenter des concentrations de radon supérieures aux seuils d'intervention fixés (valeurs considérées par les autorités publiques comme nécessitant la mise en œuvre d'actions correctives), d'autre part, identifier les zones pour lesquelles des mesures préventives pourraient être prises dans les constructions futures.

Les informations à partir desquelles ce travail peut être mené sont notamment : les résultats de mesure de l'activité volumique du radon dans l'habitat, dans les sols ou dans l'atmosphère, du flux

de radon à la surface des sols, les caractéristiques géologiques et pédologiques locales et éventuellement l'architecture des bâtiments. Les paramètres utilisés sont soit directement déterminés *in situ* ou en laboratoire, soit estimés indirectement grâce à d'autres outils comme les cartes géologiques, pédologiques, radiométriques, etc. Au cours des dernières années, des travaux importants ont été réalisés dans plusieurs pays dans l'objectif d'aboutir à une cartographie du radon et d'améliorer la connaissance de l'exposition domestique à ce gaz. Les méthodes développées pour cela apparaissent diversifiées [Dubois, 2005 ; Ielsch, 2005 ; Miles et Appleton, 2005 ; Bossew et Dubois, 2006 ; Dubois et Bossew, 2006 ; Barnet et Fojtíková, 2006 ; Appleton, 2007 ; Kemski *et al.*, 2008 ; Ielsch, 2008].

Afin de mutualiser les efforts européens dans ce domaine, un groupe de travail a été constitué en août 2008, piloté par la Commission européenne, dans l'objectif de réaliser à terme une cartographie européenne du radon, à l'aide d'une méthode commune fondée sur des critères géologiques. Les pays suivants y sont représentés : Royaume-Uni, Allemagne, Belgique, France, République tchèque, Espagne, Suède, Norvège, Autriche.

Les recherches antérieures menées par l'IRSN dans ce domaine

La principale difficulté rencontrée dans la gestion du risque lié au radon dans les bâtiments en France est due à la grande variabilité de l'exposition au radon sur le territoire national, compte tenu notamment de sa diversité géologique (*i.e.* chaînes de montagnes anciennes riches en granites et formations métamorphiques, chaînes de montagnes plus jeunes formées en majorité de séries sédimentaires, bassins sédimentaires). Cette variabilité est importante à prendre en compte pour adapter la politique de gestion du risque lié à l'exposition au radon. Cela implique le développement et la mise en œuvre d'outils et de moyens adaptés.

C'est pourquoi l'IRSN s'est engagé depuis plusieurs années dans des recherches visant à développer et valider une méthode permettant de cartographier le potentiel d'exhalation⁽¹⁾ du radon sur le territoire. Il ne s'agit pas d'estimer directement le risque sanitaire lié au radon mais de fournir des indications qualitatives sur la potentialité des terrains à émettre du radon à la surface des sols. Des travaux ont été menés à l'IRSN depuis 1994 [Demongeot, 1997], notamment dans le cadre du programme Environnement et Santé 1997, mis en place par les ministères de l'Environnement et de la Santé [Ielsch et Haristoy, 2001 ; Ielsch *et al.*, 2001, 2002]. Ces travaux, poursuivis en 2002, ont conduit au développement d'une méthode de cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols à partir des paramètres géologiques et pédologiques locaux, à l'échelle régionale. La comparaison des

résultats prédictifs obtenus par cette méthode aux résultats de mesures *in situ* de flux de radon à la surface des sols, sur plusieurs zones sélectionnées pour leurs contextes géologiques différents et représentatifs de la variabilité du sous-sol français (Bourgogne, Bretagne, Massif central, Pyrénées, Languedoc), a permis de valider la démarche [Ielsch *et al.*, 2002 ; Ielsch, 2003 ; Ielsch et Cuney, 2004].

La demande actuelle de l'Autorité de sûreté nucléaire : mise à jour des zones prioritaires

Dans la réglementation actuelle relative à la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public, une obligation de mesure est faite à certains établissements dans 31 départements, classés prioritaires sur la base des résultats de la campagne nationale de mesures du radon dans l'habitat (effectuée entre 1982 et 2000 par l'IPSN et la DGS⁽²⁾).

L'expérience acquise au travers de l'application de cette réglementation a mis en évidence les limites d'une définition des zones prioritaires fondée sur les limites administratives (en l'occurrence celles des 31 départements). Compte tenu des hétérogénéités géologiques importantes pouvant exister au sein d'un même département, des zones présentant des caractéristiques peu propices à l'existence de concentrations élevées en radon dans les bâtiments se trouvent soumises à une exigence de dépistage, alors même que d'autres zones présentant un niveau de risque beaucoup plus élevé y échappent, car non situées dans l'un des 31 départements jugés prioritaires. Devant ce constat, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à l'IRSN d'effectuer une synthèse de différentes approches utilisées localement en France pour la « cartographie du radon » et de proposer des éléments généraux de méthode permettant de découper le territoire en zones classées selon leur « potentiel radon » [Ielsch, 2005]. L'approche proposée à cette fin par l'IRSN consiste à déterminer la capacité des formations géologiques à produire du radon et à faciliter son transfert jusqu'à atteindre la surface avant sa désintégration.

L'application de cette méthode de cartographie sur une zone test située en Bourgogne, équivalente à trois départements, a montré que les résultats obtenus étaient en grande majorité cohérents avec les résultats de mesure de l'activité volumique du radon dans l'habitat disponibles sur cette zone [Ielsch, 2007]. Le zonage obtenu par la méthode apporte une précision supérieure aux limites départementales et est adapté pour déterminer les communes qui pourraient être le plus

(1) L'exhalation du radon à la surface des sols (ou émission) est le résultat de la production du radon dans les roches puis de son transport dans les roches et les sols jusqu'à la surface.

(2) IPSN : Institut de protection et de sûreté nucléaire ; DGS : Direction générale de la santé.

concernées par la problématique liée au radon. Ces résultats encourageants ont conduit l'ASN à demander à l'IRSN d'appliquer la méthode à l'ensemble du territoire français, afin de redessiner les contours des zones prioritaires et de les préciser par rapport à l'échelle imposée actuellement par les limites départementales. La cartographie du potentiel d'exhalation du radon du territoire a commencé en mars 2008 et devrait s'achever à la fin de l'année 2009. Cette étude a pour objectif de fournir des cartes départementales (96 départements) et régionales du « potentiel radon », avec une précision équivalente à celle de la carte géologique de la France au 1/1 000 000^e, pour la totalité du territoire métropolitain.

Méthode

Il est à rappeler que la méthode retenue n'a pas pour objectif de déterminer un « potentiel radon » à partir des résultats de mesure de l'activité volumique de ce gaz dans les bâtiments, mais vise à estimer « le potentiel radon » des terrains, qui constitue la source principale du radon dans les bâtiments.

Cette méthode consiste à prendre en compte les principaux paramètres influençant, d'une part, la production du radon dans le sous-sol et, d'autre part, le transport du radon depuis sa source jusqu'à la surface des sols. Les paramètres retenus ne sont pas exhaustifs, mais permettent d'appliquer de manière homogène la méthode à l'ensemble du territoire, à partir d'informations existantes. Cette méthode est en effet fondée sur la compilation et l'exploitation de données géologiques disponibles pour chaque département concerné, issues de cartes, de banques d'informations, de résultats de travaux de recherches, etc. Elle n'implique ni investigation ni acquisition de données supplémentaires sur le terrain. L'ensemble des données utilisées est incorporé dans un Système d'information géographique (SIG), afin de réaliser des croisements de paramètres géoréférencés et ainsi définir un découpage du territoire en zones présentant un même niveau de potentiel vis-à-vis du radon.

La méthode mise en œuvre comprend trois étapes. La première consiste à classer les formations géologiques en fonction de leur teneur mesurée ou supposée en uranium, permettant ainsi de définir la capacité potentielle des terrains à produire du radon, l'uranium étant à l'origine de ce gaz. Dans un deuxième temps, la cartographie obtenue peut être affinée en prenant en compte, dans la mesure du possible, les facteurs qui facilitent le transport du radon dans les roches et peuvent favoriser son exhalation à la surface du sol. La troisième étape a pour objet d'établir une classification finale des zones, obtenue par l'analyse des différents paramètres, de manière à aboutir à une carte du potentiel radon des terrains.

Première étape : évaluation du potentiel source en radon des terrains

Critères retenus et données utilisées

Les critères retenus pour déterminer la capacité potentielle des terrains à produire du radon sont les suivants : la lithologie (type de roche), les résultats d'analyses directes de l'uranium dans des échantillons de roches, les résultats d'analyses d'uranium pour des lithologies similaires dans d'autres sites que celui considéré, les résultats de mesures radiométriques (mesure de la radioactivité ambiante par des moyens mobiles autoportés ou aéroportés de détection du rayonnement gamma), la localisation d'indices miniers uranifères, la proximité d'anciennes mines d'uranium, l'existence de particularités locales ayant pu conduire à des teneurs en uranium plus élevées, telles que la présence de formations riches en matières organiques (schistes noirs, charbons, lignite, etc.).

Les données utilisées sont la carte géologique de la France à 1/1 000 000^e [Chantraine *et al.*, 2003], les informations fournies par d'autres cartes géologiques plus précises au 1/50 000^e et au 1/250 000^e, les résultats d'analyses chimiques de roches compilées dans des banques de données (projets de recherche IRSN, BRGM et base Artemise du CREGU-G2R⁽³⁾) comprenant environ 5 000 résultats d'analyses ponctuelles, les données géochimiques disponibles concernant des lithologies similaires en France ou à l'étranger (résultats de recherches bibliographiques), l'inventaire des sites miniers d'uranium français (MIMAUSA, IRSN) et la base de données Mines de Geoderis⁽⁴⁾.

Les étapes d'estimation sont les suivantes :

- compilation des données pour définir une teneur en uranium par formation ;
- regroupement et classification des formations en fonction de leurs lithologies puis classification des lithologies par gamme de teneurs vraies ou estimées en uranium (cette première carte est appelée carte de « potentiel source 1 ») ;
- identification de particularités locales susceptibles d'augmenter le « potentiel source 1 » d'une formation donnée et conduisant à l'établissement d'une carte dite « potentiel source 2 ».

Classification et cartographie de la capacité potentielle des formations géologiques à produire du radon

- Regroupement et classification des formations en fonction de leur lithologie et de leur teneur possible en uranium (« potentiel source 1 »).

(3) Unité mixte de recherche CNRS et université Henri Poincaré Nancy.

(4) Groupement d'intérêt public habilité à intervenir, à la demande de l'administration, sur tout type d'exploitation minière arrêtée et dans différents domaines (le BRGM et l'Ineris y participent).

Lithologie	Teneurs moyennes en U (ppm)	« Potentiel source 1 » correspondant
Roches plutoniques et volcaniques basiques et ultrabasiques Amphibolites Formations carbonatées	≤ 2	Faible
Formations sédimentaires détritiques et paragneiss (schistes, sauf schistes bitumineux)	≤ 4 - 5	Faible à moyen (hétérogène)
Granitoïdes et métagranitoïdes peu uranifères (granodiorites, granites, leucogranites peraluminieux, granitoïdes calco-alcalins, orthogneiss), roches volcaniques de même affinité chimique et autres lithologies particulières	≤ 8	Moyen
Granites-leucogranites peraluminieux, granitoïdes subcalcaires, granites peralcalins de Corse, roches volcaniques de même affinité chimique et autres lithologies particulières	≥ 8	Élevé à très élevé

Tableau 1 Teneurs moyennes en uranium des formations géologiques et « potentiel source 1 » correspondant.

L'objectif est d'affecter une classe de teneurs moyennes en uranium aux formations géologiques de la France à l'échelle du 1/1 000 000^e. Il s'agit de faire une estimation de leurs teneurs en uranium, à partir des données lithologiques et géochimiques fournies par la carte géologique de la France et les résultats des analyses géochimiques disponibles directement sur les différentes formations géologiques ou par comparaison avec des lithologies similaires connues dans d'autres régions. En premier lieu, les résultats des analyses géochimiques sont traités afin d'obtenir les teneurs directes moyennes en uranium des formations géologiques. En se fondant sur les caractéristiques lithologiques et géochimiques, et la définition de classes de valeurs (*tableau 1*), on attribue ensuite une teneur probable en uranium aux formations pour lesquelles il n'existe aucune donnée mesurée. La classification obtenue, sur la base des concentrations estimées en ppm d'uranium et regroupées en quatre classes, permet de déterminer et cartographier la capacité potentielle des formations géologiques à produire du radon : carte du « potentiel source 1 ». Cette carte peut être affinée par la prise en compte d'éventuelles particularités locales susceptibles d'augmenter cette capacité.

- Identification et prise en compte de particularités locales susceptibles d'augmenter le « potentiel source 1 » d'une formation donnée : obtention du « potentiel source 2 ».

L'estimation de la teneur en uranium des formations géologiques, réalisée à l'issue de la première étape, peut être réajustée par l'identification de particularités locales.

Tout d'abord, certaines formations spécifiques régionales, en particulier certains dépôts sédimentaires, peuvent présenter une teneur en uranium plus élevée que la moyenne généralement observée pour une lithologie donnée. La recherche, à l'échelle de la carte géologique du millionième, de ces formations en termes de lithologie (charbon, grès arkosique, etc.) et/ou d'âge stratigraphique (permien, carbonifère, etc.) permet d'identifier les formations géologiques concernées. Certaines de ces formations ne sont toutefois pas cartographiées à l'échelle du millionième. Leur délimitation nécessite alors la consultation de cartes à des échelles plus précises.

En outre, la présence de travaux d'exploration à la recherche d'uranium, de mines d'uranium, de mines de charbon au sens large (houille, charbon, lignite) et de gîtes permet également de localiser les formations géologiques particulières mentionnées précédemment. Le « potentiel source 1 » des formations concernées est alors augmenté d'une unité.

La carte résultant de la prise en compte du « potentiel source 1 » et des particularités locales est appelée carte du « potentiel source 2 ». Ce dernier est classé en cinq catégories : faible, faible à moyen, moyen, élevé et très élevé (*tableau 2*).

Seconde étape : détermination et prise en compte de facteurs aggravants pouvant favoriser l'exhalation du radon à la surface du sol

Les critères retenus

On peut définir un certain nombre de facteurs « aggravants », c'est-à-dire susceptibles de faciliter le transfert du radon des formations géologiques vers la surface. Ces facteurs aggravants vont avoir pour effet d'augmenter plus ou moins localement les possibilités de relâchement du radon de la zone concernée. Ces facteurs peuvent être naturels ou anthropiques :

- l'existence de failles majeures ou actives, avec leurs zones d'influence ;
- les sites miniers où l'exploitation des mines s'est accompagnée de la réalisation d'ouvrages souterrains (puits, galeries...) pouvant conduire à une déstabilisation des terrains ;
- les principaux sites hydrothermaux ;
- éventuellement, d'autres cavités souterraines naturelles, dans des formations karstiques.

« Potentiel source 2 »
Faible
Faible à moyen (hétérogène)
Moyen
Élevé
Très élevé

Tableau 2 Classification du « potentiel source 2 » d'une formation géologique.

« Potentiel source 2 »	Facteur aggravant	Potentiel radon de la zone d'intersection avec la formation géologique affectée
Faible	+ 1	Faible à moyen
Faible à moyen		Moyen
Moyen		Élevé
Élevé		
Très élevé		Très élevé

Tableau 3 Impact d'un facteur aggravant sur le potentiel radon d'une formation géologique.

Les données utilisées pour identifier ces facteurs sont la carte géologique de la France à 1/1 000 000^e (BRGM, version 6 révisée 2003), les informations d'autres cartes géologiques régionales plus précises (BRGM), l'inventaire des sites miniers d'uranium français (MIMAUSA⁽⁵⁾, IRSN pour le compte du ministère chargé de l'Énergie), la base de données Mines de Geoderis, la carte au 1/1 000 000^e des eaux minérales et thermales de la France (BRGM, 2004), la carte de la sismicité et des failles au 1/1 000 000^e (IRSN, Geoter).

La classification et la cartographie du « potentiel radon »

■ Les failles

La sélection des « failles majeures » représentées sur la carte géologique de la France au millionième est complétée par l'ajout des structures tectoniques n'apparaissant pas comme des failles majeures, mais qui ont une activité « récente » avérée (quaternaire, voire plio-quaternaire). En effet, l'activité des failles est un indice supplémentaire des facilités de circulation du radon, du fait de la présence de fractures ouvertes et de faciès bréchiques plus perméables. Par ailleurs, il peut s'avérer opportun de tenir compte des grands accidents reconnus par la géophysique ; ces accidents de grande ampleur peuvent en effet avoir des connexions avec les failles de surface et ainsi favoriser le transfert du radon vers la surface.

Les failles sont donc considérées *a priori* comme des facteurs aggravants, avec une zone d'influence estimée de manière forfaitaire à 500 m de part et d'autre de la faille (cette dimension forfaitaire tient compte des incertitudes, à l'échelle du millionième, sur la position des failles, mais aussi du fait que certains grands accidents sont en fait des « zones » de failles multiples ayant une certaine largeur).

Ainsi, la présence d'une faille dans une formation donnée conduit au classement de la zone d'intersection entre la zone d'influence

de la faille et la formation dans la catégorie supérieure de potentiel radon (*tableau 3* et *figure 1*).

■ Les puits et galeries de sites miniers débouchant au jour
L'exploitation de la base de données Mines de Geoderis permet de prendre en compte les désordres liés aux activités minières et aux ouvrages souterrains créés par les exploitations. D'une part, ces ouvrages anthropiques souterrains agissent à la manière de collecteurs qui vont drainer le radon et accélérer son passage du milieu souterrain vers la surface ; d'autre part, les travaux souterrains ont induit des fissures ou fractures dans les formations géologiques.

L'effet aggravant de la présence des ouvrages souterrains est considéré se concentrer à l'aplomb de ceux-ci (par projection de leur emprise à la surface). Une zone d'incertitude (ou « tampon ») forfaitaire de 500 m est appliquée autour des sites concernés. L'intersection du facteur aggravant et des formations géologiques concernées se voit alors attribuer un potentiel radon majoré (*tableau 3* et *figure 1*).

■ Les sources thermominérales

Les sources, résurgences et autres exsurgences peuvent constituer des sources d'émission de radon dans la mesure où elles constituent des drains préférentiels pouvant collecter le radon (sous forme de gaz dissous dans l'eau) et faciliter son transfert du sous-sol vers la surface.

Lorsque les eaux profondes chargées de radon viennent au contact de l'atmosphère libre, elles libèrent le radon qu'elles contiennent dans l'atmosphère. La localisation des résurgences et autres exsurgences est connue par la compilation de la base de données des cavités souterraines naturelles, alors que les sources thermales sont connues de la carte au 1/1 000 000^e des eaux minérales et thermales de France (BRGM, Risler et al., 2004).

(5) MIMAUSA : Mémoire et impact des mines d'uranium, synthèse et archives.

Seuls les principaux sites concernés par des sources thermominérales sont retenus. Le facteur aggravant est appliqué à l'aplomb de ces sites, avec une zone d'incertitude (« zone tampon ») forfaitaire de 500 m autour du site. Le potentiel radon local est majoré dans la zone correspondante (*tableau 3 et figure 1*).

■ Les formations géologiques à tendance karstique

Un karst constitue un espace plus ou moins ouvert dans lequel le radon peut se concentrer et circuler. Les cavités naturelles de type karstique forment des réseaux, parfois extrêmement étendus, dans bon nombre de formations carbonatées sur le territoire national ; leur extension est souvent difficile à estimer. Toutefois, les lithologies et les conditions dans lesquelles ils se développent sont bien connues. La base de données nationale des cavités (BRGM) fournit une information ponctuelle sur la présence d'une cavité en surface, alors que le réseau peut s'étendre sur de grandes distances à partir de ce point. Les points renseignés dans la base représentent des orifices ainsi que des centres de cavités ou de réseaux de cavités. Les cavités ou les réseaux de cavités de grande extension ne sont que très partiellement représentés par ces points. Les contraintes, liées au renseignement hétérogène à l'échelle nationale de la base de données cavités du BRGM (inventaire en cours) et à la difficulté, à partir de la carte géologique de la France au millionième, de ne sélectionner que

les formations géologiques présumées karstiques rendent délicate la prise en compte de ce facteur aggravant de manière harmonisée à l'échelle nationale. Dans ce cadre, la présence d'un karst n'a pu être prise en compte dans la méthode de cartographie.

Troisième étape : classification finale des terrains en fonction de leur potentiel radon et restitution cartographique

Cette ultime phase résulte du croisement des différentes informations recueillies au cours des étapes précédentes :

- la carte de « potentiel source 2 » liée aux teneurs en uranium des formations géologiques ;
- la carte des facteurs aggravants pouvant faciliter le transfert du radon.

Le traitement cartographique aboutit à une carte de potentiel radon final des terrains, en considérant trois classes qui résultent de la simplification de la classification préalablement adoptée à l'issue de l'étape 2. La démarche globale est résumée dans la *figure 1*.

Premiers résultats : exemple de la région des Pays de la Loire

Classification des formations géologiques selon leurs « potentiels sources »

Cadre géologique des Pays de la Loire

La région des Pays de la Loire est constituée, en grande partie, par les terrains du massif armoricain (formations cristallophylliennes), composés de granites cadomiens et hercyniens et de métasédiments protérozoïques et paléozoïques (volcanites et sédiments), recouverts à l'est par les sédiments mésozoïques et localement cénozoïques transgressifs du bassin de Paris. Une faible frange au sud est recouverte par les sédiments du bassin d'Aquitaine.

Cette région est traversée par un accident structural majeur ONO-ESE, le cisaillement sud-armoricain, qui scinde les formations du massif armoricain en deux blocs, eux-mêmes organisés en unités distinctes ayant leurs propres caractéristiques géodynamiques et structurales.

La *figure 2* présente une carte géologique simplifiée de la région.

Regroupement et classification des formations en fonction de leur lithologie et de leur teneur présumée en uranium (« potentiel source »)

La compilation des résultats d'analyses géochimiques disponibles et la connaissance des teneurs en uranium des différentes formations géologiques de la région ont permis d'attribuer à celles-ci une

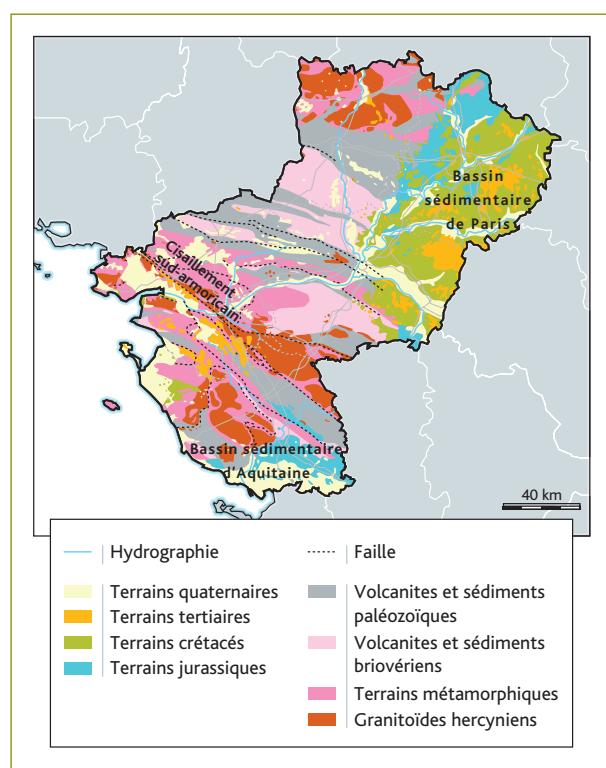


Figure 2 Carte géologique simplifiée de la région Pays de la Loire.

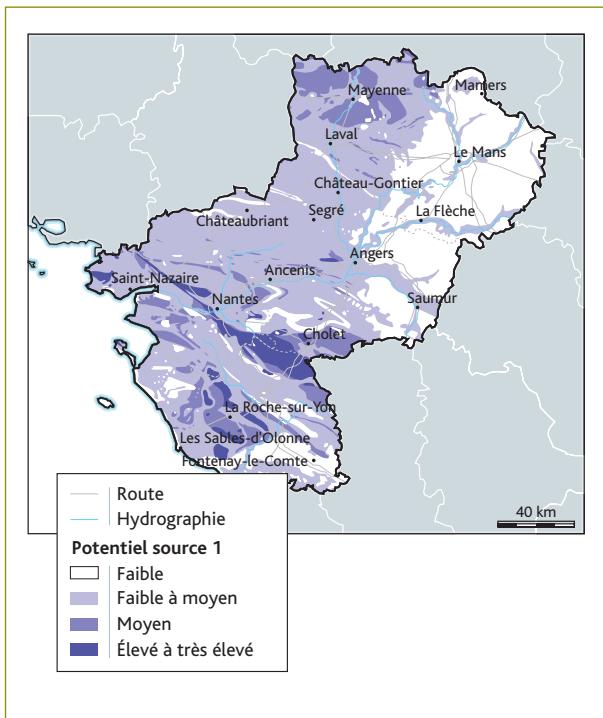


Figure 3 Carte du « potentiel source 1 » de la région des Pays de la Loire.

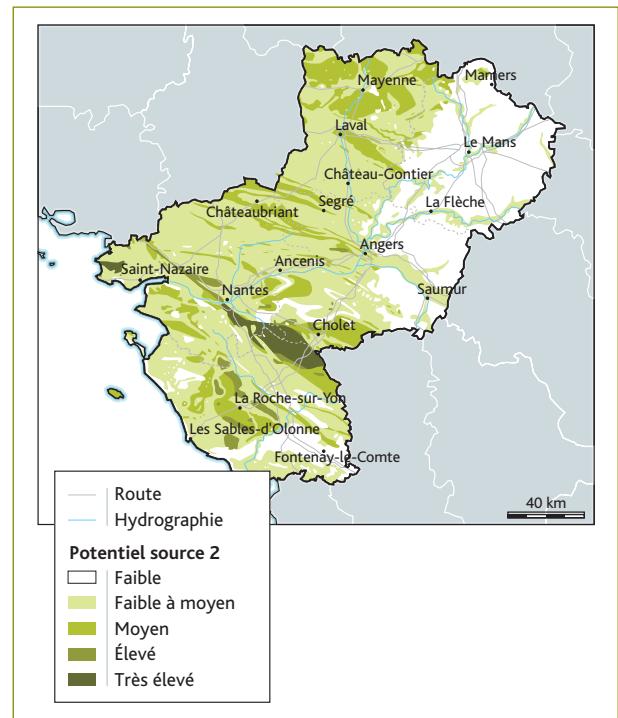


Figure 5 Carte du « potentiel source 2 » de la région des Pays de la Loire.

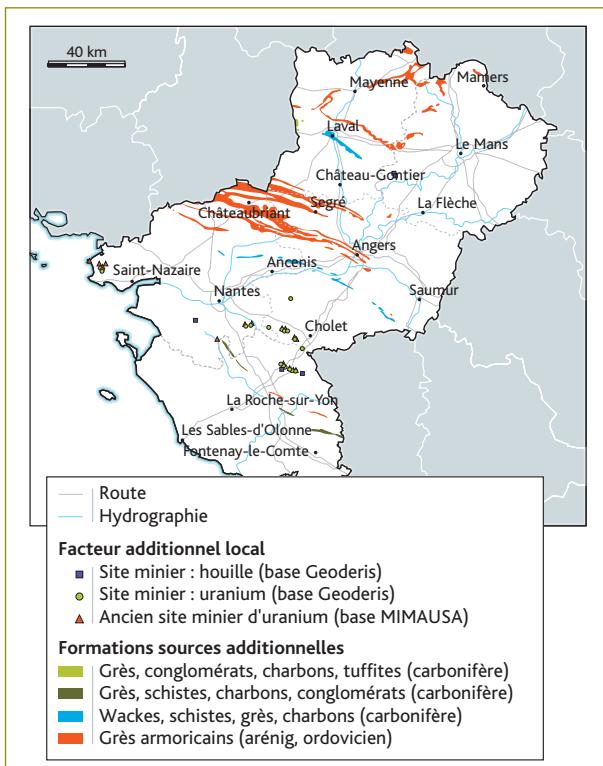


Figure 4 Carte des particularités locales permettant de cibler les formations géologiques pouvant présenter une teneur en uranium plus élevée que la valeur moyenne observée sur des lithologies comparables, dans la région des Pays de la Loire.

gamme de teneurs probables en uranium et de les classer en fonction de cette teneur. Cette étape a conduit à la carte du « potentiel source 1 » présentée dans la *figure 3*.

De plus, sur la base des données de la « littérature » et des caractéristiques chimiques des formations géologiques des Pays de la Loire, les séries particulières qui pourraient présenter une teneur en uranium plus élevée que la valeur généralement observée sur ces lithologies ont pu être distinguées. Il s'agit de séries sédimentaires et volcanosédimentaires riches en charbons d'âge carbonifère et des grès armoricains d'âge ordovicien.

Par ailleurs, la localisation d'exploitations minières d'uranium ou de charbon a également permis de localiser certaines formations géologiques uranifères (*figure 4*). Le réajustement de la teneur en uranium de ces formations particulières a conduit à la réalisation de la carte du « potentiel source 2 » (*figure 5*).

Détermination et prise en compte de facteurs aggravants pouvant favoriser l'exhalation du radon à la surface

L'ensemble des facteurs susceptibles d'augmenter l'exhalation du radon, recensés à partir des données disponibles, sont reportés sur la carte de la *figure 6* : failles majeures et failles actives, zones

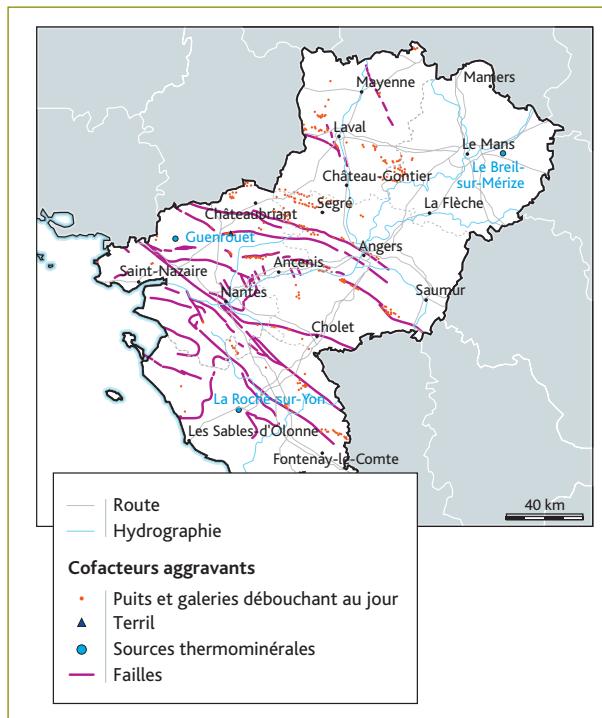


Figure 6 Carte des facteurs pouvant augmenter l'exhalation de radon dans la région des Pays de la Loire.

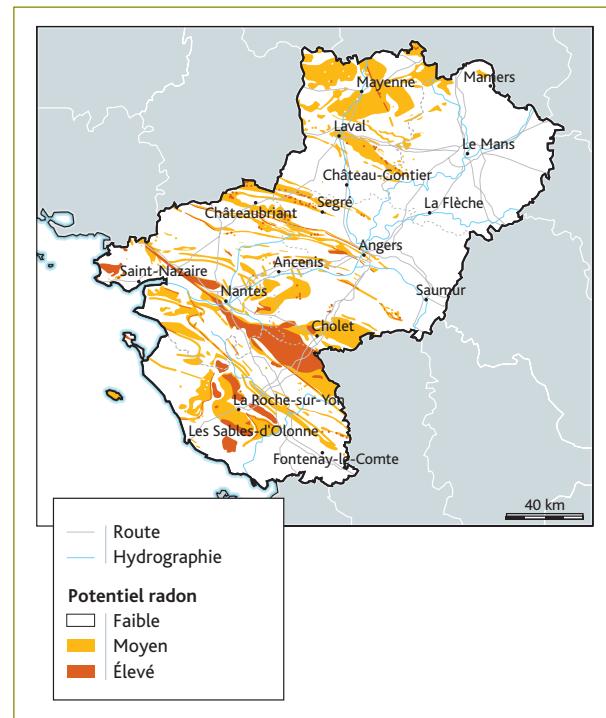


Figure 7 Carte finale du potentiel radon dans la région des Pays de la Loire.

concernées par des travaux miniers souterrains, terrils, sources thermominérales.

Les failles majeures affectent essentiellement les formations du socle dans la moitié sud de la région et sont principalement liées au cisaillement sud-armoricain. Les sites miniers comprenant des travaux souterrains et des ouvrages débouchant au jour ont pu être recensés. Il s'agit d'exploitations d'uranium, de charbon au sens large, de fer et d'autres minéraux polymétalliques.

Dans la région des Pays de la Loire, trois sources thermales ont été répertoriées à partir de la carte au 1/1 000 000e des eaux minérales et thermales de France.

Carte du « potentiel radon » des Pays de la Loire

La carte obtenue pour la région des Pays de la Loire est reportée dans la figure 7. Dans cette région, il est à noter que le potentiel radon des formations géologiques est fortement variable et très hétérogène d'un département à l'autre. Dans la réglementation en vigueur, les départements de cette région ne sont pas définis comme prioritaires. Les informations reportées sur la carte montrent que le potentiel radon est pourtant élevé sur une partie du territoire de ces départements, notamment ceux de la Loire-Atlantique, de la Vendée et du Maine-et-Loire.

Dans le département de la Mayenne, le potentiel radon est majoritairement faible à moyen. Le département de la Sarthe aurait un potentiel majoritairement faible.

Il est à noter que le travail de comparaison préalablement effectué [Ielsch, 2007] de la carte du potentiel radon obtenue par la même méthode avec les résultats disponibles de la mesure de l'activité volumique du radon dans l'habitat, sur une zone test située en Bourgogne, a été en grande majorité concluant. Il est envisagé de réaliser un travail semblable à l'échelle nationale, une fois la cartographie du potentiel radon terminée sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Conclusion

La cartographie de la capacité potentielle des formations géologiques à produire du radon, actuellement menée par l'IRSN à la demande de l'ASN, a pour objectif de fournir des cartes départementales et régionales couvrant la totalité du territoire métropolitain (96 départements), à la précision de la carte géologique de la France au 1/1 000 000e. L'ensemble des régions sera couvert à la fin de l'année 2009.

La démarche appliquée vise à estimer le potentiel des terrains à produire du radon dans le sol, celui-ci constituant la source principale du radon dans les bâtiments. Celle-ci est fondée sur la compilation et l'exploitation des données géologiques disponibles, provenant de cartes, de banques d'informations, de résultats de travaux de recherches, etc., et ne nécessite pas d'investigation complémentaire sur le terrain. La méthode mise en œuvre se veut globale et homogène à l'échelle du territoire métropolitain.

La mise en œuvre de cette méthode permet d'envisager un zonage plus précis que l'échelle du département, adapté pour déterminer les communes qui pourraient être le plus concernées par la problématique liée au radon et respectant de manière plus objective la variabilité de l'émission de radon par les terrains. La carte obtenue pourra conduire à un découpage des départements pour une meilleure définition des zones prioritaires.

La représentativité de la cartographie établie suivant cette méthode a évidemment ses limites. Certaines sont inhérentes à la précision de la source d'information utilisée (définition de la carte géologique utilisée). L'échelle du 1/1 000 000^e ne permet ni de discriminer les variations de faciès au sein d'une unité géologique, ni de tenir compte d'unités géologiques d'extension

restreinte (inférieure au kilomètre), telles que des filons, des enclaves, des formations superficielles, etc. Les cartes prédictives obtenues ne permettent donc que de disposer d'une tendance générale du « potentiel radon », sans qu'il puisse être exclu d'observer, par la mesure directe du radon dans l'environnement ou dans les bâtiments, des anomalies telles que des activités volumiques de radon élevées dans un environnement à faible potentiel et inversement.

De plus, les cartes obtenues ne fournissent des informations que sur la source principale du radon dans les bâtiments que constituent les terrains et ne doivent en aucun cas être utilisées pour estimer les concentrations de radon dans un bâtiment. Pour cela, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques propres du bâtiment, du mode de vie des occupants, des phénomènes de transfert du radon à l'interface sol/bâtiment et dans le bâtiment lui-même, etc. Seule une mesure directe de la concentration en radon dans l'atmosphère intérieure d'un bâtiment peut garantir un résultat fiable à cette échelle.

Il est à rappeler que la demande de l'ASN s'inscrit dans le cadre du plan d'actions interministériel pour la gestion du risque lié au radon et vise à répondre aux objectifs fixés par le Plan national santé environnement, ainsi qu'aux besoins exprimés par de nombreux acteurs locaux.

Références

- J.-D. Appleton (2007). *Radon: Sources, health risks, and hazard mapping*. Ambio 36(1) : 85-89.
- I. Barnet et I. Fojtíková (2006). *Radon index of bedrock and its influence on strategy of detection of radon risk dwellings in the Czech Republic*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2005, 128-132, CGS, Praha. ISBN 80-7075-667-5.
- P. Bossew, G. Dubois (2006). *From Babel to the Round Table of Camelot: on setting up a common language and objective for European radon risk mapping. Part II. Harmonization and standardization of radon data and maps*. In: *Proceedings of the 8th International Workshop on the geological aspect of radon risk mapping*, p. 88-97, I. Barnet, M. Neznaš, P. Pacherova (Eds). 26-30 September 2006, Prague, Czech Republic.
- Chantraine et al., (2003). Carte géologique de la France au 1/1 000 000^e, 6^e édition révisée, BRGM Orléans.
- S. Demongeot (1997). Recherche des différents paramètres caractérisant le potentiel d'exhalation en radon des sols. Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 253 p.
- G. Dubois (2005). *An overview of radon surveys in Europe*. EUR 21892 EN, EC. 168 p.
- G. Dubois, P. Bossew (2006). *A European Atlas of Natural Radiations including harmonized radon maps of the European Union. What do we have, what do we know, quo vadimus?* In: *Proceedings of the Terzo Convegno Nazionale. Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica*, 7-9 June 2006, Biella, Italy. ARPA Piemonte, ISBN-10: 88-7479-099-3.
- G. Dubois, P. Bossew (2006). *From Babel to the Round Table of Camelot: on setting up a common language and objective for European radon risk mapping. Part I. Radon risk maps, different maps for different purposes*. In: *Proceedings of the 8th International Workshop on the geological aspect of radon risk mapping*, p. 39-48, I. Barnet, M. Neznaš, P. Pacherova (Eds). 26-30 September 2006, Prague, Czech Republic.
- G. Ielsch (2003). Méthodologie de cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols : bilan des projets de recherche et validation complémentaire. Rapport IRSN DEI/SARG n° 03-02, octobre 2003.
- G. Ielsch (2005). La cartographie radon des territoires – Synthèse des approches utilisées en France et proposition d'éléments méthodologiques généraux. Rapport IRSN DEI/SARG/2005-06, mars 2005.
- G. Ielsch (2007). Définition des zones prioritaires pour la gestion du risque lié au radon dans les bâtiments – Application de la méthode dite indirecte aux trois départements de Bourgogne. Rapport IRSN DEI/SARG/2007-026, mai 2007.
- G. Ielsch (2008). *Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne*. The 9th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping (12-13th August 2008), into the 33rd International Geological Congress; Oslo, Norway (6-14th August 2008).
- G. Ielsch, M. Cuney (2004). Cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon 222 à la surface des sols : exemple d'application dans le massif armoricain. Environnement, Risque et Santé, Vol 3, n° 1, janvier-février 2004, p. 35-43.
- G. Ielsch, C. Ferry, G. Tymen, M.-C. Robé (2002). *Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon 222 exhalation rate*. Journal of Environmental Radioactivity, 63(1) : 15-33.
- G. Ielsch, D. Haristoy (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). Rapport IPSN-BRGM Réf. IPSN/DPRE/SERGD RT 01-05.
- G. Ielsch, D. Thiéblemont, V. Labed, P. Richon, G. Tymen, C. Ferry, M.-C. Robé, J.-C. Baubron, F. Béchenneec (2001). *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, 53(1) : 75-90.
- J. Kemski, R. Klingel, A. Siehl, M. Valdivia-Manchego (2008). *From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany*. Environ Geol, DOI 10.1007/s00254-008-1226-z.
- J.-C.-H. Miles, J.-D. Appleton (2005). *Mapping variation in radon potential both between and within geological units*. Radiol. Prot. 25 257-276.
- J.-J. Risler et al., (2004). Carte des eaux minérales et thermales de France au 1/1 000 000^e (BRGM).