

RADON

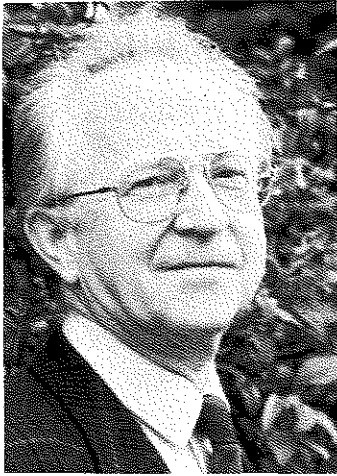


Le radon dans les habitations

Aspects géologiques du risque

Le radon dans les habitations

Aspects géologiques du risque



Depuis quelques années, un certain nombre de scientifiques, relayés par divers médias, ont attiré l'attention du public sur l'existence d'un danger potentiel dû à l'accumulation dans les maisons d'un gaz radioactif naturel, le radon.

Ce gaz est généré par les éléments radioactifs contenus dans les roches en quantité variable suivant la nature et la composition de celles-ci. Il peut se déplacer vers la surface du sol par simple diffusion ou par migration avec d'autres fluides sur des distances parfois importantes, en utilisant les nombreux réseaux de fissures ou fractures ainsi que les circulations d'eau souterraine.

De plus, ces différents processus sont influencés par divers phénomènes géologiques ou climatiques.

On comprend donc toute l'importance du facteur géologique dans l'étude de la pollution des habitations par le radon. Il ne suffit pas, en effet, de mesurer correctement la teneur en radon dans tel ou tel local d'un bâtiment et de proposer telle ou telle action corrective au niveau d'un bâtiment, ou d'un groupe de bâtiment, pour régler l'ensemble du problème.

Une étude préalable de la géologie locale et régionale apportera sans aucun doute des informations utiles pour comprendre ce qui se passe au niveau d'un bâtiment, mais permettra également d'avoir une vision plus étendue des choses et d'orienter d'éventuelles actions au niveau régional.

Des équipes de géologues étudient ces phénomènes depuis de nombreuses années essentiellement de façon générale ou dans l'optique de la prospection des matières minérales. Les études spécifiques des relations entre le radon et les habitations sont, quant à elles, beaucoup plus récentes.

Un certain nombre de résultats ont déjà été acquis, notamment en ce qui concerne notre pays. Mais, beaucoup de questions importantes se posent encore.

C'est pourquoi, en tant qu'habitant d'une région particulièrement concernée, la Province du Luxembourg, et comme Ministre de tutelle du Service Géologique de Belgique, j'ai décidé de mener un certain nombre d'actions dans ce domaine.

Estimant que toute politique bien menée doit débiter par une information correcte et compréhensible, j'ai demandé au Service Géologique de Belgique, et à l'équipe du Professeur Charlet de la Faculté Polytechnique de Mons, l'équipe de pointe dans le domaine de la géologie du radon en Belgique, de réaliser, à l'intention du public, cette plaquette d'information sur l'aspect géologique de la problématique du radon dans les habitations.

Dans ce fascicule, nous avons eu la volonté d'être accessibles à tous. Par contre, nous avons aussi pensé à ceux qui voudraient en savoir plus. Voilà pourquoi l'ouvrage se présente en deux parties.

Dans la première, l'ensemble du public apprendra tout ce qu'il faut savoir sur le radon dans un langage clair mais avec une rigueur scientifique de bon aloi. Si les concepts ont été simplifiés, par moment, ils n'ont jamais été trahis.

L'évocation d'un concept plus compliqué comme la définition d'un terme inhabituel seront accompagnées d'un petit symbole qui renvoie à une seconde partie. Dans cette seconde partie, "ceux qui veulent en savoir plus" trouveront des fiches reprenant des notions plus détaillées sur les éléments radioactifs, les familles radioactives, les unités internationales, des coupes géologiques et des données géochimiques qui montrent la répartition du radon, des chiffres sur des études générales et ponctuelles déjà effectuées.

Notre but est d'informer le plus objectivement possible dans l'état actuel des connaissances scientifiques. Nous ne voulons pas alarmer ou endormir : les faits sont les faits; ils doivent être interprétés à la lumière des connaissances acquises et les conclusions tirées du traitement scientifique de ces faits.

Nous espérons avoir rempli notre contrat.

Le Secrétaire d'Etat à l'Energie

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Elie Deworme', with a stylized flourish at the end.

Elie DEWORME

SOMMAIRE

PREAMBULE	7
Introduction : radon et radioactivité	11
La radioactivité : vie et mort des atomes.	11
L'uranium, le radium et le radon : une affaire de famille.	12
La radioactivité : le danger de ses rayonnements.	13
Où se trouvent les sources radioactives?	16
Pourquoi s'intéresser aujourd'hui au radon?	19
Faisons un peu d'histoire... ..	19
Quelles sont les teneurs en radon dangereuses?	20
Le radon, un gaz radioactif qui vient du sous-sol	23
Où se trouve l'uranium?	23
Comment se déplace le radon?	23
Comment mesurer le radon?	29
Le sous-sol de la Belgique, source potentielle de radon.	31
L'uranium et le radon au travers de nos grandes régions naturelles.	31
1. La plaine des Flandres et la Campine.	31
2. La moyenne Belgique.	31
3. Le Condroz et la Famenne.	32
4. L'Ardenne.	32
5. La Gaume.	34
Des variations locales.	34
Les études appliquées aux cas concrets.	36
La cartographie de la distribution de l'uranium.	36
Cartographie des zones habitées.	36
L'influence du bâtiment.	39
Y a-t-il des remèdes à apporter aux cas à risques?	41
Quelques conclusions	43

SOMMAIRE

DE LA SECONDE PARTIE "LES CARNETS"

☉ 1. LA RADIOACTIVITE.	47
Nature du phénomène.	47
Le temps de demi-vie.	48
☉ 2. LES EMISSIONS RADIOACTIVES.	49
☉ 3. LES FAMILLES RADIOACTIVES.	51
☉ 4. LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU RADON.	54
☉ 5. LES UNITES DE RADIOACTIVITE.	55
☉ 6. LA MESURE DES RADIOELEMENTS NATURELS.	56
☉ 7. LE DEPLACEMENT DU RADON.	57
Le taux d'émanation.	57
Le déplacement du radon sous terre.	57
Le déplacement du radon au niveau du sol.	58
☉ 8. L'URANIUM DANS LES ROCHES BELGES.	62
La localisation de l'uranium.	62
Concentration en uranium dans les roches belges.	63
☉ 9. LE RADON ET LA STRUCTURE GEOLOGIQUE DU SOUS-SOL.	66
Le Condroz.	66
La Famenne.	66
Le haut plateau ardennais.	66
☉ 10. EXEMPLE D'ETUDES DE LOCALITES.	69
La région de Monceau-en-Ardenne : un exemple de méthodologie.	69
Les écoles du Luxembourg.	72
La région de Visé.	73
QUELQUES ADRESSES UTILES	74
REALISATION	75

Première partie

INTRODUCTION: RADON ET RADIOACTIVITE.

LA RADIOACTIVITE: VIE ET MORT DES ATOMES.

Les objets de notre environnement familier ont un caractère permanent indubitable. Si, le premier janvier, je dépose une assiette sur la table et si on ne la déplace pas, le 31 décembre, l'assiette sera toujours sur la table, pareille à elle-même. Il en est de même dans la nature. La pierre qui agrémente le jardin est là depuis des années et y sera encore dans les années futures.

Approfondissons un peu plus ce concept. Plaçons dans un coffre-fort un marteau et un kilo d'uranium. Si aucune catastrophe ne s'est passée, ayant abouti à la destruction du coffre-fort, nous retrouverons le marteau pareil à lui-même des dizaines d'années plus tard. En effet, les atomes qui constituent les éléments du marteau (les atomes de fer pour la tête métallique, les atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène pour le manche de bois) sont quasiment indestructibles.

Les atomes des éléments non radioactifs sont stables au cours du temps.

Par contre, examinons le kilo d'uranium placé à côté du marteau. Nous constatons que, après ces quelques dizaines d'années passées dans le coffre-fort, il manque un petit peu d'uranium. Cherchons bien: rien n'est apparemment arrivé à notre uranium. Le bloc est encore intact. Il s'est donc passé quelque chose au niveau microscopique, au niveau des atomes d'uranium. Une partie d'entr'eux a disparu en se transformant en d'autres atomes d'éléments chimiques différents (Figure 1).

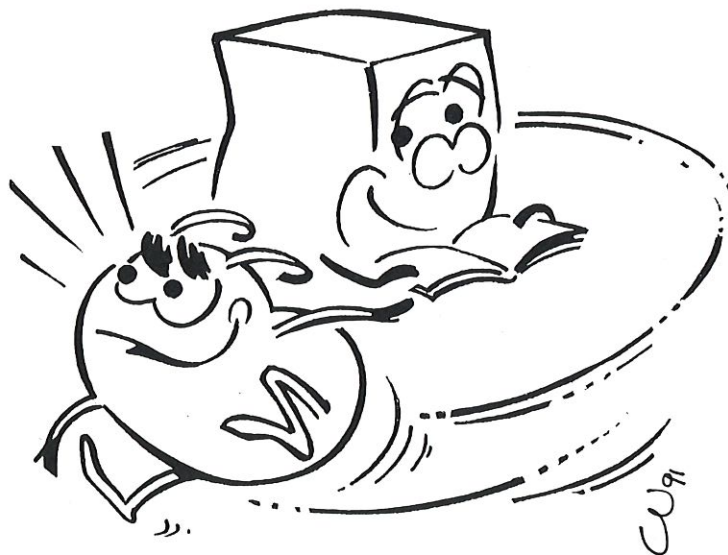


Figure 1 : La plupart des éléments naturels, tel que le fer, sont formés d'atomes stables. Quelques éléments, comme l'uranium, se désintègrent au cours du temps en donnant naissance à d'autres éléments : ils sont radioactifs.

Les atomes de certains éléments naturels tels que l'uranium, le thorium, le radium et notre radon se désintègrent au cours du temps en donnant naissance à d'autres atomes: c'est la radioactivité. Si, par un moyen surnaturel, nous ouvrons le coffre-fort dans 4,5 milliards d'années, nous ne retrouverions plus que 500 grammes d'uranium et approximativement 500 grammes de plomb. L'uranium s'est désintégré en donnant naissance à ce plomb par un chemin d'ailleurs compliqué sur lequel nous allons revenir.

La période nécessaire pour que la moitié des atomes d'un élément radioactif disparaissent à cause de leur propre radioactivité s'appelle **la demi-vie de l'élément considéré**. Tous les atomes radioactifs sont ainsi caractérisés par leur demi-vie. Ces temps de demi-vie sont très différents. Si l'uranium a un temps de demi-vie de 4,5 milliards d'années (plus exactement un isotope bien particulier de l'uranium: l'uranium-238, $\odot/1$), le radium a une demi-vie de 1.660 ans tandis que notre radon a une demi-vie de 3,8 jours.

L'URANIUM, LE RADIUM ET LE RADON: UNE AFFAIRE DE FAMILLE.

Un paquet d'atomes qui se transforme au cours du temps: voilà donc ce qu'est l'uranium, élément radioactif. Mais, allez-vous me rétorquer, pourquoi tout l'uranium du monde n'a-t-il pas déjà disparu?

On peut calculer que, pour disparaître, il faut approximativement une période égale à 10 fois le temps de demi-vie. Dans le cas de l'uranium, cela nous fait 45 milliards d'années. Le Soleil et la Terre et tous les corps du système solaire ont été formés il y a 4,5 milliards d'années. L'uranium s'est formé à cette époque dans cette super-fabrique d'éléments chimiques que sont les étoiles. C'est ainsi qu'on peut calculer facilement qu'en 1991, la moitié de l'uranium présent sur la Terre lors de sa formation a disparu.

"Mais le radon?", me rétorquez-vous. "Avec son temps de demi-vie de 3,8 jours, il a eu tout le temps de disparaître depuis la formation de la Terre! Quelque chose cloche dans votre raisonnement!"

Oui et non. Il est bien évident que le radon créé lors de la formation de la Terre a eu tout le temps de disparaître. Si les lois de la radioactivité sont correctes (et elles le sont!, vérifiées par des milliers d'expérience), **pour qu'il y ait encore du radon de nos jours dans l'air et dans le sol, il faut qu'il y ait été créé il y a quelques jours, quelques heures, quelques secondes...**

Nous avons vu dans l'exemple du coffre-fort que, après 4,5 milliards d'années, l'uranium a "fabriqué" du plomb. Mais il le fait d'une manière détournée. L'atome d'uranium qui se désintègre se transforme d'abord en thorium, un autre métal lui-aussi radioactif. Ce thorium (plus exactement l'isotope 234 de cet élément, $\odot/1$) va donc se désintégrer à son tour très vite car son temps de demi-vie est très court (24,1 jours) en donnant naissance à un troisième

métal appelé palladium, à son tour radioactif. Et ainsi de suite, suivant un mécanisme en cascade, l'uranium donne naissance à du plomb en passant par 13 autres éléments radioactifs: thorium, bismuth, astate, polonium et, notamment notre radon. Il est donc fabriqué continuellement par la désintégration du radium, son "papa" direct, lui-même un descendant de l'uranium-238 (Figure 2). **L'uranium est la tête d'une famille radioactive (©/3).**

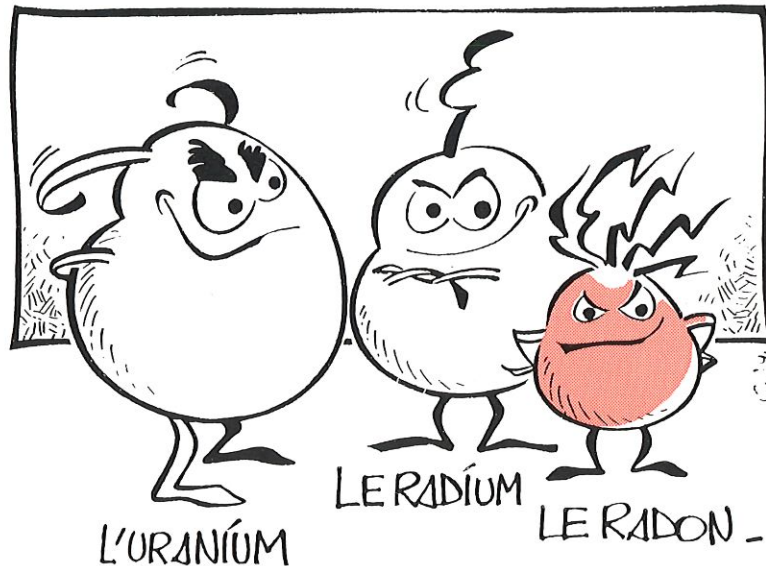


Figure 2 : Certains éléments radioactifs appartiennent à une famille radioactive. L'uranium par exemple est le "père" d'une famille d'éléments radioactifs qui se transforment les uns les autres. Le radium est l'un de ses descendants. Il crée, en se désintégrant, le radon.

Le radon, lui-même radioactif, donnera ainsi naissance à un élément-fils en se désintégrant, et ainsi de suite jusqu'à ce que nous obtenions du plomb, le plomb que nous avons retrouvé dans notre coffre-fort tout-à-l'heure. Comme les descendants du radon sont radioactifs, il nous faudra en tenir compte lorsque nous parlerons du danger de la radioactivité émise par tous ces éléments.

LA RADIOACTIVITE: LE DANGER DE SES RAYONNEMENTS.

L'atome de radium se désintègre pour donner naissance à un atome de radon. Cette transformation a libéré des particules et des rayonnements (©/2). **Particules et rayonnements radioactifs constituent le vrai danger pour l'homme dans la radioactivité.** Ils peuvent en effet provoquer de graves perturbations dans les cellules vivantes en y induisant des réactions chimiques indésirables.

"Mais, me direz-vous, la médecine soigne bien certains cancers avec des substances radioactives. Ce n'est donc pas toujours nocif?"



Figure 3 : Un atome de radium se désintègre en donnant naissance à un atome de radon et en libérant des particules et du rayonnement.

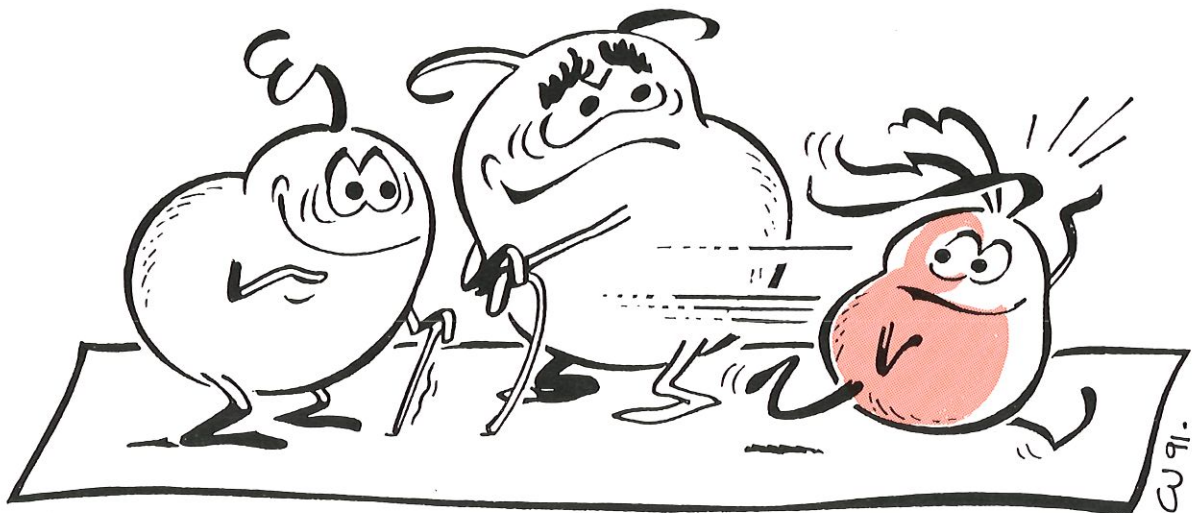


Figure 4: l'uranium émet peu de rayonnement et, vit longtemps, le radium émet plus de rayonnement et vit moins longtemps, le radon vit encore moins longtemps et émet encore plus de rayonnement.

Toujours! Soigner un cancer par irradiation revient à tuer les cellules cancéreuses avec le rayonnement. On se base sur le fait que les cellules cancéreuses seront plus rapidement détruites que les cellules saines. Mais il est bien évident que toutes les cellules sont atteintes par l'agression radioactive.

Il faut bien maintenant faire la part des choses. Puisque la radioactivité est le plus souvent nocive, il importe de localiser le danger : où se trouvent les éléments radioactifs dans la nature? Une remarque préliminaire est à faire. Si certains éléments émettent une radioactivité très forte, d'autres sont la source d'une radioactivité tellement faible qu'elle n'atteint même pas les cellules. En schématisant, on peut dire que l'intensité de cette radioactivité est inversement proportionnelle au temps de demi-vie : plus un élément radioactif se désintègre vite, plus il émet un rayonnement nucléaire intense. Par exemple, l'uranium sans ses descendants (l'uranium tel qu'on peut le préparer dans les laboratoires de chimie par exemple) a une radioactivité tout-à-fait négligeable quant à ses effets. Par contre, il n'en est pas de même pour le radium ou le radon dont les temps de demi-vie sont plus courts que celui de l'uranium. On ne peut donc pas "tout mettre dans le même panier".

La manière dont le corps est irradié a aussi une très grande importance pour estimer les effets de la radioactivité. Le rayonnement radioactif, chacun en a entendu parlé, est de trois types que l'on représente par les trois lettres grecques α , β , γ . Chacun de ces "rayonnements" a une nature particulière. Nous avons, à dessein, écrit le mot rayonnement entre guillemets parce qu'il ne s'agit pas toujours d'un rayonnement au sens strict tel que la lumière par exemple.

Les "rayons" α et β sont des particules. Les particules α sont beaucoup plus lourdes que les particules β . Elles vont moins loin dans l'air ou dans une substance quelconque que les particules β car, plus lourdes et plus volumineuses. Par contre, elles font plus de dégâts! Un camion qui percute votre maison fera plus de dégâts qu'une bicyclette!

Le rayonnement γ , enfin, est un rayonnement au même titre et de même nature que la lumière mais transporte beaucoup plus d'énergie. Les rayons ultra-violets qui vous font bronzer peuvent brûler la peau et entraîner des coups de soleil. Les rayons X que l'on utilise en médecine pour "voir" à l'intérieur de votre corps sont encore plus pénétrants. Notez néanmoins que, lorsque vous faites une radiographie, le temps d'exposition aux rayons X est tellement bref que vous ne risquez quasiment rien! Néanmoins, c'est pour cette raison que l'on déconseille de multiplier les examens radiographiques et qu'ils sont proscrits pour les femmes enceintes afin de pas nuire au fœtus. Les rayons γ se situent encore plus loin dans cet ensemble. Ils peuvent pénétrer plus profondément dans la matière (plus de 50 cm dans le béton) et, a fortiori, dans le corps humain.

Enfin, vous souvenez que le radon génère aussi des descendants radioactifs, qui ont une radioactivité intense tels que des isotopes de plomb, de bismuth, et d'autres éléments (©/2). Leur durée de vie est extrêmement courte: l'isotope 214 du bismuth, par exemple, a un temps de demi-vie de 20 minutes. Mais, s'ils se désintègrent vite, n'oublions pas qu'ils sont produits continuellement par leurs "ancêtres" dont le radon fait partie. Leur émissions de rayonnement constitue donc un danger.

OU SE TROUVENT LES SOURCES RADIOACTIVES?

Il reste à localiser l'endroit où se trouvent les substances radioactives susceptibles d'irradier la population. La première question à se poser est de savoir sous quelle forme se trouve le corps radioactif.

Dans la nature, les éléments radioactifs sont dispersés dans le sous-sol, c'est-à-dire dans le sol et dans toutes les roches à de faibles concentrations: quelques grammes par tonne. Pour le géologue, le sable est une roche au même titre que le calcaire, le grès ou le schiste. Dans ce cas, l'élément radioactif considéré se trouve à l'état solide et il ne peut vous irradier que par le biais des particules ou du rayonnement qu'il émet du sol. En effet, s'il est localisé à plusieurs mètres de profondeur dans la terre, sa radioactivité sera absorbée avant d'avoir pu traverser l'air jusqu'à votre corps et sera ainsi inoffensive. Si le corps radioactif est incorporé dans un matériau de construction de votre maison, il pourra vous atteindre car ses rayonnements et particules radioactives seront émises dans l'atmosphère à partir des murs.

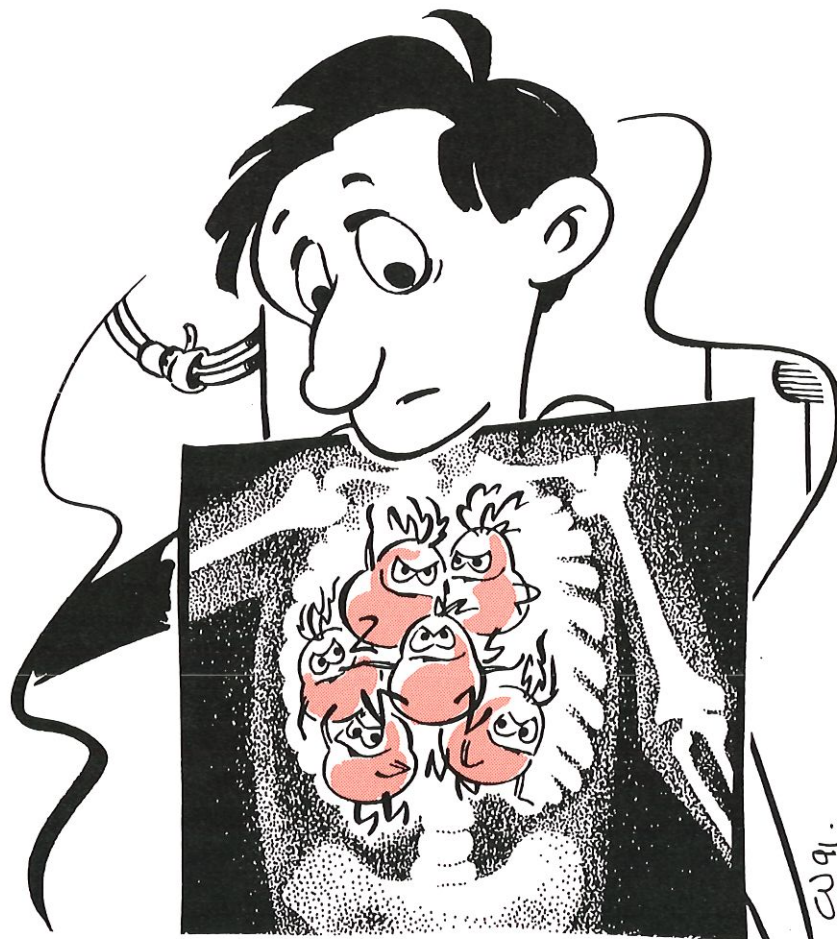


Figure 5 : Le radon passe dans les poumons et y laisse ses descendants radioactifs.

Mais il existe une autre possibilité: celle où le corps radioactif est sous forme de gaz. C'est le cas du radon car le gaz peut être ingéré dans les poumons lors de la respiration (principalement dans les bronches) et, aussi, passer dans le corps par l'intermédiaire du sang (©/4).

Un effet analogue aura lieu si le corps radioactif est dissous dans l'eau de boisson. Il sera également ingéré. Ce dernier cas s'est rencontré lors de l'accident de Tchernobyl. L'explosion du réacteur a projeté dans l'atmosphère notamment de l'iode radioactif sous forme de très fines particules. Ces particules sont retombées dans les prairies et ont été absorbées par les vaches avec l'herbe. L'iode radioactif a parcouru le corps de la vache et s'est retrouvé dans le lait, le rendant ainsi radioactif. Après ingestion par l'homme, cet iode radioactif s'est reconcentré avec son cousin non radioactif dans la glande thyroïde.

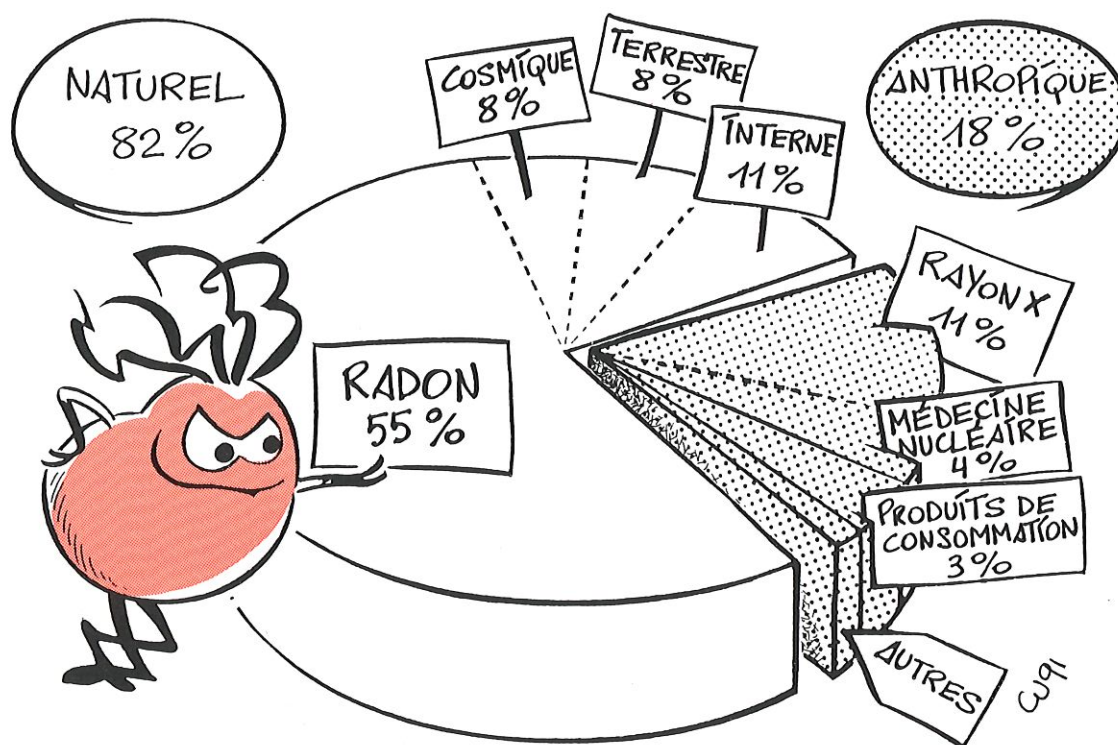


Figure 6 : Pourcentage des différentes sources de radioactivité qui contribuent à la dose radioactive moyenne reçue par le citoyen des Etats-Unis (d'après le rapport "National Council in Radiation Protection and measurements, 1989). Retenons que le radon contribue à plus de 50% au total des radiations reçues par l'homme de la rue.

Suivons notre radon après qu'il ait été respiré. Il arrive dans les poumons, où il peut passer dans le sang. Il a aussi la possibilité de se désintégrer en fabriquant ses descendants qui, rappelons-le, ont des temps de demi-vie très courts mais sont fortement radioactifs. De plus, ces descendants se fixent dans l'air sur les aérosols, petites particules solides microscopiques,

comme par exemple dans la fumée de tabac. Ces aérosols devenus radioactifs sont ingérés par la respiration comme les gaz. **Comme on le voit, les éléments radioactifs qui peuvent être ingérés par l'homme sous forme liquide (ici l'iode dissous dans le lait) ou gazeux (le radon par la respiration) sont dangereux.**

Il faut maintenant se poser une question dont la réponse demande des chiffres : Quelles sont les différentes formes de rayonnements ou particules issues de la radioactivité qui nous atteignent tout au long de notre vie?

On peut distinguer la radioactivité naturelle de la radioactivité artificielle. Nous n'avons pas encore parlé de cette dernière qui, pourtant, a envahi la vie de chacun. Songez à l'énergie nucléaire qui crée des déchets hautement radioactifs. Il y a aussi les éléments radioactifs dont on se sert en médecine pour établir différents diagnostics et effectuer différentes thérapies (utilisation d'éléments radioactifs dans les scintigraphies, traitement de certains cancers, etc...). Pensons aussi aux rayons X qui, s'ils ne constituent pas *sensu stricto* des rayonnements issus de la radioactivité, peuvent occasionner les mêmes dommages.

La radioactivité naturelle, nous en avons déjà abondamment parlé. Les roches, les sols contiennent des éléments radioactifs dont les plus abondants sont l'uranium et les éléments de sa famille (radium, radon, etc...), le thorium qui est aussi le père d'une autre famille radioactive et le potassium qui possède une variété nucléaire radioactive (un isotope, ^{40}K). Il faut aussi citer une radioactivité qui nous "tombe" du ciel: les rayons cosmiques. Ce rayonnement extra-terrestre est d'autant plus intense qu'on se trouve en altitude plus élevée.

Les chercheurs ont mesuré et calculé les pourcentages de ces différentes sources de rayonnements et particules radioactives. Les résultats sont synthétisés dans la figure 6. On y découvre avec quelque surprise que le radon prend, et de loin, la plus grande part. On constate aussi que le rayonnement d'origine naturelle est le plus important. Enfin, dans le domaine de la radioactivité fabriquée par l'homme, ce sont les rayons X qui dominent les autres sources.

Résumons-nous après cette introduction peut-être un peu aride.

- 1. La radioactivité est la propriété qu'ont certains éléments (uranium, radium, radon, etc...) de se transformer en se désintégrant et en émettant particules et rayonnements: ils créent un autre élément qui peut à son tour être radioactif et émettre des particules et du rayonnement.**
- 2. Le radon est le fils du radium, lui-même un descendant de l'uranium. Par conséquent, là où on trouve de l'uranium, on trouve du radon.**
- 3. Le radon est un gaz. Il se déplace vite et facilement. Il est donc susceptible de porter sa radioactivité à l'intérieur du corps par la respiration.**

POURQUOI S'INTERESSER AUJOURD'HUI AU RADON?

FAISONS UN PEU D'HISTOIRE...

D'après ce que nous venons de voir, l'influence néfaste de la radioactivité et plus particulièrement du radon n'est pas nouvelle: de tout temps, ce radon a existé dans l'environnement. Ce problème, qui fait intervenir les concepts des rapports entre l'homme, son milieu et la connaissance qu'il en a, demande quelques mots d'explication.

Il se peut que, dans le temps, il y ait eu maintes morts dues à la radioactivité du radon, sans que l'on en prenne conscience. La science nous donne à présent les moyens de connaître le radon et ses propriétés, utilisons donc ces outils.

Bien avant de connaître la radioactivité et ses effets, des esprits éclairés avaient détecté les effets néfastes dans des environnements donnés. En 1556, un scientifique d'Europe centrale, AGRICOLA, écrivait le premier traité de prospection, d'exploitation minière et de métallurgie. Il avait remarqué que des maladies pulmonaires fatales frappaient les travailleurs des mines de pechblende à Joachimstal (actuellement Jockymov en Tchécoslovaquie). Il nous le dit dans son ouvrage. La pechblende est un des principaux minerais d'uranium: il y a du radon là-dessous! mais AGRICOLA ne pouvait pas encore le savoir.

Nous avons vu ci-dessus que le radon est le fils du radium. Ce radium fut découvert par Pierre et Marie CURIE en 1898, le radon deux ans plus tard par F.E. DORN. La radioactivité, quant à elle, avait été découverte auparavant par BECQUEREL qui avait constaté que de la pechblende pouvait voiler une plaque photographique cachée dans son étui protecteur: "quelque chose", rayonnement ou particules, émis par cette pechblende, traversait l'étui protecteur et voilait la plaque photographique. Mais quoi, dans la pechblende? C'est en traitant des tonnes de pechblende, provenant d'ailleurs, étrange coïncidence, de la même mine que celle dont parlait AGRICOLA, que les époux CURIE découvrirent et isolèrent le radium. Nous savons maintenant que cela est normal puisque le radium est un descendant de l'uranium et que l'on va donc le trouver dans le minerai d'uranium.

A partir de là, les premières études constatant les effets nocifs de la radioactivité sur la santé furent faites dans les mines d'uranium. En effet, on imagine bien que dans les galeries souterraines, en présence de très grandes quantités d'uranium (une mine exploite un gisement qui est, en quelque sorte, un "concentré naturel d'uranium"), de très importantes quantités de radon se dégagent de la roche, et cela d'autant plus facilement que cette roche est brisée, concassée et broyée pour en extraire l'uranium. Ce radon s'accumule dans l'air confiné des galeries. Ce n'est qu'à partir du moment où l'exploitation de l'uranium en vue d'alimenter les centrales nucléaires en combustible s'est développée en flèche après la seconde guerre mondiale que le problème s'est posé de façon aiguë: il commençait à y avoir vraiment beaucoup de monde dans des souterrains remplis de radon! C'est donc le développement de

l'industrie nucléaire qui pose le problème du radon; les méthodes de détection et de contrôle datent ainsi d'à peine 50 ans.

Mais nous sommes là dans un milieu que l'homme de la rue ne fréquente pas tous les jours! Et pourtant...

Il y a quelques années, en Pennsylvanie, Stanley WATRAS se dirige vers la centrale nucléaire où il travaille. Il franchit le portail et passe sous le portique abritant les détecteurs de radioactivité qui contrôlent si aucune substance radioactive ne quitte la centrale. Une sonnerie stridente le fait sursauter: alerte radioactive! Interloqué, il regarde autour de lui, mais aucun camion ou véhicule n'a franchi le portique en même temps que lui. Une sueur froide lui coule dans le dos: est-il contaminé? Mais non, ce n'est pas possible: il ne quitte pas la centrale: il y va!! Il vient de sa maison, pas d'un environnement radioactif.. Et pourtant si! C'est bien dans son habitation qu'il avait été contaminé: la concentration en radon de sa maison était plusieurs centaines de fois plus élevée que les concentrations tolérées dans les mines d'uranium et Stanley transportait avec lui, collés à ses vêtements, à ses chaussures, les descendants radioactifs du radon. Et il paraît que pareille mésaventure se serait passé dans un centre belge... Ce fut, aux Etats-Unis, le point de départ d'une campagne de recherche et d'information auprès du public.

Le radon peut donc se concentrer dans les maisons jusqu'à présenter des teneurs importantes.

QUELLES SONT LES TENEURS EN RADON DONT IL CONVIENT DE SE MEFIER?

Ainsi donc, bien loin des mines d'uranium, le radon peut se concentrer dans certaines maisons jusqu'à y atteindre des teneurs importantes. Le radon est radioactif, la radioactivité peut présenter des dangers, on trouve le radon dans les lieux d'habitation ou de travail, il y a donc lieu de prendre garde. Comment cerner de façon quantitative ce danger potentiel ? Lorsque vous marchez au bord d'une falaise à pic, il n'y a pas de danger si vous tenez à un mètre du bord, il y a un très grand danger si vous voulez poser le pied au delà du rebord de la falaise! Dans ce cas très simple, le danger est facile à définir de façon mesurable.

Dans le cas du radon, la situation est un peu plus compliquée. Tout d'abord, il faudrait savoir exactement à partir de quelle dose de radioactivité on peut contracter par exemple un cancer. La nature ne donne pas de réponse aussi "carrée", aussi "sûre". En effet, la radioactivité provoque des dommages dans notre corps mais, sauf si l'on est soumis à des doses très grandes (par exemple, une irradiation après une attaque nucléaire), on ne peut jamais être sûr que la dose reçue est suffisante pour provoquer des dommages irrémédiables. Il y a une certaine "malchance" d'être atteint, mais cela n'est pas une certitude à 100%.

Prenons un exemple de comparaison. Vous sortez de chez vous et vous traversez la rue sans regarder, les yeux fermés. Vous ne serez pas nécessairement happé par une voiture la première fois, ni même la deuxième, ou la troisième. Vous avez une certaine probabilité d'être

tué, ou blessé, mais, à chaque traversée de la rue les yeux fermés, ce n'est pas une certitude. Cette malchance d'être atteint sera d'autant plus grande que vous traversez souvent la rue, que le trafic est intense, etc... Le risque que vous courez doit être quantifié mais ce ne sera jamais une certitude. Pour le danger présenté par le radon, il en est ainsi. Il en va de même pour le danger présenté par le tabac: il y a de vieux fumeurs qui n'ont jamais eu de cancer mais, **statistiquement**, vous aurez plus facilement un cancer si vous fumez...

Dans une même ligne de pensée, on peut très bien imaginer que de faibles dommages occasionnés par une très faible irradiation seront "réparés" par l'organisme. Par exemple, une modification induite dans un des chromosomes d'une de nos cellules n'aura aucune chance de se perpétuer. A sa mort, la cellule emportera avec elle cette modification induite par la radioactivité.

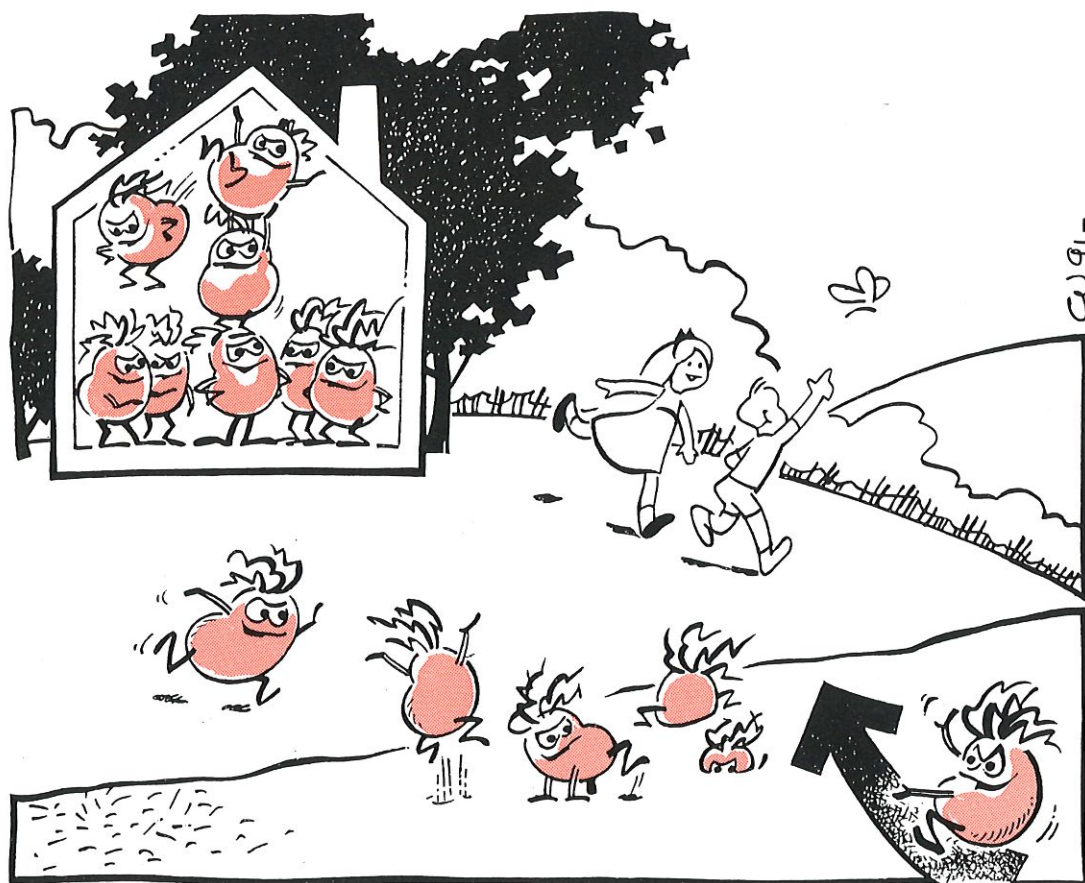


Figure 7 : A l'air libre, le radon s'échappe librement dans l'atmosphère et s'y dilue au point de s'y trouver en concentration inoffensive. Par contre, il peut s'accumuler dans les lieux confinés, comme une maison bien isolée; c'est là qu'il constitue un danger pour la santé.

Par contre, à partir d'un certain seuil, les dégâts infligés à notre corps par les rayonnements produits par la radioactivité s'additionnent. Une personne exposée pendant un temps très long à des doses moyennes de ces rayonnements pourra avoir subi autant de dommages qu'une

autre personne ayant reçu pendant un temps beaucoup plus court une forte dose de rayonnement. C'est pourquoi il faut raisonner en **dose annuelle** reçue par l'homme. Les travailleurs exposés dans leur profession à une irradiation le savent bien. Ils sont munis de **dosimètres** sensibles à la radioactivité qui enregistrent une **dose cumulée**, c'est-à-dire qu'ils **additionnent** la totalité de dose de rayonnement reçue pendant un temps donné.

Pour pouvoir légiférer, ou simplement pour donner aux spécialistes et à la population des critères sur lesquels on peut se baser, il faut donc définir des seuils de concentration de radon dans les maisons. Ces seuils sont calculés à partir de considérations diverses: fréquence des cancers chez les travailleurs des mines d'uranium ou dans une population qui a été exposée à une explosion nucléaire par exemple. A partir de ces études, la Commission des Communautés Européennes vient d'émettre des recommandations sur les concentrations à partir desquelles des mesures de protection doivent être prises (Journal officiel des Communautés européennes, 27-3-1990, n°180/26).

Dans les bâtiments existants, la CEE recommande que la concentration moyenne annuelle en radon ne doit pas dépasser 400 becquerels par mètre-cube (Bq/m³). Pour les futures constructions, la limite a été placée à 200 Bq/m³.

Qu'est-ce que ce "becquerel"? Et bien, si vous voulez mesurer une planche, vous avez besoin d'un mètre, d'une unité de mesure adaptée à ce que vous voulez mesurer. **Le becquerel est l'unité de mesure de la quantité de radioactivité que renferme un volume d'air pris comme référence (un m³ par exemple) (©/5).** On peut dire qu'un local totalement inoffensif du point de vue de la radioactivité compte quelques dizaines de Bq/m³ et on estime que l'on doit commencer à gérer ce problème vers quelques centaines de Bq/m³.

*L'histoire de Stanley Watras nous a confronté avec la possibilité de concentrations en radon dans les maisons, concentrations qui peuvent être importantes. Nous allons bientôt voir d'où vient ce radon. Mais, sans vouloir brûler les étapes, il est bon de souligner ici que ce problème posé par la relation **radon-habitation** est plus grand de nos jours qu'il a pu l'être dans le passé. En effet, pour épargner l'énergie, et du même coup diminuer notre facture de chauffage, nous avons bien isolé nos maisons. Ce faisant, le renouvellement constant de l'air devient plus rare. Quand le radon pénètre dans les pièces (et nous avons vu qu'il est d'une mobilité très grande!), il y reste confiné avec l'air. Comme vous le voyez, la modification des habitudes de vie peut parfois conduire à des changements dans les risques encourus.*

Insistons sur ces notions très importantes. Le risque présenté par le radon, comme tout risque est affaire de statistique. Il existe une certaine probabilité d'être atteint par un cancer. Le problème qui se pose donc aux techniciens et au législateur est d'estimer au mieux une concentration limite en deçà de laquelle le risque peut être considéré comme nul. Cela ne veut pas dire que des habitations ayant des concentrations en radon un peu supérieures à cette dose "empoisonneront" leurs habitants! Mais ce seuil est un besoin indispensable pour pouvoir agir. Ces seuils sont exprimées en Becquerels par mètres-cube (Bq/m³), le becquerel étant une unité internationale de mesure de la radioactivité. Dans l'Europe des communautés, la norme est fixée à 400 Bq/m³ dans les bâtiments existants et 200 Bq/m³ dans les futures constructions.

LE RADON, UN GAZ RADIOACTIF QUI VIENT DU SOUS-SOL.

OU SE TROUVE L'URANIUM?

Le radon, le radium et l'uranium, c'est une histoire de famille; nous l'avons vu plus haut. En se désintégrant, l'uranium donne naissance à un élément-fils lui-même radioactif, qui se désintègre à son tour en générant un "petit-fils" de l'uranium et ainsi de suite. Le radium et son fils direct, le radon, font partie de cette famille. Comme le radon disparaît pratiquement en une quarantaine de jours à cause de son temps de demi-vie de 3,8 jours, sa présence continue ne peut provenir que de sa création par désintégration du radium lui-même couplé à l'uranium.

Le problème qui se présente maintenant à nous est la localisation des sources de radon. Or, nous venons de voir qu'il ne peut exister qu'en liaison avec l'uranium. Recherchons d'abord où se trouve cet uranium.

L'uranium est un élément chimiquement très mobile. Il est capable de se lier avec beaucoup d'autres éléments et de se déplacer avec eux. Par conséquent, **on rencontre l'uranium dans presque toutes les roches et dans les sols**. Oh, les quantités restent faibles: la plupart du temps, quelques grammes par tonne de roches (ce que les géochimistes expriment par le sigle **ppm, parties par millions**. Il y a bien un million de grammes dans une tonne; donc, 3 ppm par exemple signifie 3 grammes par tonne). Un schiste provenant du Condroz renferme entre 2 et 3 ppm d'uranium. Un grès particulier d'Ardenne que les géologues appelle "Grès d'Anor" n'en contient que 1,8 ppm. Les calcaires sont aussi souvent pauvres en uranium, entre 1 et 2 ppm. Il faut néanmoins prendre garde: certains calcaires peuvent renfermer jusqu'à 20 ppm d'uranium. Le tableau (1) fournit quelques concentrations moyennes d'uranium pour des roches couramment rencontrées dans notre pays.

Première étape de notre chasse pour localiser l'uranium dans tel ou tel endroit, la carte géologique nous renseigne sur le type de roches. S'il manque des informations détaillées, une investigation plus précise est effectuée dans la région concernée. Les concentrations moyennes en uranium liées à ces roches fournissent un premier élément important. Une étape suivante est d'analyser l'uranium dans les échantillons de roches. Cela peut se faire sur le terrain ou en laboratoire (©/6). On sait ainsi que les schistes de l'Ardenne sont souvent plus riches en uranium que les grès ou les calcaires. Mais, pour estimer les quantités de radon qui peuvent pénétrer dans les maisons, cela ne suffit pas. Nous avons la source du radon, mais nous ne possédons pas encore d'indication sur sa manière de se déplacer.

COMMENT SE DEPLACE LE RADON?

Nous avons vu que le radon est un gaz, et qui plus est, un gaz qui se dissout très bien dans l'eau. Il est très mobile; il peut se déplacer facilement dans différents milieux (©/7). Allons rejoindre en pensée nos atomes d'uranium présents dans une roche. Ils ont fabriqué

au cours du temps des atomes de radium qui se trouvent au même endroit dans la roche que les atomes d'uranium: aucun des éléments situés entre l'uranium, tête de la famille, et le radium ne sont des gaz. Ils n'ont donc pas tendance à beaucoup se déplacer au sein des roches.

Echant.	U(ppm)	Th(ppm)	K ₂ O(%)	Nature de la roche
RA8	3,4	16,4	4,24	Schiste revinien
RA32	2,3	10,9	3,49	Schiste famennien
A7	2,6	11,8	2,87	Argile yprésienne
RA9	42,4	27,4	3,59	Schiste revinien
RA36	2,0	6,5	0,92	Grès couvinien
1DV	1,7	2,5	0,13	Grès d'Anor siegénien
SL2	1,1	1,5	0,83	Sable landénien de Blaton
AB6	25,0	10,3	2,11	Grès schisteux siegénien
YV1/2	86,2	1,5	0	Schiste gréseux brun carbonifère
AN127	1,1	0,4	0,06	Calcaire carbonifère
AN146	8,5	0	0	Calcaire carbonifère
CIP001	2,6	0	0	Tuffeau de Ciplly crétacé
CR001	0,6	0,9	0,01	Craie d'Obourg crétacée
CIP003	40,7	0	0	Phosphate de Ciplly crétacé

Tableau 1. Concentrations moyennes en uranium de quelques roches courantes en Belgique.

Les grandes catégories de roches belges sont reprises. Les grès sont très peu radioactifs (1DV) de même que les sables (SL2). Les schistes (RA8, RA32) et les argiles (A7) sont un peu plus radioactives, mais surtout par leur contenu en thorium dont le radon (appelé ici "thoron") est beaucoup moins dangereux car son temps de demi-vie est beaucoup plus court que celui du radon-222 issu de l'uranium. Les carbonates, qu'ils soient sous forme de calcaire (AN127) ou de craies (CIP001, CR001) sont très pauvres en radioéléments. Nous avons présenté quelques échantillons présentant des anomalies en uranium : un schiste revinien du massif de Stavelot, un grès schisteux siegénien provenant d'une anomalie uranifère à Daverdisse, un calcaire et un schiste gréseux carbonifères du passage entre le Dinantien et le Namurien près d'Anhée et Bioul et, enfin, un phosphate de Ciplly.

Mais voilà nos atomes de radon qui apparaissent, résultat de la désintégration des atomes de radium. Très mobile puisqu'il est gazeux, le radon profite de la moindre fissure pour se déplacer au sein des roches. S'il se déplace lentement ou s'il ne peut le faire parce que la roche est trop compacte, il se désintègre sur place en créant ses descendants. Dans ce cas, il ne présente aucun danger: toute la radioactivité est produite et reste absorbée sous terre. Par

contre, si le radon se trouve dans une roche fracturée ou poreuse, il commence à se déplacer. S'il se trouve pris dans de petits courants d'air comme il en existe sous terre, il s'incorpore à ces courants d'air et peut parcourir des distances importantes, se retrouver notamment à la surface du sol.

*On peut faire un parallèle avec une foule qui se déplace dans une ville. Imaginons beaucoup de monde sur le trottoir en face d'un cinéma: ce sont nos atomes de radon. Prendre son ticket et passer par une porte canalise cette foule et les personnes ne rentrent qu'une par une dans le cinéma. Le nombre de personnes par minute qui rentre dans le cinéma est ainsi fonction de la vitesse à laquelle les tickets sont donnés. En ce qui concerne le radon, le nombre d'atomes qui se retrouve à la surface du sol est conditionné par les vides qui existent dans le sol, vides empruntés par le radon. La propriété du sol ou de la roche de laisser passer un fluide au travers de ses vides est appelée **perméabilité**. On parle ainsi d'un terrain aquifère perméable: il donnera lieu à des sources avec un bon débit parce que l'eau de pluie s'infiltrera facilement et se déplacera avec aisance dans ces roches, tandis qu'un terrain à faible perméabilité ne laissera pas entrer l'eau de pluie. Il en est de même pour le déplacement souterrain du radon.*

Nous voyons maintenant se dessiner le destin du radon dans le sous-sol à partir de sa source: l'uranium. Des roches, comme les argiles, qui contiennent de l'uranium en quantités appréciables sont des sources potentielles de radon. Mais, comme elles sont très imperméables, ce radon ne peut se dégager de l'argile et y reste sans dégagement important à la surface. Par contre, dans une roche très fracturée, très perméable, comme les calcaires (songez aux grottes qui minent les massifs calcaires), même s'il n'y a pas beaucoup d'uranium (un calcaire contient 5 à 10 fois moins d'uranium qu'une argile), le radon qui en est issu se déplace très facilement dans les fissures et fractures et arrive ainsi plus facilement en surface.

Nous pouvons vérifier la réalité de ce raisonnement dans la vallée de la Semois. A Chiny, sur la Vierre, il existe des couches rocheuses riches en uranium. Ce sont des schistes, des quartzophyllades, très imperméables. Nous n'avons effectivement trouvé que peu de radon dans les sols et dans les sources. Par contre, à quelques dizaines de kilomètres de là, le sous-sol de la région de Monceau-en-Ardenne contient des fractures très riches en uranium. Ces fractures se localisent surtout dans des grès. L'analyse du radon dans les sols et les sources nous a donné là de fortes concentrations en radon, parce qu'il peut facilement se déplacer au travers du réseau de fractures qui affectent les grès.

Nous avons dit plus haut que le radon se dissout facilement dans l'eau et nous venons de voir que nous avons découvert du radon dans les sources de la région de Monceau. L'eau serait-elle aussi une source possible de radon? Et bien oui. L'uranium qui se trouve dans les roches situées au sein d'une nappe d'eau souterraine peut libérer son radon dans cette eau souterraine. Là, le radon se déplace avec cette eau et peut ainsi se concentrer dans certaines sources ou certains puits (☺/8).

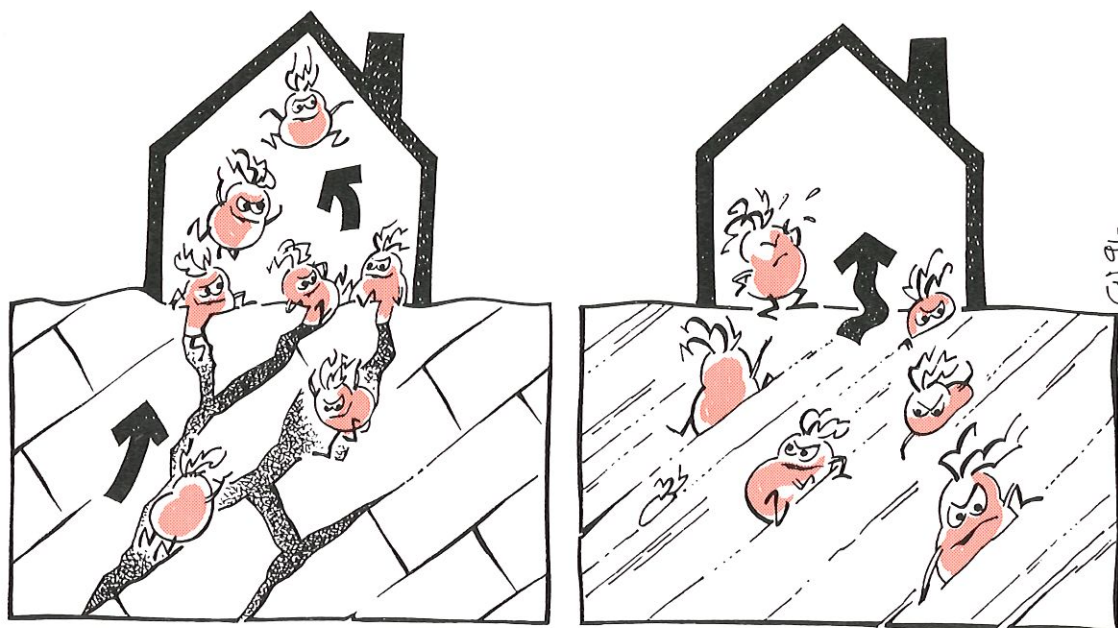


Figure 8 : La première habitation se trouve sur un sous-sol calcaire très fracturé: le radon s'y déplace facilement et envahit le bâtiment. La seconde maison se situe sur un sous-sol argileux donc imperméable. Le radon qui s'y génère à partir de quantités appréciables d'uranium ne peut s'y dégager et la maison est peu contaminée.

Si l'eau est utilisée pour la consommation domestique, deux cas se présentent. Du temps s'écoule entre le captage de l'eau et la distribution. Le radon, issu de la nappe d'eau, a le temps de se désintégrer et de disparaître. De plus, si cette eau est traitée comme c'est le cas dans toutes les grandes sociétés de distribution, le mouvement de l'eau lors de chutes dans des réservoirs par exemple provoque le dégazage du radon: il s'échappe de l'eau et se perd dans l'atmosphère. Par contre, dans le cas de distributions locales, ou d'alimentation directement à partir d'un puits ou d'un petit captage, le danger potentiel d'une concentration anormale de radon dans l'eau existe: il faut alors s'en préoccuper.

Il nous reste encore à souligner une influence importante sur le déplacement du radon. Dans la roche, ce radon peut être transporté par de petits courants d'air qui circulent dans les interstices du sol. On se rend tout de suite compte que ce qui provoque ces courants d'air, ce sont des différences de température, par exemple entre la surface du sol et une zone profonde, ou encore des variations de la pression atmosphérique. Cela signifie que **les flux de radon à la surface du sol, et, donc, les possibilités qu'il a de se concentrer dans les habitations, sont sous la dépendance du climat.**

Prenons un exemple. Une dépression atmosphérique se déplace au dessus de la Belgique. Cette baisse de la pression atmosphérique provoque un appel d'air contenu dans le sous-sol, lequel se trouve juste au passage de la dépression, à une pression légèrement supérieure.

Ainsi, une quantité supplémentaire de radon par rapport à la moyenne arrive en surface. Un autre exemple significatif est l'effet de plusieurs jours de fortes gelées. Les quelques centimètres de sol gelé constituent un "chapeau" tout-à-fait imperméable, notamment au radon. Ce dernier n'atteint plus la surface mais s'accumule temporairement sous le sol. Lors du dégel, une quantité de radon à nouveau supérieure à la normale se dégage très vite, provoquant une augmentation sensible de la concentration.

Les influences atmosphériques sur les déplacements du radon ont une conséquence importante qui est la fluctuation dans le temps de ses concentrations. Pratiquement, cela signifie que, suivant telle ou telle période de l'année, telle ou telle saison, telle ou telle période de la journée, il y a plus ou moins de radon. Une autre conséquence du temps qu'il fait, indirecte celle-là, est que, suivant la saison, on aère plus ou moins la maison. En hiver, les portes et fenêtres restent fermées, l'air est ainsi beaucoup plus confiné et le radon s'accumule plus. Cela met en exergue l'importance du mode de vie dans la problématique du radon.

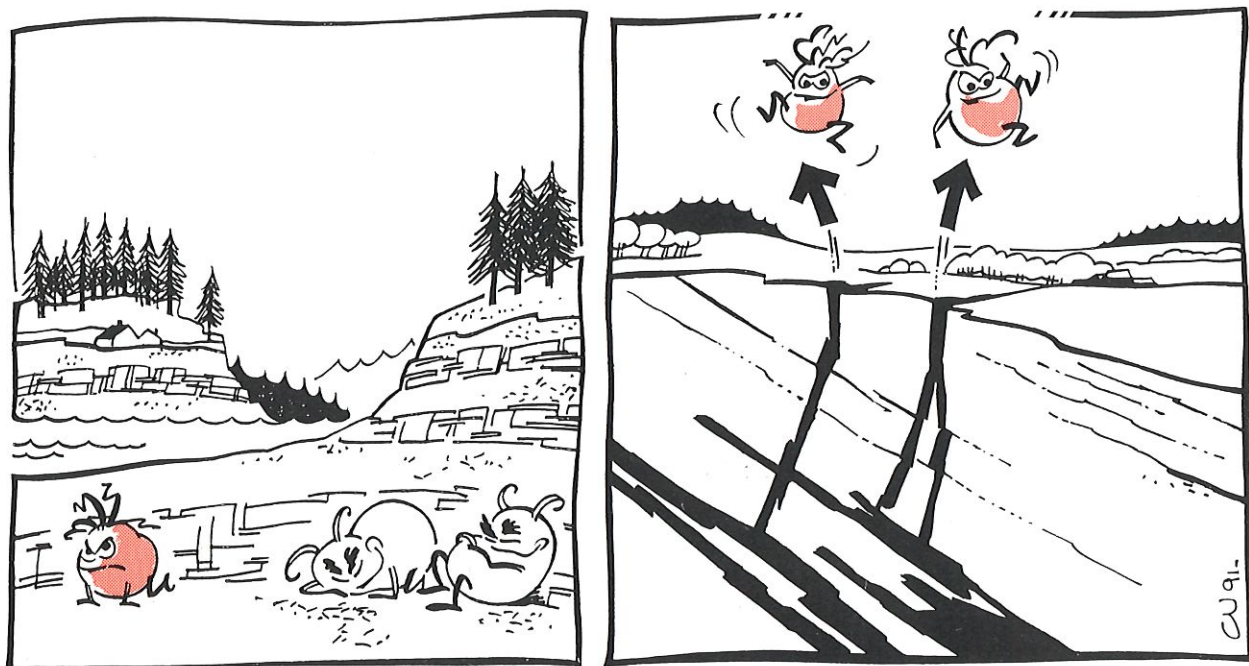


Figure 9: Les couches rocheuses qui, sur la figure de gauche, contiennent beaucoup d'uranium sont entourées de roches imperméables dans lesquelles le radon ne peut se déplacer: il reste prisonnier sous terre où il se désintègre. Par contre, à droite, l'uranium est contenu dans des roches fracturées. Le radon qui en est issu peut monter facilement en surface le long de ces fractures. Alors que le risque potentiel de concentration en radon dans des habitations qui se trouvent sur les roches dans la figure de gauche est faible malgré les quantités d'uranium présentes dans le sous-sol, ce risque est beaucoup plus grand dans le dispositif de droite.

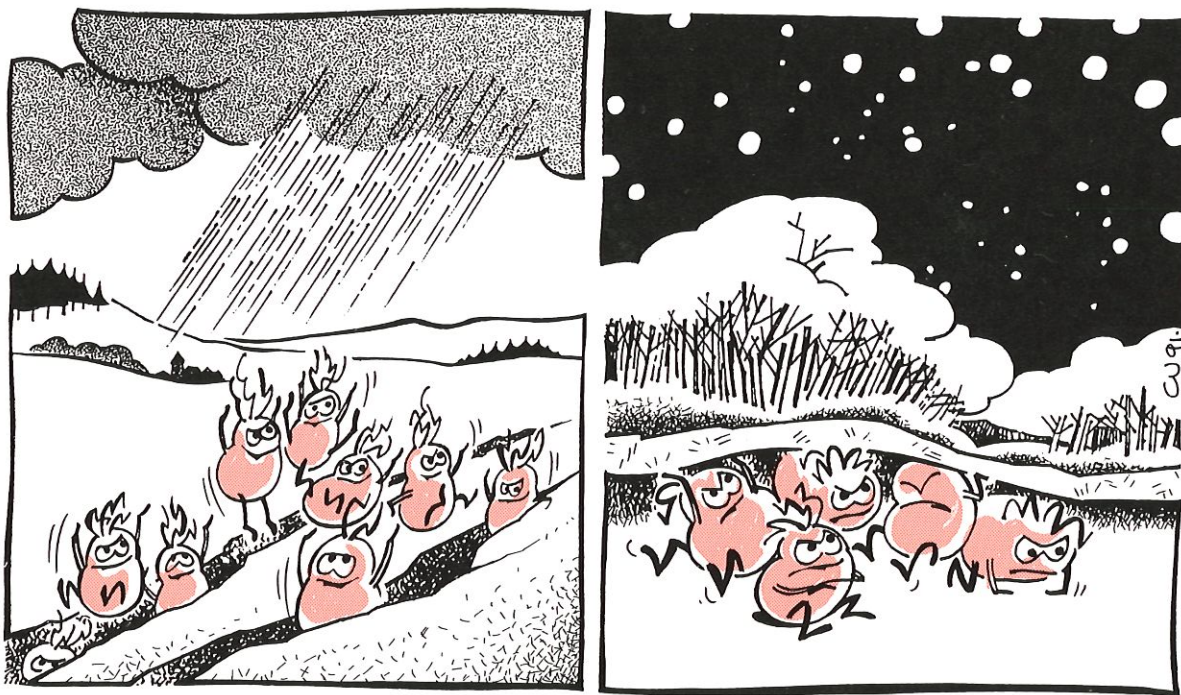


Figure 10: Les variations climatiques jouent un rôle fondamental dans les mouvements du radon. A gauche, le radon est "aspiré" des fissures du sol par le passage d'une dépression atmosphérique, tandis qu'à droite, il est au contraire bloqué parce que le sol gelé sur quelques centimètres joue le rôle de couvercle.

Enfin, ces différentes remarques induisent qu'une méthode de mesure sur un intervalle de temps long par rapport à celui de ces fluctuations conduira à une valeur moyenne relativement indépendante des fluctuations dans le flux de radon, c'est-à-dire des changements dans la concentration en radon suivant les saisons et le climat. Mais des mesures sur un temps relativement court n'en permettent pas moins d'obtenir des indications intéressantes.

Nous avons abordé ici l'aspect géologique de la problématique du radon. Ce sont en effet les propriétés géologiques du sous-sol qui conditionnent l'importance du dégagement de radon à la surface du sol et dans les habitations.

- 1. Le radon est un descendant de l'uranium. Donc, sa présence dépend tout d'abord des concentrations en uranium dans les roches.**
- 2. Quand le radon naît à partir de la désintégration des atomes de radium, il ne devient dangereux pour l'homme que s'il arrive en surface. Sa faculté de déplacement dans le sous-sol, déterminée par la perméabilité des roches, est la deuxième propriété importante à tenir compte.**
- 3. Il faut donc coupler ces deux notions : localisation de l'uranium dans les roches et perméabilité du sous-sol, pour estimer les zones à risques radon.**

COMMENT MESURER LE RADON?

Les connaissances que nous avons du radon, de sa nature, de sa radioactivité, de ses déplacements dépend bien-sûr des mesures que nous pouvons en faire. Quand vous savez que votre maison mesure 25 mètres de long, c'est parce que vous avez pu avoir un mètre dépliant ou une chaîne d'arpentage à votre disposition.

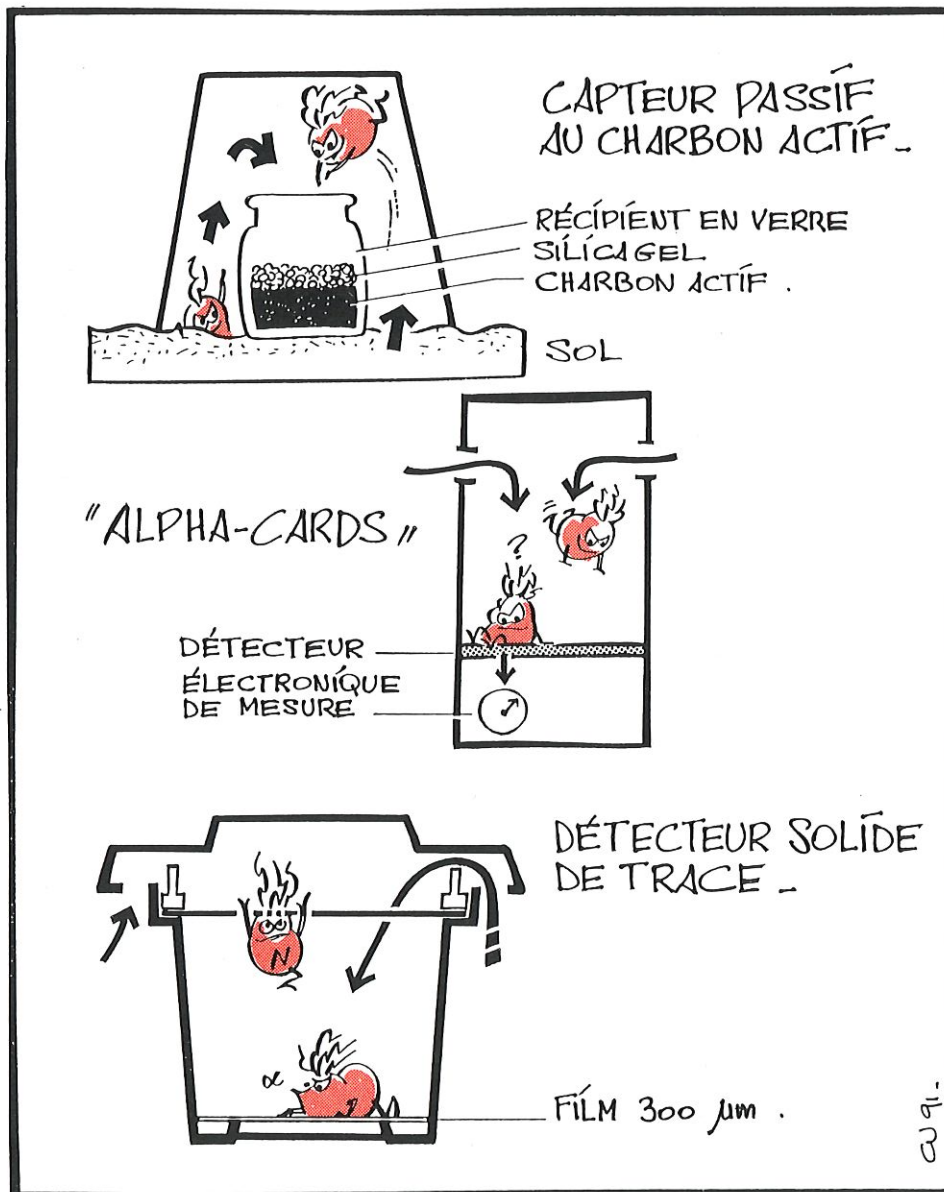


Figure 11 : Le radon se mesure à l'aide de divers types de détecteurs. Les capteurs passifs au charbon actif piègent le radon dans le charbon. On en mesure ensuite la radioactivité de ses descendants. Les alpha-cards enregistrent directement la radioactivité alpha émise par le radon et ses descendants. Enfin, le détecteur solide de trace est un film plastique qui est "transpercé" par les particules alpha. Un traitement chimique analogue à la révélation d'un film photographique fait apparaître des traces ponctuelles que l'on compte.

Dans le cas du radon, quelle est notre chaîne d'arpentage? Il existe plusieurs méthodes de mesure qui, toutes, utilisent le fait que le radon est radioactif. En effet, il n'y a que des quantités très petites de radon dans les roches, les sols, l'eau ou l'atmosphère et, de plus, il est chimiquement inerte. On ne peut donc pas mesurer le radon en l'analysant comme, par exemple, le calcaire dissous dans de l'eau.

Par contre, la radioactivité qui rend le radon si dangereux le trahit. Une première série de méthodes consiste à mesurer directement la radioactivité du radon et de ses descendants par un appareillage spécial, du type compteur Geiger perfectionné. Pour avoir plus de précision, on concentre d'abord le radon dilué dans l'air ou dans l'eau par des **capteurs**. Le charbon actif utilisé dans l'air en est un exemple. Ce sont des petits grains de charbon analogues à ceux qui sont utilisés dans les masques à gaz: ils captent les substances nocives avant qu'elles ne parviennent dans les voies respiratoires. Pour concentrer le radon à partir de l'eau, on utilise de petites bouteilles en plastique qui contiennent des liquides comme le benzène. On se base sur le fait que le radon s'accumule préférentiellement dans ces substances. Après un certain temps d'exposition déterminé par des expériences préalables, les capteurs sont placés dans l'appareil qui mesure la radioactivité.

Une deuxième série de méthodes utilise la radioactivité de façon indirecte. On ne mesure plus directement la radioactivité mais les traces qu'elle laisse dans de petites plaques plastiques (des films). Ces plastiques sont tels que les particules α émises par le radon laissent des petits trous quand elles les touchent. Ces trous peuvent être révélés comme une plaque photographique: ils apparaissent comme de petites tâches qu'il suffit de compter. Ce nombre de tâches constitue une mesure de la concentration en radon. On appelle ces films des **détecteurs solides de traces (DST)**.

Des appareils portables peuvent mesurer directement l'émission radioactive du radon quand ce dernier se pose sur une surface électroniquement sensible aux particules émises par le radon et ses descendants solides : telles sont les **alpha-cards**. Maints autres systèmes de mesure portables plus ou moins sophistiqués existent également dont l'exposé des principes dépasse le cadre de cette plaquette et dont l'utilisation requiert des techniciens expérimentés.

Chaque type de mesure présente des qualités et des défauts. Les capteurs au charbon actif sont rapides et faciles à mettre en oeuvre mais les résultats sont influencés par exemple par l'humidité ou les variations instantanées des concentrations en radon de la pièce. Les films sont plus stables et donnent une bonne valeur moyenne mais ils demandent un temps d'exposition dans la pièce à tester beaucoup plus long et fournissent ainsi un résultat qui est global au niveau de la période d'exposition. Chaque méthode devra donc être choisie en fonction des buts que l'on s'assigne.

LE SOUS-SOL DE LA BELGIQUE, SOURCE DE RADON.

Après avoir examiné comment le radon se forme à partir de l'uranium et du radium, comment il peut se déplacer sous terre, comment l'uranium se répartit dans différentes roches, il nous faut appliquer ces notions à notre pays.

L'URANIUM ET LE RADON AU TRAVERS DE NOS GRANDES REGIONS NATURELLES.

Dans nos cours de géographie, nous avons appris que la Belgique se subdivise en grandes zones naturelles. L'existence de ces zones naturelles est en fait surtout due à la nature géologique du sous-sol. Nous pouvons donc nous attendre à ce que la quantité de radon potentiellement présente varie selon la zone naturelle considérée: tel type de roche contenant plus d'uranium et étant plus fracturé se trouvant dans une région donnée implique que cette région est caractérisée par un flux de radon plus important qu'une autre région dont le sous-sol est formé de roches imperméables par exemple. Parcourons rapidement des régions en mettant en évidence les principales caractéristiques concernant le dégagement de radon (☺).

1. La plaine des Flandres et la Campine.

Ce "plat pays" est surtout formé de sables et d'argiles. Les sables sont très perméables mais pauvres en uranium tandis que les argiles, si elles contiennent parfois des quantités non négligeables d'uranium, constituent des écrans imperméables. Ces zones sont donc à très faible risque radon.

2. La moyenne Belgique.

La moyenne Belgique est d'abord un pays de bas plateaux entaillés par des rivières: Senne, Dendre, etc... Ce bas plateau doit son allure monotone à une couverture de limons, par ailleurs très fertiles. C'est pourquoi cette région possède des cultures aussi riches. Ces limons, qui ont été apportés par le vent lors des périodes glaciaires, ont, en ce qui concerne notre problème, un comportement analogue aux argiles sableuses: concentrations en uranium peu élevées et caractère imperméable accusé, sans l'être aussi fort que pour les argiles. Ces étendues limoneuses sont des zones à faible risque.

Par contre, les rivières, en creusant leurs vallées, ont traversé cette zone de couverture limoneuse et sont arrivées sur un soubassement de roches plus dures, plus anciennes, analogues à celles que l'on trouve en Ardenne: grès et schistes (les géologues parlent dans ce cas d'un **socle**). D'une part, ces roches peuvent parfois contenir des teneurs en uranium plus importantes que leur couverture limoneuse ou sableuse (les géologues parlent de **couverture** pour désigner des roches jeunes, souvent meubles, qui couvrent les roches dures du socle). D'autre part, les roches très dures du socle ont pu être fracturées et, par là-même, devenir susceptibles de libérer et véhiculer une partie de leur radon. Ces zones de vallées où le socle affleure constituent ainsi des zones où le risque potentiel est plus élevé que sur le plateau.

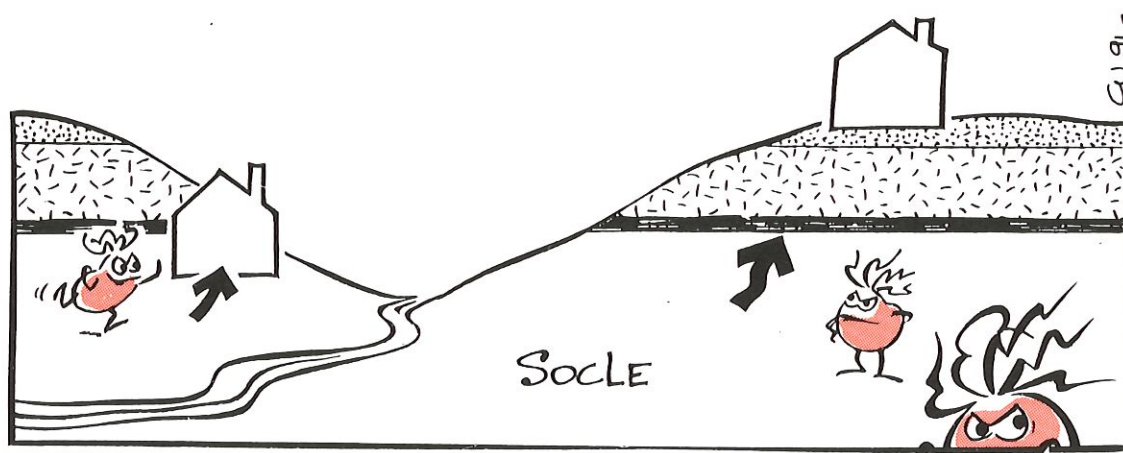


Figure 12 : Cette figure illustre l'effet des roches de couverture (sables, argiles, limons) qui freinent la libération du radon provenant des roches dures (schistes, grès,...) du socle sous-jacent dans le Brabant. La maison de gauche, construite dans la vallée sur les roches dures du socle, présente des risques potentiels de contamination radon. La maison de droite, par contre, est protégée des émanations radon en provenance du socle par une couverture de terrains qui font écran.

3. Le Condroz et la Famenne.

Le Condroz s'étend essentiellement au sud du sillon Sambre-Meuse. C'est un paysage de collines séparées par des vallons affluents des grandes rivières qui descendent de l'Ardenne: Meuse, Hoyoux, Ourthe pour ne citer que quelques exemples. C'est un paysage où alternent les calcaires (pensez aux calcaires sur lesquels est construite la citadelle de Dinant) et les grès. Les calcaires, nous l'avons vu, s'ils sont pauvres en uranium, peuvent constituer des zones à risques à cause de leur grande fracturation qui facilite les déplacements du radon sous terre. De plus, l'eau souterraine dans les calcaires parcourt des grottes dans lesquelles elle circule très vite: elle peut donc facilement transporter le radon.

La Famenne, au sud du Condroz, constitue une dépression schisteuse. Nous retrouvons là le cas d'une roche, le schiste, qui contient des quantités non négligeables d'uranium mais qui est très imperméable. De plus, la dépression de la Famenne est souvent recouverte par une couche d'argile qui provient de la désagrégation physique et chimique des schistes et qui joue également un rôle de chapeau imperméable colmatant toutes les fissures.

4. L'Ardenne.

Le haut plateau ardennais est sculpté dans des roches anciennes dures: grès, schistes plus ou moins transformés en quartzites et phyllades (ces dernières sont, en quelques sorte, des grès

et des schistes compressés et chauffés, et donc devenus plus durs mais aussi plus cassants). D'une manière générale, ces roches contiennent de l'uranium en teneurs non négligeables provoquant des concentrations en radon plus importantes. Ces roches, à l'encontre par exemple de celles du Brabant, ne sont pas recouvertes par des couches épaisses de roches de couverture : rien n'empêche le radon de se dégager. De plus, ces roches sont susceptibles d'être plus fracturées et de conduire souterrainement le radon sur des distances appréciables.

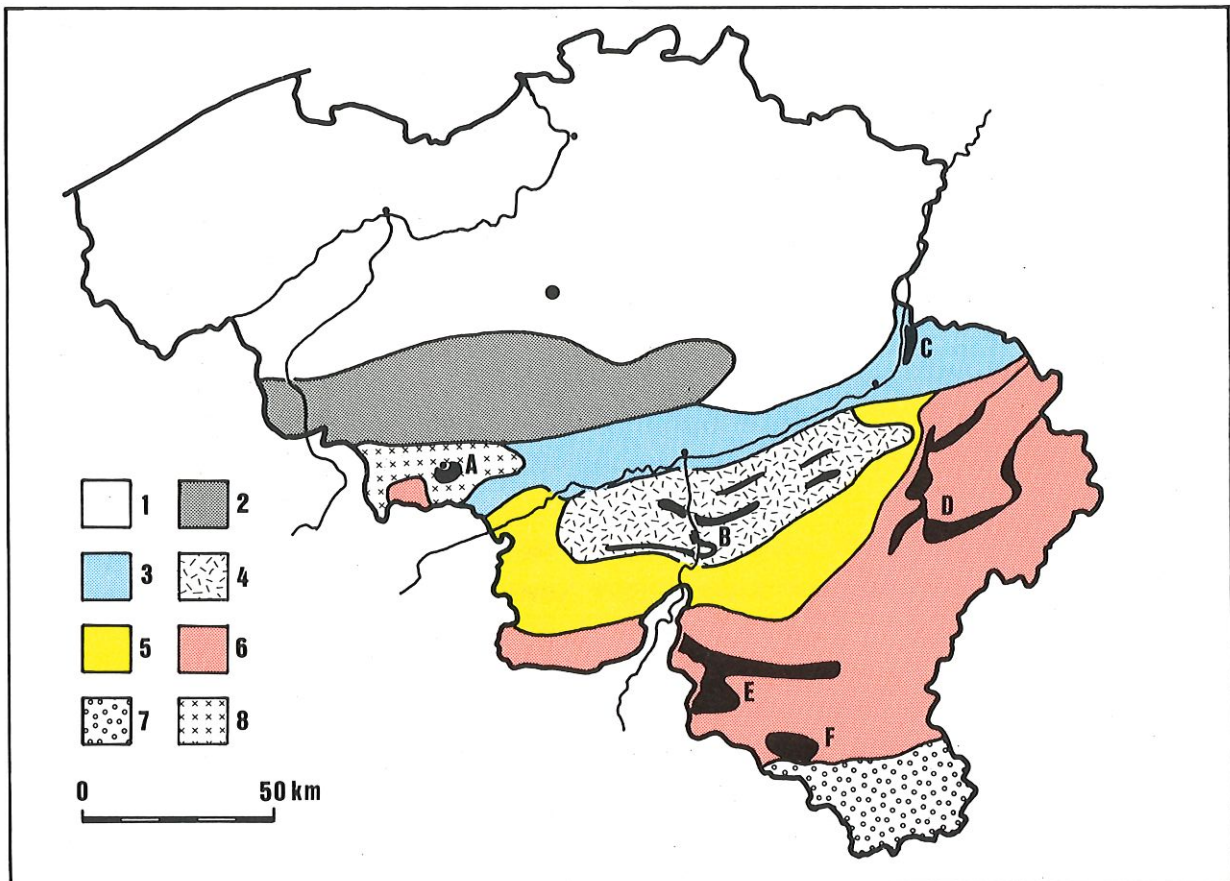


Figure 13 : Les régions naturelles de Belgique sont ici définies sur la base des grands traits géologiques. On trouve, du nord-ouest au sud-est, la plaine de la Basse Belgique (1) faite de sables et d'argiles, le plateau de moyenne Belgique (2) où une couverture sablo-limoneuse recouvre des roches dures anciennes (le "socle"), le sillon Sambre-Meuse (3) où affleurent des roches dures, notamment les schistes, le Condroz et ses alternances de calcaires et de grès (4), La dépression de Famenne (5) précédant le haut-plateau ardennais (6) de roches schisto-gréseuses anciennes et la Gaume (7). Notons également le bassin de Mons distinct à cause, notamment, de ses phosphates (8). Les zones noires sont celles qui, sur base des données géologiques, sont potentiellement à risques. On y trouve la ceinture au sud de Mons (A) (les craies phosphatées), des bandes est-ouest dans le Condroz (roches de passage entre les calcaires et les schistes, B), la région de Visé (C), la ceinture du massif de Stavelot (D), la région de Monceau-en-Ardenne (E) et, enfin, la zone de la Vierre (F).

5. La Gaume.

Elle se situe au sud de la retombée méridionale de l'Ardenne (Arlon, Virton). Les roches changent complètement de nature: elles sont plus récentes qu'en Ardenne, moins dures. Ce sont des calcaires et des marnes (mélange de calcaire et d'argile). Ce mélange provoque également un colmatage des fissures qui ne conduisent plus alors le radon sur de longues distances. Leurs teneurs en uranium sont basses. C'est une zone à risque radon plus faible qu'en Ardenne, analogue au nord du pays.

DES VARIATIONS LOCALES.

Au vu de ce que nous venons d'examiner, on se rend bien compte que les flux radon peuvent varier très fortement d'une zone à l'autre, zones peut-être distantes de quelques kilomètres ou même hectomètres. Surimposées aux grandes variations régionales, des variations locales sont à examiner. Elles sont à nouveau de deux types, obéissant aux deux contraintes qui conditionnent les teneurs en radon dans les grandes régions.

La première contrainte est, rappelons-le, la concentration en uranium de la roche. Des "accidents géochimiques" localisés peuvent aboutir à des concentrations en uranium anormales. Ainsi, autour de Mons, des masses de craies phosphatées offrent des concentrations en uranium qui vont jusqu'à plusieurs dizaines de ppm, soit 50 à 500 fois les teneurs dans les calcaires ou les craies. Heureusement, ces craies phosphatées sont recouvertes par d'autres formations ne possédant que très peu d'uranium: tuffeau (calcaire tendre très pur), limons.

En Ardenne, plusieurs concentrations locales d'uranium ont été découvertes par des prospections géophysiques et géochimiques effectuées notamment par la Faculté Polytechnique de Mons. Nous en avons déjà cité dans la vallée de la Semois et de la Vierre (Monceau-en-Ardenne, Oizy, Baillamont). Il en existe aussi autour du massif de Stavelot dans des schistes noirs.

Dans le Condroz, une bande de roches particulières riches en uranium sépare les calcaires des schistes. Cette bande s'étend sensiblement d'ouest en est. On la trouve par exemple à Bioul. Très localement, ce sont les mêmes roches que l'on retrouve dans la tranchée du canal à Blaton.

Dans la région de Visé, un autre phénomène géologique s'est déroulé. De l'uranium a été dans le passé attaqué chimiquement et transporté par les eaux souterraines. Il s'est reconcentré dans des cavernes très anciennes avec d'autres roches où il constitue de véritables accumulations ponctuelles. Le radon qui en vient est transporté dans les eaux souterraines et réapparaît aux sources. C'est là qu'à notre connaissance furent mesurées en janvier 1972 les premières concentrations anormales en radon dans les eaux de source en Belgique par le Professeur Garsou de l'Université de Liège.

La seconde contrainte est la possibilité qu'a le radon de se déplacer. Nous avons vu qu'il se déplace soit sous forme gazeuse, mélangé par exemple à l'air souterrain sous forme de courants d'air dans les fractures, soit dissous dans les eaux souterraines. On peut donc se méfier a priori de zones installées sur des roches très fortement fracturées, à fortes perméabilités. A cet égard, les calcaires en constituent l'exemple-type. Non seulement ils sont très fracturés (regardez une paroi de calcaire, vous y verrez de multiples fractures de toutes sortes et de toutes orientations), mais de plus un massif calcaire peut être parcouru d'un réseau de grottes, de conduits de toutes les tailles, secs ou envahis par les eaux. Dans les deux cas, le radon a la possibilité de se déplacer avec l'air (songez, lorsque vous visitez une grotte touristique, aux courants d'air qui caractérisent certains passages plus étroits) et avec l'eau qui, dans les grottes, circulent très rapidement. On arrive ainsi à des anomalies en radon qui sont très locales. On peut obtenir de fortes teneurs au débouché d'une profonde fracture verticale ouverte dans le sous-sol tandis qu'à une dizaine de mètres de là les teneurs en radon sont faibles.

Nous avons aussi vu que certains schistes, comme les schistes de la Famenne, sont très imperméables et, de plus, colmatés par une couverture d'argile, alors que d'autres, plus durs (les phyllades de l'Ardenne), peuvent être fracturés et présenter une certaine perméabilité favorable aux déplacements du radon.

Le survol des régions naturelles de notre pays a mis en exergue que les anomalies de radon sont bien liées à des roches assez riches en uranium et fracturées : production et transport de radon vont de pair pour créer une zone à risque. C'est donc essentiellement la Haute Belgique qui groupe le plus de zones à risques. Néanmoins, n'oublions jamais que des cas très ponctuels de fortes concentrations en radon peuvent se présenter, résultat d'une configuration géologique particulière.

LES ETUDES APPLIQUEES AUX CAS CONCRETS.

LA CARTOGRAPHIE DE LA DISTRIBUTION DE L'URANIUM.

Le premier pas consiste à connaître la répartition de l'uranium dans les roches et les sols. A cet égard, un important travail est à notre disposition. A la fin des années 70, lorsque la demande élevée en uranium exigeait de découvrir de nouvelles ressources, une prospection autoportée a été réalisée dans la Moyenne et la Haute Belgique, les deux seules zones où, comme nous l'avons vu, il était possible d'espérer découvrir de l'uranium. Cette prospection a été notamment effectuée par voie autoportée. Un détecteur de radioactivité fut installé sur un véhicule tout-terrain et couplé dans ce véhicule à un appareillage d'enregistrement. De cette manière, l'équipe de la Faculté Polytechnique de Mons sous la coordination du Service Géologique de Belgique dressa des cartes donnant la répartition de l'uranium et de la radioactivité totale. Ces documents sont très précieux à ce moment de notre enquête car ils fournissent les premiers éléments pour déterminer les zones à risques.

Certaines zones anormales ont fait l'objet de levés et d'études plus détaillées. Nous avons parlé de la vallée de la Semois où des accumulations ponctuelles d'uranium ont été mises en évidence. La région de Visé a aussi fait l'objet d'études géologiques et de radioactivité, ainsi que les environs de Mons en relation avec la craie phosphatée.

CARTOGRAPHIE DES ZONES HABITEES.

L'étape suivante doit bien évidemment se préoccuper du but final, à savoir les habitations et locaux de travail. Plusieurs études détaillées ont été réalisées dans divers contextes. Elles ont pour base la mesure du radon dans les habitations. Le choix des scientifiques s'est porté tout d'abord sur des agglomérations situées sur des zones à risques. C'est pourquoi les communes de Visé, de Oizy-Baillamont, de Cuesmes près de Mons, de Bioul, d'Anhée ont fait l'objet de mesures de radon dans les habitations. Parallèlement, les pouvoirs publics ou de simples particuliers ont demandé des mesures afin d'évaluer le risque encouru par les personnes résidant ou travaillant dans certains locaux. On peut citer l'enquête réalisée dans les écoles de la province du Luxembourg qui a abouti à détecter des teneurs parfois anormales en radon dans ces locaux scolaires. On a aussi mis en évidence des concentrations dépassant les normes dans des maisons particulières. Citons, à nouveau, le cas de Visé et de Monceau en Ardenne.

Dans l'entité de Bièvre (région de Monceau), 80% des habitations ont des concentrations en radon supérieures à 200 Bq/m³, 10% des maisons ont des concentrations supérieures à 5000 Bq/m³. Dans certaines caves, on a même mesuré des activités de l'ordre de 12.000 à 15.000 Bq/m³. Il faut aussi noter que, dans la même localité, des caves ne dépassent pas 100 Bq/m³. On peut donc bien affirmer que cette entité est une entité à risques, mais, comme nous l'avons souligné, on ne peut pas dire avec certitude a priori que telle ou telle maison aura des concentrations dépassant les normes. Cela dépend de nombreux facteurs que nous avons examinés: concentration en uranium dans les roches sous la maison, possibilité de courants

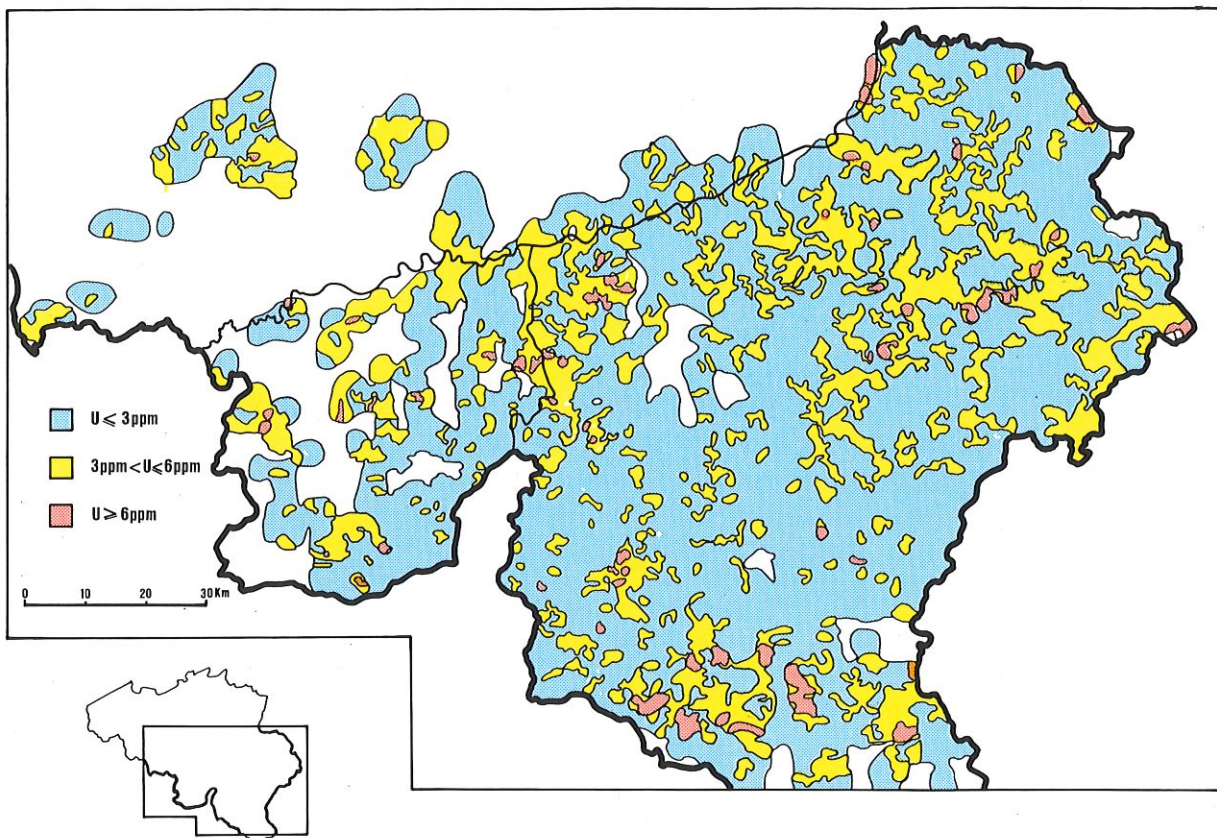


Figure 14 : Cette carte de la distribution de l'uranium en moyenne et haute Belgique a été réalisée par mesures autoportées, c'est-à-dire à l'aide d'un détecteur fixé sur un véhicule tout-terrain. Les grands traits explicités ci-dessus apparaissent à nouveau: concentrations en uranium élevées dans les schistes de l'Ardenne, anomalies dans certains contextes géologiques (la "bande de Bioul", la région de Vresse-sur-Semois, les environs de Stavelot). Une carte de ce type fournit la première cause des concentrations en radon: la présence de l'uranium.

souterrains de radon, caractéristiques architecturales de la maison, matériaux utilisés, isolation, etc... Les mesures précises sont donc indispensables.

Nous donnons dans la seconde partie de ce fascicule le détail de quelques études portant soit sur l'analyse du radon dans les maisons exclusivement, soit sur l'ensemble habitation-contexte géologique.

Examinons ici un exemple d'analyse d'une zone à problème : Cibly près de Mons. Ainsi que nous l'avons dit plus haut, le risque radon potentiel est dû à l'existence dans le sous-sol d'une puissante couche de craie phosphatée. Ces phosphates contiennent plusieurs dizaines de ppm en uranium, soit de 10 à 20 fois plus que dans la majorité des autres roches. La figure 16

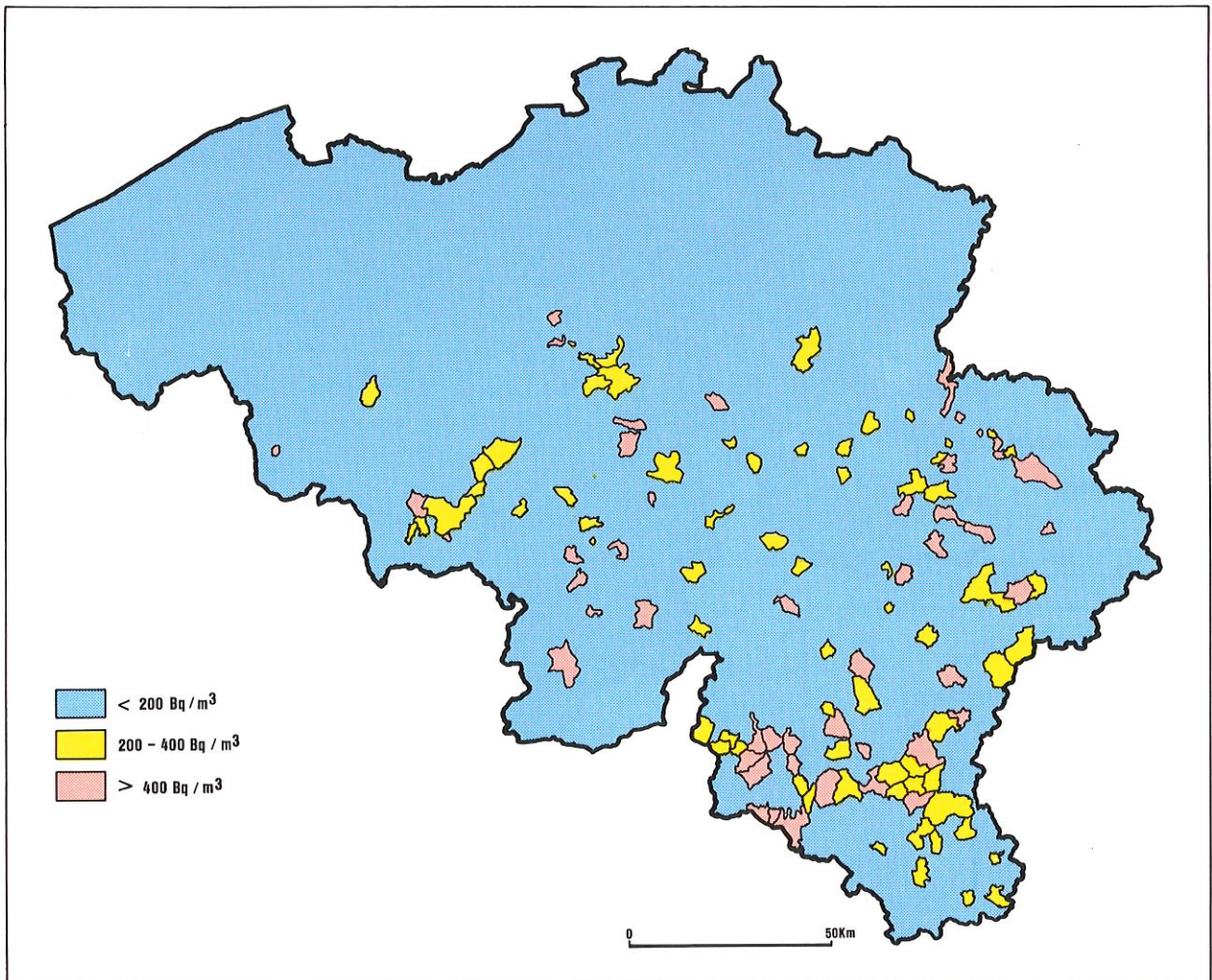


Figure 15 : Carte des communes dans lesquelles des mesures radon dans les habitations ont été effectuées. Nous avons distingué les communes où des activités radon supérieures à 400 Bq/m^3 ont été mesurées, celles dans lesquelles les activités sont comprises entre 200 et 400 Bq/m^3 et, enfin, les localités dans lesquelles ces activités sont inférieures à 200 Bq/m^3 . Cette carte se veut illustrative et non analytique. Beaucoup d'autres mesures ont été faites ou sont en cours de réalisation. Par ailleurs, nous avons considéré qu'une entité est une zone à risque lorsqu'au moins une mesure se révèle anormale. C'est la définition d'une "zone à risque". Un document plus complet, plus analytique, devrait rendre compte d'un nombre de mesures statistiquement représentatives pour chaque localité, ainsi que d'autres grandeurs statistiques comme la dispersion des valeurs, les valeurs minimum et maximum, etc... Malgré ces limitations, apparaissent clairement la zone à risque des environs de Oizy, Monceau et Baillamont qui s'étend vers l'est en gros jusque Bastogne, Visé et le bassin de Mons. La zone de Chiny - la Vierre, riche en uranium, n'apparaît pas, illustrant ainsi nos déductions relatives à "l'enfermement" de l'uranium dans des couches imperméables qui ne laissent pas échapper le radon. Enfin, des mesures très anormales ne trouvent pas actuellement une explication géologique immédiate, comme l'anomalie de Baudour près de Mons, ou de Orcq près de Tournai.

montre la répartition des premières habitations à l'intérieur desquelles l'équipe de la Faculté Polytechnique de Mons a dosé le radon. Il ne s'agit bien-sûr que des prémisses d'une étude plus complète, destinés à tester le problème. On voit que, au milieu de maison dont les teneurs sont largement inférieures au seuil des 400 Bq/m³, quelques habitations dépassent cette norme. Ces variations sont explicables par les conditions géologiques et géographiques locales : la craie phosphatée est affleurante ou est enfouie sous des formations de couverture (les limons ou le tuffeau déjà mentionné), l'habitation se trouve dans une vallée ou sur un versant.

L'INFLUENCE DU BATIMENT.

Il reste à s'intéresser à la manière dont le radon s'accumule dans les habitations. Il vient du sous-sol, nous venons d'en parler abondamment. Il monte des profondeurs et entre d'abord par les caves. Il ne faut donc pas s'étonner si c'est dans une cave que l'on détectera les plus fortes valeurs de toute la maison. Ensuite, profitant des courants d'air, il diffusera dans les pièces supérieures.

	Caves	Living	Chambres
Nombre de mesures	30	24	19
Moyenne de l'intensité radon (Bq/m ³)	145	82	50
Pourcentage de mesures au dessus de 200 Bq/m ³	29	16	5
Pourcentage de mesures au dessus de 400 Bq/m ³	13	0	0

Tableau 2 : Comparaison des mesures faites dans les caves, les living et les chambres (enquête dans la localité de Ciplu). On constate une décroissance des intensités radon quand on passe des caves aux living et aux chambres.

On comprend également bien que la concentration en radon sera d'autant plus forte dans la maison qu'elle est bien isolée. Le radon y entre par le sous-sol et n'en sort plus! Le danger potentiel est ainsi plus élevé pour une maison bien isolée que pour une maison plus ancienne siège de courants d'air. La fréquence de l'ouverture des portes est aussi, de ce fait, un facteur qui influence la concentration en radon. Des études sont actuellement en cours pour "suivre" les déplacements du radon dans des habitations en fonction des différences de température, des volumes, de l'agencement des pièces, etc...

Et qu'en est-il des matériaux de construction? On peut en effet légitimement se poser la question. Certains de ces matériaux sont-ils riches en uranium? Dans ce cas, libèrent-ils du radon en concentrations élevées dans les maisons?

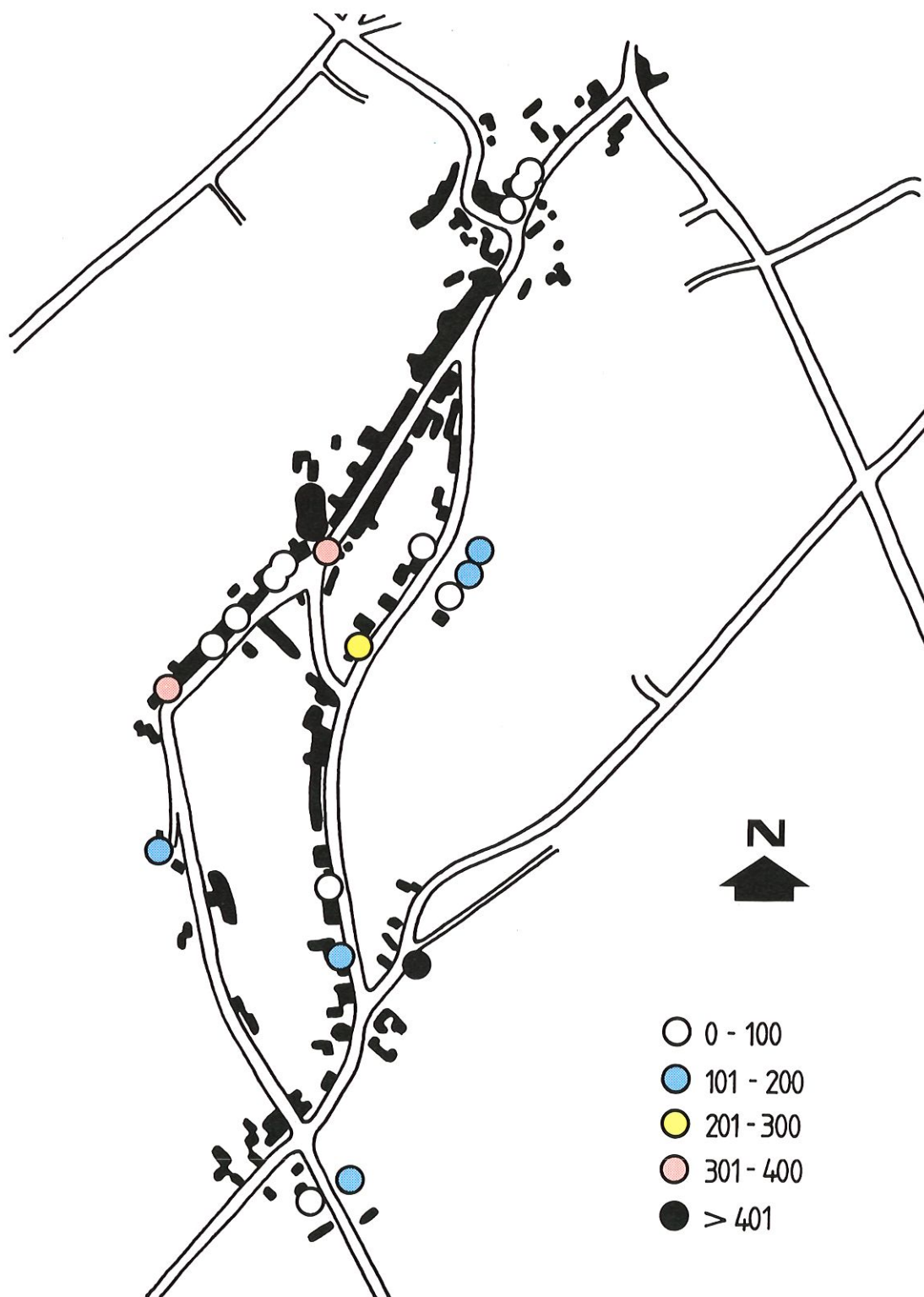


Figure 16 : Cartographie des mesures radon faites dans certaines habitation de la localité de Cibly. Les chiffres sont exprimés en Bq/m³. La méthode utilisée est celle des charbons actifs. Cette étude constitue l'exemple-type du début d'une investigation détaillée sur une localité.

Des analyses ont montré que certains matériaux de construction sont assez riches en radium. Il s'agit surtout des dérivés de l'industrie des phosphates, de divers types de plâtres. Rappelez-vous: les phosphates sont riches en uranium. Le traitement industriel de ces phosphates passe par une attaque à l'acide sulfurique qui libère, comme résidu, des "phosphogypses". C'est dans ces résidus que s'accumule le radium. Dans ce cas, il se retrouve évidemment dans les plâtres fabriqués à partir de ces résidus. Les sociétés de consommateurs ont déjà pointé du doigt ce contenu en radium. Dans une maison dont les murs sont revêtus de ces plaques en plâtre, le radon en provenance du radium qui y est contenu existe sans conteste, mais à quelles doses? Il faut bien se rendre compte que le radon issu du sous-sol est dégagé par des masses énormes de roches: des dizaines de mètres-cube, beaucoup plus quand des fractures drainent le radon. Cela fait beaucoup comparé aux quelques mètres-cube de plâtre recouvrant les murs. Statistiquement, le radon provient donc essentiellement du sous-sol mais, dans certains cas particuliers de matériaux radioactifs, il peut exister un risque potentiel.

Y A-T-IL DES REMEDES A APPORTER AUX CAS A RISQUES?

Lorsqu'une habitation présente des teneurs en radon excédant les normes conseillées, peut-on pallier à cette situation inquiétante? Oui, en se souvenant de la provenance du radon et de la manière dont il transite.

Le radon provient essentiellement du sous-sol.

Celui-ci est donc généralement la source principale de radon dans les habitations où des concentrations importantes de ce gaz sont mesurées. Le déplacement de gaz du sol vers l'intérieur de l'habitation sera favorisé par deux paramètres :

- l'existence de voies de passage pour le gaz, qui relie le sol et l'intérieur du bâtiment (pièces basses) : ouvertures et fissures dans les dalles et les murs des fondations, joints entre les murs et la dalle de sol, ouvertures autour des canalisations, ouvertures et fissures dans les planchers sur vide sanitaire,...
- la mise en dépression du bâtiment : il peut en effet régner, notamment dans les pièces basses de l'habitation, une pression inférieure à celle qui règne à l'extérieur, et en particulier dans le sol. Cette situation est liée aux effets du vent et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, en conjugaison avec les caractéristiques propres du bâtiment (notamment en ce qui concerne sa ventilation).

Si des concentrations élevées de radon sont mesurées dans une habitation, on s'attaquera au problème en agissant avant tout sur le premier de ces deux paramètres. On veillera donc à éliminer ou à réduire l'importance des voies de passage possibles pour le radon. Les fissures et ouvertures situées sur les dalles et les murs en contact avec le sol seront colmatées au moyen de ciment ou de mastic aux silicones. Les joints entre la dalle de sol et les murs seront

renforcés. Si l'habitation est construite sur vide sanitaire, l'étanchéité du plancher devra être contrôlée et améliorée, car l'air contenu dans le vide sanitaire peut présenter de fortes concentrations de radon. S'il s'agit d'une habitation avec des caves, on veillera avant tout à la bonne étanchéité à l'air des portes d'accès aux caves et des ouvertures de passage de canalisations de la cave vers l'intérieur de l'habitation.

Ces mesures, quoique indispensables pour assurer le succès d'actions correctrices ultérieures, sont généralement insuffisantes, à elles seules, pour réduire suffisamment la concentration de radon dans l'air de l'habitation, il est donc nécessaire de les compléter :

- par des mesures agissant sur la ventilation du bâtiment. Il s'agit en fait de diminuer la concentration de radon dans l'air intérieur en augmentant le taux de renouvellement de l'air de l'habitation. On agira, par exemple, au niveau de la ventilation naturelle : diminution du calfeutrement des portes et fenêtres et ouverture des orifices d'aération, notamment dans les pièces basses. Pour les habitations très étanches une ventilation mécanique pourra être envisagée, mais on n'utilisera pas de ventilateurs extracteurs car ceux-ci diminuent la pression de l'air dans les locaux. Les caves (lorsque cela est possible) ou les vides sanitaires ne seront pas oubliés : quelques orifices de ventilation situés sur des façades opposées permettront souvent d'améliorer la situation. On veillera toutefois à la bonne isolation thermique des conduites d'eau (chaude et froide) dans ces locaux.

Le principal avantage de la plupart de ces mesures est la facilité et le faible coût de leur mise en oeuvre. En contrepartie, elles entraînent une plus grande consommation d'énergie.

- Par des techniques dont le but est de s'opposer au passage de radon du sol vers l'intérieur. Il s'agira, bien sûr, d'éliminer le plus grand nombre possible de voies de passage, mais aussi d'agir sur les pressions d'air dans le bâtiment ou dans le sol. L'objectif est de créer, dans les locaux qui sont en contact avec le sol, une pression supérieure à celle qui règne dans le sol situé immédiatement en-dessous du bâtiment. Deux techniques sont possibles: la mise en surpression des locaux ou la mise en dépression du sol. Ces méthodes sont plus coûteuses que celles évoquées précédemment et nécessitent l'intervention de spécialistes. Elles présentent toutefois des avantages (surtout la méthode de mise en dépression du sol) et doivent être envisagées en cas d'échec des méthodes basées sur la ventilation ou lorsque le problème est particulièrement aigu.

D'une façon générale, il importe de retenir que diverses solutions peuvent être envisagées pour résoudre le problème du radon dans les habitations. Les chances de succès sont variables, d'une technique à l'autre, selon les caractéristiques du bâtiment traité et la gravité du problème. Dans tous les cas, des mesures de la concentration de radon dans l'habitation sont indispensables pour contrôler l'efficacité de l'action entreprise.

QUELQUES CONCLUSIONS.

- 1. Il existe des régions à risque potentiel plus importants que d'autres. Les connaissances géologiques permettent de traiter en grande partie cette problématique.**
- 2. Les facteurs qui provoquent une accumulation anormale du radon dans les habitations sont nombreux: contexte géologique (concentration en uranium, fracturation, hydrogéologie), caractéristiques architecturales de l'habitation, nature des matériaux utilisés, qualité de l'isolation. On peut dire que les risques seront plus élevés si la maison est ancrée dans le substratum géologique sans vide ventilé, sans séparation physique nette entre le sous-sol et la maison proprement dite. De même, une très forte isolation favorise le confinement de l'air et du radon qui peut s'accumuler dans cette espèce de cloche.**
- 3. Beaucoup de facteurs peuvent jouer: une connaissance préalable complète n'est pas possible. Des maisons d'une zone anormale peuvent être sans radon, d'autres situées dans des régions à risque faible sont susceptibles d'en avoir. Vu ces considérations, des mesures localisées sont indispensables pour établir une situation aussi proche que possible de la réalité.**

Seconde partie

Fiche 1. - LA RADIOACTIVITE

NATURE DU PHENOMENE

La radioactivité est la propriété présentée par certains éléments d'être instables au cours du temps: ils se désintègrent en émettant particules et rayonnement et donnent ainsi naissance à un autre élément que l'on appelle "élément-fils", lui-même étant l'"élément-père". La radioactivité est une propriété qui affecte le noyau de l'atome. Une désintégration radioactive modifie ainsi le nombre de protons ou/et de neutrons du noyau.

Rappelons d'abord que l'atome est constitué d'un noyau entouré d'électrons. Ce sont ces électrons qui déterminent toutes les propriétés habituelles des substances que nous connaissons: couleur, dureté, odeurs, etc... Seuls les électrons sont impliqués dans une réaction chimique. Ils portent chacun une charge électrique négative. Le noyau, quant à lui, est constitué de protons et de neutrons. Les protons ont une charge positive qui équilibre la charge négative des électrons: un atome est électriquement neutre. Les neutrons, comme leur nom l'indique, sont électriquement neutres. Neutrons et protons, que l'on appelle **nucléons**, ont des masses voisines beaucoup plus lourdes que celle des électrons. Leur cohésion est assurée par des forces très puissantes: les forces nucléaires. Ce sont elles qui contrebalancent les forces de répulsion électrique des protons. En effet, chargés tous d'électricité positive, ces protons se repoussent.

Un atome doit ses propriétés chimiques au nombre de ses électrons et, du même coup, de ses protons. Un même élément peut aussi posséder plusieurs nombres de neutrons pour le même nombre de protons: les propriétés chimiques ne changeront pas mais les propriétés nucléaires bien, notamment au travers de la radioactivité. Ces différents noyaux du même élément ne différant que par leur nombre de neutrons s'appellent des **isotopes**. Prenons l'exemple de l'uranium. Il possède 92 protons (et électrons). Dans la nature, on rencontre 3 isotopes d'uranium, chacun se caractérisant respectivement par 146, 143 et 142 neutrons. On les désigne par le nombre total de nucléons: 238, 235 et 234. On les note de la manière suivante: $^{238}\text{U}_{92}$, $^{235}\text{U}_{92}$ et $^{234}\text{U}_{92}$. On parle de l'uranium-238 (ou U-238), de l'uranium-235 et de l'uranium-234.

On conçoit que, lorsque le noyau atomique devient très gros, c'est-à-dire lorsqu'il acquiert un grand nombre de protons, leurs forces répulsives peuvent prendre le dessus. Le noyau devient instable : c'est la radioactivité. (Il existe d'autres types d'instabilité dont nous ne pouvons parler ici). Un noyau radioactif a tendance à éliminer la cause de son instabilité. Pour cela, il émet des particules. Ces particules sont souvent accompagnées d'un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière mais de plus courte longueur d'onde et de plus grande énergie.

LE TEMPS DE DEMI-VIE

Ce concept joue un rôle fondamental en radioactivité. Un ensemble d'atomes d'un élément radioactif diminue au cours du temps parce que ces atomes se désintègrent un à un. Cette diminution ne se fait pas au hasard mais suivant une loi rigoureuse qui n'a jamais été mise en défaut, loi qui s'écrit mathématiquement de cette façon:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

C'est la célèbre loi de décroissance radioactive. N est le nombre d'atomes qui restent au moment de la mesure, N_0 est le nombre d'atomes au temps initial, λ est une constante universelle appelée constante radioactive qui est caractéristique de l'élément radioactif considéré, t est le temps. Pour les mathématiciens, il est facile de transformer cette formule pour exprimer le temps après lequel la moitié des atomes de l'élément radioactif ont disparu: il suffit de poser que $N = N_0/2$. Ce temps que l'on écrit $T_{1/2}$ est le **temps de demi-vie** du radioélément considéré. Son importance vient de ce qu'il exprime la **pérennité de l'élément radioactif considéré** et, donc, du temps pendant lequel il peut nuire à l'homme et à son environnement. De plus, on peut aussi facilement se rendre compte que ce sont les radioéléments à petits temps de demi-vie qui sont les plus radioactifs puisqu'ils se désintègrent plus vite.

Tableau 01 : Quelques temps de demi-vie.

ISOTOPES	TEMPS DE DEMI-VIE
Uranium-238	4 468 000 000 années
Uranium-234	248 000 années
Radium-226	1 602 années
Radon-222	3,825 jours
Bismuth-214	19,7 minutes
Polonium-214	0,000 164 seconde
Thorium-232	13 900 000 000 années
Radon-220	55,6 secondes
Samarium-147	106 000 000 000 années

Les isotopes se trouvant dans les cases grises appartiennent à la famille radioactives de l'uranium-238.

Fiche 2. - LES EMISSIONS RADIOACTIVES

Les émissions radioactives sont au nombre de trois. L'**émission alpha** est la libération de particules formées de deux protons et de deux neutrons. Les particules alpha sont en fait des noyaux d'atomes d'hélium. L'atome-père, en émettant une particule alpha, perd donc deux protons et deux neutrons. Il se transforme en un autre atome ayant des propriétés chimiques tout-à-fait différentes puisque, ayant perdu deux protons, il a aussi deux électrons en moins pour respecter la neutralité électrique. Prenons un exemple concret. L'atome de l'uranium-238 possède 92 protons et 146 neutrons. Il émet une particule alpha. Le nouvel élément a 90 protons: c'est un autre métal: le **thorium**. Le nombre de neutrons est de 144, nous avons affaire au thorium-234. Notons que la particule alpha est une particule lourde. Elle est excessivement freinée par la matière (une épaisseur de quelques millimètres d'eau suffit à arrêter toutes les particules alpha d'une source radioactive). Mais, côté inverse de la médaille, ces particules sont très destructrices et sont cause de beaucoup de dégâts dans les réseaux cristallins ou dans la matière vivante...

La deuxième émission radioactive est l'**émission bêta**. Il s'agit ici de l'émission d'un électron (ou de son anti-particule mais nous ne rentrons pas dans ces détails). Un électron qui vient du noyau? Oui, car il résulte de la transformation d'un neutron en un proton plus un électron. Dans ce cas, le nombre de protons du noyau augmente d'une unité, le nombre de neutrons diminue d'une unité et le nombre total de nucléons reste invariable. Par exemple, le thorium-234 issu de la désintégration de l'U-238, se désintègre à son tour par émission bêta. Il se transforme en palladium-234 (Pa-234) dont le nombre de protons est de 93.

Enfin, la troisième émission radioactive est une émission de rayonnement: ce sont les fameux **rayons gamma**. Souvent, lorsqu'une désintégration radioactive a lieu, le nouveau noyau fils est créé avec un trop-plein d'énergie. On dit qu'il se trouve dans un état énergétique excité. Cet état est hautement instable et, extrêmement rapidement, il expulse son trop-plein d'énergie sous forme de rayons gamma. Ces rayons sont très pénétrants : ils peuvent traverser plus de 50 cm de béton. Dans les cellules vivantes, ces rayons gamma perturbent considérablement les diverses réactions biochimiques qui s'y déroulent. C'est pour cela que des irradiations peuvent conduire à des mutations: ces rayonnements modifient le code génétique.

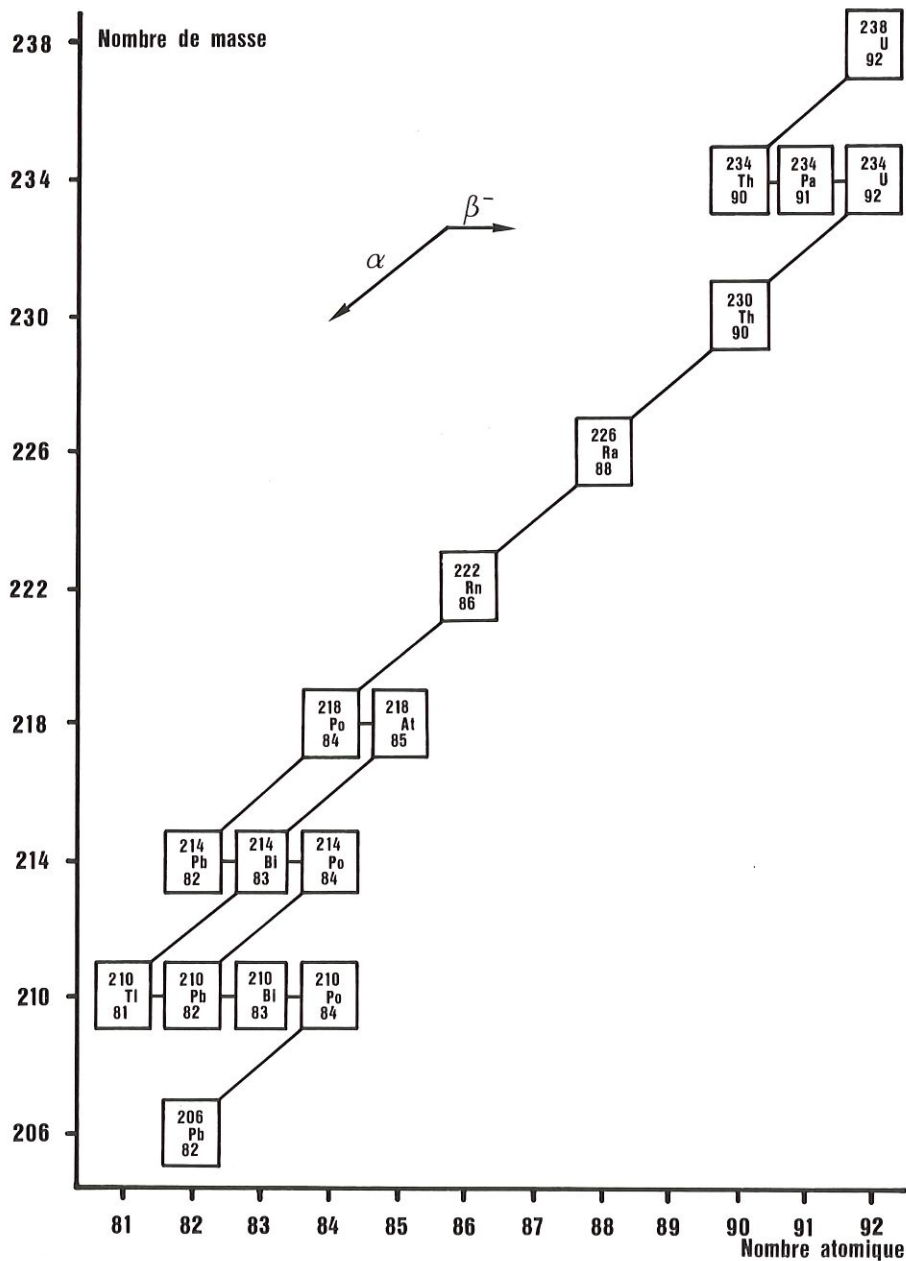


Figure 01 : famille radioactive de l'uranium-238 (²³⁸U). En abscisse, nous avons le nombre atomique de l'élément considéré (nombre de protons), en ordonnée le nombre de masse (nombre de protons plus nombre de neutrons). Un élément est donc représenté dans cette figure par un rectangle. Une désintégration radioactive α correspond à une diminution de 2 unités pour le nombre atomique (2 protons perdus) et de 4 pour le nombre de masse (2 protons + 2 neutrons). Une désintégration β^- , résultant de la transformation d'un neutron en proton, augmente le nombre atomique d'une unité sans toucher au nombre de masse. On situe le radon en dessous du radium-226, son "père direct". Il donne naissance à de nombreux descendants, dont les ²¹⁴Bi et ²¹⁴Pb sont très radioactifs.

Fiche 3. - LES FAMILLES RADIOACTIVES

En règle générale, un élément radioactif se désintègre en donnant naissance à un élément-fils stable. Pour quelques radio-éléments naturels, l'élément-fils est lui-même radioactif. Il donne à son tour naissance à un autre élément radioactif et ainsi de suite... Nous avons affaire à une famille radioactive.

Il y a trois grandes familles radioactives naturelles dont les têtes de famille sont respectivement l'U-238, l'U-235 et le Th-232. Toutes se terminent par la formation d'un isotope du plomb. Elles comprennent une dizaine d'éléments radioactifs transitoires. Les figures ☺1, ☺2 et ☺3 détaillent ces trois familles. On voit que deux d'entr'elles possèdent un isotope du radon. Le radon qui se trouve dans la famille du Th-232, qui a aussi pour nom le **thoron**, a une demi-vie très courte (55,6 secondes). Dès sa formation, il se désintègre et dans le problème qui nous préoccupe, il ne joue pas un rôle important. C'est donc le radon-222 qui se trouve dans la famille de l'U-238 qui nous intéresse ici. On voit que le père direct du radon est le radium (Ra-226), LE radium de Marie et Pierre Curie.

Toutes les propriétés du radon qui jouent un rôle dans sa distribution proviennent d'une part de son absence de propriété chimique et de sa mobilité, d'autre part de sa position au sein de la famille radioactive de l'U-238 et de sa demi-vie. Le radon est lié dans la nature à l'uranium. Là où il y a de l'uranium, il y a du radon. Ensuite, lorsque le radon est créé, il peut soit rester sur place à cause de l'imperméabilité du milieu, soit se déplacer plus ou moins loin de son lieu de création. C'est là un autre aspect fondamental du problème qui nous préoccupe.

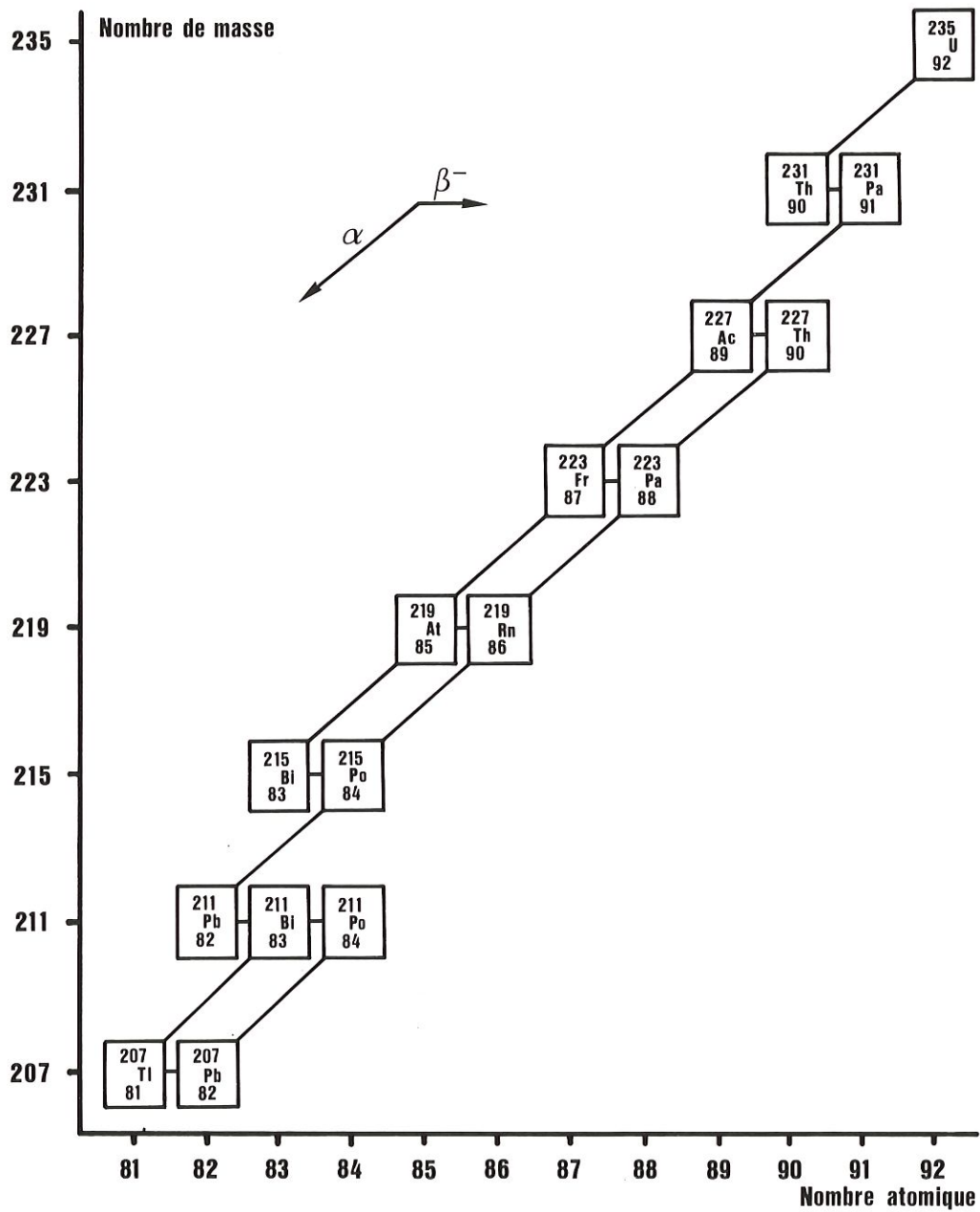


Figure 2 : famille radioactive de ^{235}U . Cet autre isotope naturel de l'uranium est aussi la tête d'une famille radioactive. Il est beaucoup moins abondant que ^{238}U (dans un rapport actuel de 1/138). En lui-même, il ne constitue donc pas un danger, de même que ses descendants. Notons néanmoins que c'est cet isotope qui fait fonctionner les réacteurs nucléaires classiques.

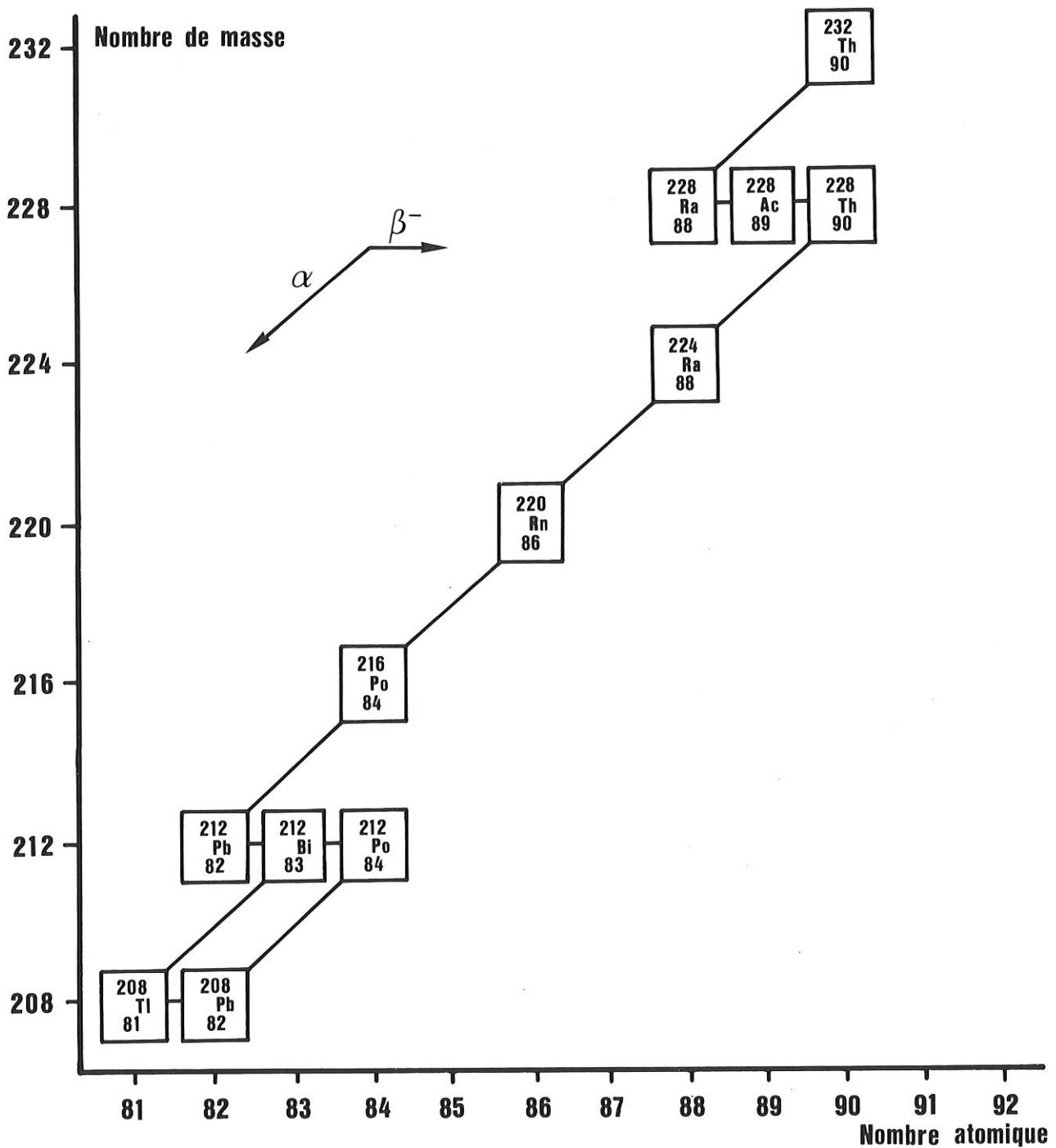


Figure 3 : famille radioactive du ^{232}Th . Cette troisième et dernière famille comprend un isotope du radon (^{220}Rn) encore appelé "thoron". Mais, comme nous l'avons déjà dit, sa courte demi-vie a comme conséquence qu'il représente un danger bien moindre que l'isotope 222 du même radon.

Fiche 4. - LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU RADON

Le radon constitue la source de radioactivité majeure qui intervient dans la dose de rayonnement reçue par l'homme. Il est important de savoir avant tout ce qu'est le radon.

Le radon, dans le tableau des éléments de Mendéléev, appartient à la famille des **gaz nobles** ou **gaz rares**. Ces corps doivent leur nom à leur absence de réactivité chimique. Leur structure atomique est tellement stable qu'ils ne se combinent à aucun autre corps (comme, par exemple, l'hydrogène se combine à l'oxygène pour former de l'eau). Le radon est l'un d'eux. Non seulement il ne se combine donc chimiquement à aucun autre corps mais de plus il est extrêmement mobile. Il peut par exemple traverser une feuille de plastique ou une paroi de béton (plus ou moins facilement bien-sûr suivant la matière considérée). Lors des expériences de laboratoire, pour être certains qu'il ne s'échappe pas du tout du récipient dans lequel il est confiné, nous devons utiliser exclusivement des flacons de verre bouchés à l'émeri.

Le radon est un gaz dans les conditions ambiantes de pression et de température. Il est ainsi mélangé à d'autres gaz, surtout l'atmosphère, à de très faibles concentrations. Si nous remplacions l'air d'une bouteille par une quantité équivalente de radon, la radioactivité de cette bouteille serait dantesque!, identique à celle de 20.000 tonnes de minerais d'uranium! Le fait d'être en faibles concentrations dans d'autres gaz implique que le radon se déplacera avec un "porteur", en l'occurrence les divers gaz de l'atmosphère. Dans le sol, au dessus de la nappe d'eau souterraine, il en sera de même. Des courants d'air souterrains transportent le radon dans les interstices et les fractures du sol et des roches.

Le radon est très soluble dans l'eau ainsi que d'autres liquides, notamment organiques comme nous le verrons dans le chapitre réservé à la détection et à la mesure du radon. Une conséquence importante est de voir le radon, émis au niveau d'une anomalie en uranium située dans une nappe d'eau souterraine, transporté par cette eau souterraine. Or, nous savons qu'un des aspects du problème radon est sa dispersion à partir de ses sources.

Fiche 5. - LES UNITES DE RADIOACTIVITE

L'intensité de radioactivité se mesure en **Curie** ou en **Becquerel**. Un curie (Ci) équivaut à la radioactivité de 1 gramme de radium en équilibre avec ses descendants. Cela correspond à 37 milliards de désintégrations par seconde. C'est une très forte intensité radioactive (une source de 1 curie d'activité est très dangereuse). Adaptée à ces fortes radioactivité, le curie est d'utilisation malaisée pour des radioactivités plus courantes. On utilise alors le picocurie (pCi) qui vaut 10^{-12} Ci.

Le becquerel (Bq) est défini comme correspondant à une désintégration par seconde. Bien-sûr, il faut rapporter ces unités d'activité à un certain volume de gaz. On parlera de pCi par litre par exemple, ou de Bq/m³, cette dernière unité étant celle retenue pour exprimer la radioactivité due au radon dans une habitation. On calculera facilement que $1\text{pCi/l} = 37\text{ Bq/m}^3$.

Une autre catégorie d'unités se rapporte à la dose absorbée et non plus à la dose émise. L'unité est le **gray** (Gy). Il est égal à 1 joule par kilogramme d'organe exposé. Il est aussi égal à 100 **rads** qui est l'ancienne unité.

Enfin, l'effet d'un rayonnement ou d'une particule radioactive sur le corps ne sera pas le même suivant le type de rayonnement ou de particule reçus. Les mêmes doses issues de rayonnements divers peuvent entraîner des effets biologiques très différents. En radioprotection, on a donc du introduire un coefficient de qualité pour travailler sur la notion de dose biologiquement active. L'unité est le **sievert** (Sv) qui est égal à 1 joule par kilogramme mais exprimé pour l'équivalent biologique de dose. Il est aussi égal à 100 **rem** qui est une ancienne unité.

Pour esquisser une échelle de comparaison, disons qu'une personne vivant toute la journée dans un environnement dont la radioactivité totale est de 100 Bq/m³ reçoit approximativement une dose biologiquement équivalente de 5 milli-Sv. Pour le radon, on considère généralement que la dose admissible est de 7 600 Bq/m³/jour, ce qui correspond à une occupation de 19 h/jour dans une maison dont le taux de concentration est de 400 Bq/m³.

Fiche 6. - LA MESURE DES RADIOELEMENTS NATURELS

L'analyse chimique quantitative est la science qui permet de mesurer la concentration des substances chimiques dans un milieu : roche, eau, matériau de construction, etc. Comme son nom l'indique, l'analyse chimique utilise toutes les méthodes de la chimie. Pour mesurer les éléments radioactifs, il est plus aisé d'utiliser leur radioactivité pour en mesurer la concentration. En effet, plus un élément radioactif est concentré dans un milieu, plus la radioactivité émise sera intense. Mesurer cette intensité radioactive revient à mesurer la concentration de l'élément radioactif, après un étalonnage préalable.

La radioactivité la plus simple à mesurer est la radioactivité gamma. Des capteurs transforment cette radioactivité gamma en impulsions électriques facilement mesurables. En pratique, on broie quelques dizaines de grammes de roche dont on analyse la radioactivité gamma en séparant les divers rayons gamma qui sont émis par tous les éléments de la roche et en calculant l'intensité. C'est la **spectrométrie gamma**.

Une des conséquences de cette méthode est que l'on est obligé d'analyser tous les radioéléments présents dans la nature. Ils sont au nombre de trois : le potassium dont l'isotope 40 est radioactif, l'uranium et le thorium. Il faut encore compter les descendants des familles de l'uranium et du thorium qui, nous l'avons vu, sont liés les uns aux autres. Généralement, il suffit de mesurer l'un ou l'autre des descendants pour mesurer la concentration du père de la famille (à nouveau après un étalonnage préalable).

La spectrométrie gamma peut se pratiquer au laboratoire ou sur le terrain avec un appareillage portatif. La prospection de l'uranium en Belgique s'est notamment faite par spectrométrie gamma à l'aide d'un appareillage autoporté sur un véhicule tout terrain. Elle peut aussi se faire dans des trous de forage.

Quant à la mesure du radon, nous avons vu dans la première partie qu'elle passe soit par la radioactivité du radon et de ses descendants (spectrométrie gamma pour doser des éléments comme le bismuth-214 descendant du radon par exemple, spectrométrie ou comptage alpha pour des émetteurs alpha tel que le radon lui-même), soit par les dégâts provoqués dans la matière de films plastiques par le passage des particules alpha.

Fiche 7 - LE DEPLACEMENT DU RADON

LE TAUX D'EMANATION

Le radon, pour être dangereux à l'homme, doit s'échapper du milieu dans lequel il est produit. Or, il est créé dans les roches qui contiennent de l'uranium. S'il ne peut s'échapper de ces roches, il ne gagne pas l'atmosphère en surface et, a fortiori, ne peut pénétrer dans nos maisons. La quantité de radon qui s'échappe d'une roche par rapport à la quantité totale de radon produit dans cette roche est le **taux d'émanation**.

Ce taux d'émanation dépend des caractéristiques mécaniques de la roche qui renferme l'uranium. Imaginons des atomes de radium situés au sein des grains d'une roche. Lorsqu'un atome de radium se désintègre, il expulse une particule alpha. La situation est analogue à un fusil qui tire une balle: il y a un recul. Dans le cas du radium, la particule alpha expulsée imprime un recul au noyau de radon résiduel. Cet effet peut "faire sortir" l'atome de radon du grain de la roche. D'autre part, depuis la tête de famille, l'U-238, 6 désintégrations ont eu lieu. Les émissions alpha ont causé des dommages au milieu environnant l'atome d'uranium. Tout ceci a pour effet d'augmenter la porosité du milieu.

Plus la roche est compacte, moins le radon s'en échappe. Cette compacité résulte de la nature minéralogique de la roche, de sa texture plus ou moins compacte, de sa fracturation (figure ©4).

LE DEPLACEMENT DU RADON SOUS TERRE

D'une manière générale, le déplacement du radon dépend d'abord de la quantité d'uranium présent, ensuite du taux d'émanation. Enfin, le radon arrive dans le milieu interstitiel: dans les pores de la roche et dans les fractures. Là, il faut distinguer deux cas: la zone aérée et la zone noyée (Figure ©5).

La zone aérée se trouve au dessus du niveau d'une nappe d'eau souterraine. Un trou que l'on y creuse ne se remplit pas d'eau spontanément. Le radon émis dans cette zone se déplace avec les courants d'air souterrain ou se dissout dans l'eau d'infiltration. Dans ce dernier cas, soit il s'en échappe, soit il gagne avec cette eau la nappe d'eau. Dans le premier cas, le déplacement du radon dépend donc des différences de pression et de température, donc essentiellement des variables climatiques. Dans le second cas, c'est la quantité d'eau d'infiltration qui joue le rôle principal. C'est aussi fonction d'une variable climatique: la pluviosité.

La zone noyée comprend l'ensemble des terrains situés sous la surface d'équilibre des eaux souterraines (la **surface piézométrique**). Nous avons vu que le radon est soluble dans l'eau. Il s'y dissout donc et, ici encore, deux cas se présentent.

Si l'eau souterraine se déplace lentement, le radon diffusera dans la nappe. On peut dire que le mouvement d'ensemble des atomes de radon est plus rapide que le mouvement de l'eau souterraine. Dans ce cas, le radon est confiné dans des zones relativement proches du lieu d'émission. C'est le cas rencontré dans les nappes d'eau "classiques", dans les sables par exemple. Ces nappes rencontrent une **perméabilité de pores**. L'eau circule dans les interstices situés entre les grains.

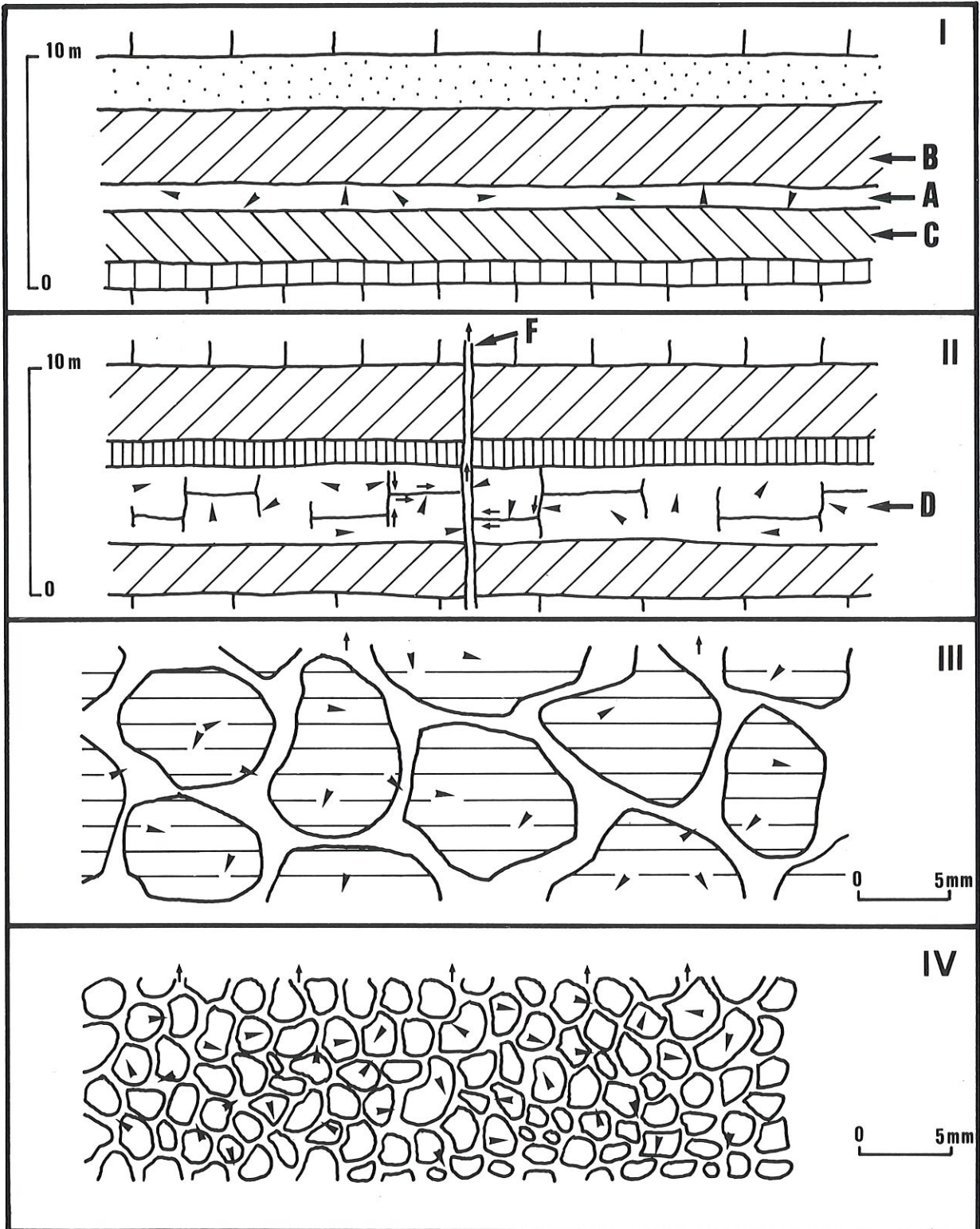
Si l'eau souterraine se déplace rapidement, le radon est emporté par elle car cette vitesse est plus grande que la vitesse du mouvement d'ensemble des atomes de radon dans l'eau. A ce moment, le radon peut faire de grands trajets sous terre qui l'emportent loin des sources. C'est le cas des **aquifères karstiques**, c'est-à-dire des massifs calcaires karstifiés, qui présentent des cavités (grottes et gouffres) dans lesquelles l'eau circule rapidement (plusieurs mètres à l'heure). Mais ce type de circulation rapide peut se rencontrer dans d'autres roches comme les grès.

LE DEPLACEMENT DU RADON AU NIVEAU DU SOL.

Le moment où le radon devient dangereux est celui où il affleure, où il quitte le sous-sol. Si cette émanation se fait à l'air libre, les conséquences sont nulles pour l'homme, vu la dilution immédiate du gaz radioactif dans l'atmosphère. Par contre, si l'émanation se fait dans une cave par exemple, l'effet est tout autre! C'est le cas qui doit soigneusement être étudié pour lutter contre cet effet pernicieux. Nous verrons cela plus loin.

Le radon dissous dans l'eau s'en libère soit sous terre au travers de la surface piézométrique, soit aux sources ou aux points de captage. La première possibilité aboutit aux mêmes effets que le radon qui est directement libéré dans la zone aérée. La seconde possibilité a une influence aux captages de l'eau destinée à l'utilisation domestique.

*Figure 04 : émanation du radon. La figure I schématise une coupe géologique de principe dans laquelle la couche A est riche en uranium et dégage donc du radon. Néanmoins, les couches B et C imperméables empêche le radon de se déplacer loin de ses sources. Le taux d'émanation de cet ensemble est donc faible. Par contre, dans la figure II, une importante fracture F constitue un drain qui canalise le radon (petites flèches noires). De plus, la strate contenant l'uranium (D) est ici fissurée. Ces petites fissures constituent autant de voies de déplacement du radon dont une partie arrive ainsi dans la fracture principale F. Ici, à cause de la perméabilité de fractures, le taux d'émanation est fort. Les habitations situées aux environs du débouché de la fracture à la surface ou sous le sol superficiel sont situées sur une **zone à risques**. Sur la figure II au contraire, l'uranium se trouve dans une couche D dont la roche est fracturée et qui, de plus, est traversée par une grosse fracture ouverte. Le radon est drainé dans la couche par les petites fissures et est ensuite canalisé par la grande fracture vers le haut. . La figure III nous fait changer d'échelle : nous voyons des grains d'un sable de quelques 5 mm de diamètre en moyenne. Les atomes de radium présents dans ces grains donne naissance à du radon qui a une forte probabilité de rester confiné dans les grains que d'y sortir, vula taille de ces grains. Au contraire, sur la figure IV, les grains sont plus petits et plus de radon s'en échappe. Nous voyons ici l'influence de la structure intime des roches sur le taux d'émanation du radon.*



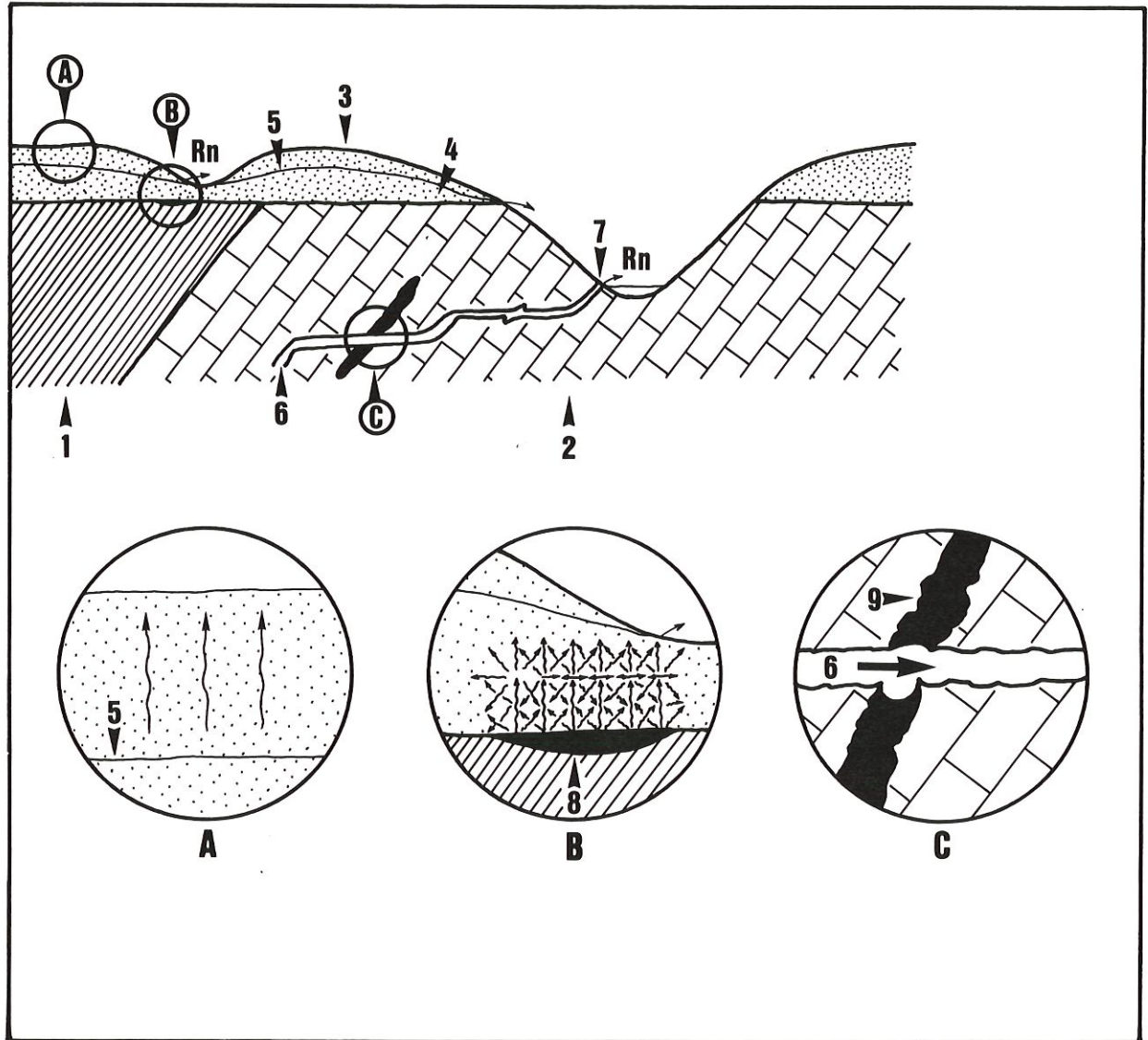


Figure 5 : Déplacement du radon sous terre. Nous avons représenté une coupe géologique de principe avec un socle de roches schisteuses (1) et calcaires (2) recouvert par des sables (3). Ces sables renferment une nappe phréatique perchée au dessus du socle (4) limitée vers le haut par une surface piézométrique (5). Les calcaires du socle sont karstifiés: un réseau aquifère de conduits (6) les traverse, débouchant sur une émergence (7). Dans le sable (situation A), le radon se dégage vers le haut dans la zone dénoyée. En B, une accumulation d'uranium (8) émet de grandes quantités de radon dans la zone noyée supérieure. Là, le radon diffuse dans l'eau souterraine et une partie se retrouve à la source. Si cette source était éloignée, elle ne serait pas contaminée car cette eau interstitielles se déplace lentement : le radon ne peut donc s'étendre très loin de sa source. Par contre, en C, un remplissage uranifère situé dans une cavité karstique (9) libère son radon dans l'eau qui, elle, circule rapidement dans le réseau de galeries. A cause de cela, le radon contamine l'émergence des eaux souterraines, même si celle-ci se situe loin des couches uranifères.

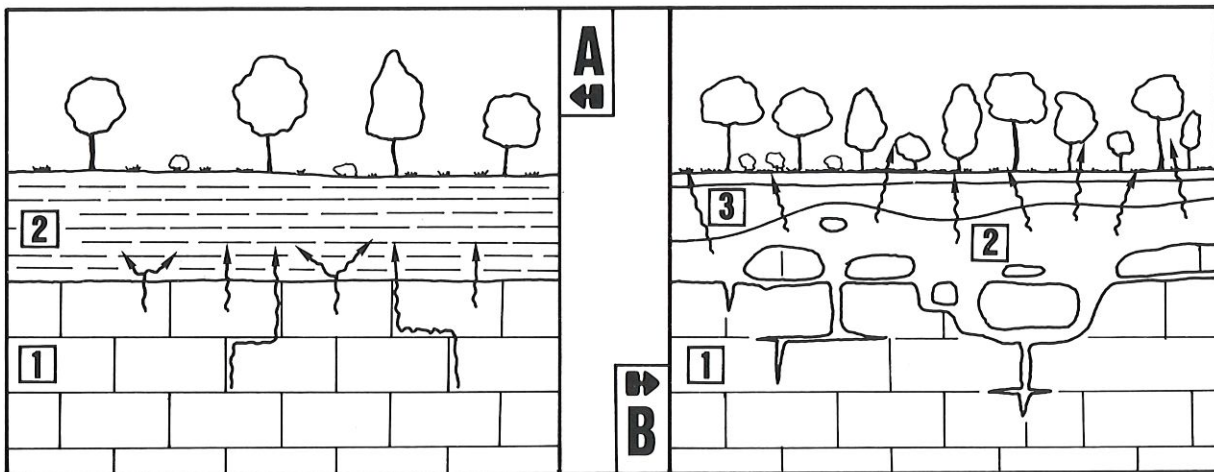


Figure 6 : *Rôle de la couverture géologique.* Un socle de roches dures (calcaire, schiste,...) est fréquemment recouvert d'une couche de roches généralement meubles de nature différente. Deux cas se présentent. Dans le premier (A), le socle de roche dure (1) est recouvert par une formation géologique étrangère (2), dans ce cas un loess, c'est-à-dire une couche de limons apportés par le vent lors des périodes glaciaires. Dans ce cas, cette couverture, pauvre en uranium et imperméable, joue le rôle de couvercle et empêche à la plus grande partie du radon généré par les roches sous-jacentes d'arriver en surface.

Dans le second cas (B), la roche du socle (1) est attaquée chimiquement par la végétation, la vie microbienne, le dioxyde de carbone, l'eau. Cette transformation qui dépend surtout du climat est appelée **pédogénèse** et "fabrique" un **sol**. Dans le cas figuré ici, le sol se compose d'une couche inférieure dans laquelle s'accumulent différents éléments chimiques dont, éventuellement, l'uranium et une couche supérieure (3) qui est surtout lessivée. Ce type de couverture a un rôle tout-à-fait différent de celle représentée en A. Elle peut s'enrichir en uranium enlevé à la roche dure sous-jacente en cours d'altération. Le sol peut aussi être beaucoup moins imperméable. De la sorte, le radon peut plus aisément arriver en surface en plus grande quantité.

Fiche 8 - L'uranium dans les roches belges

LA LOCALISATION DE L'URANIUM.

Les facteurs qui gouvernent la concentration du radon sont avant tout **d'ordre géologique**. C'est de la source dont nous devons d'abord nous enquérir, c'est-à-dire de la concentration en radium et donc en uranium dans le milieu naturel. L'uranium, à l'encontre du radon, est un métal chimiquement très réactif.

Il forme de nombreux composés chimiques dans la nature et se trouve ainsi dans quasiment toutes les roches. Dans les calcaires, il se combine avec les carbonates. Dans les roches argileuses (argiles, schistes, phyllades), il se fixe sur les minéraux argileux et les matières organiques. Dans les roches gréseuses (sables, grès, quartzites), non seulement il va de pair avec la fraction argileuse quand elle existe mais encore il se localise aussi dans des minéraux lourds comme les zircons. On le trouve aussi dans les roches magmatiques (granites par exemple) mais ces roches sont très peu présentes sur notre territoire.

Des processus géochimiques provoquent des concentrations d'uranium dans certaines couches rocheuses, dans des fractures, dans des cavités. C'est de cette manière que se forment les **gisements d'uranium**. Il n'y a pas de vrais gisements d'uranium en Belgique mais il existe de nombreuses **concentrations anormales**.

Enfin, il faut souligner le rôle des **couvertures géologiques**. Souvent, les roches du sous-sol sont recouvertes par des formations différentes. Ces **formations de couverture** sont de deux types (figure ⑥). Le premier comprend les couvertures de nature totalement différente de celle du substratum. Par exemple, durant les périodes glaciaires, le vent a déposé des poussières sur plusieurs mètres d'épaisseur.

Ce sont les **loess** ou **limons éoliens**. Ils sont d'ailleurs très importants dans notre économie car ce sont eux qui constituent les sols les plus fertiles (en Hesbaye par exemple). Pauvres en uranium et peu perméables, ces loess génèrent peu de radon et constituent ainsi une espèce de **couvercle** empêchant le radon provenant des roches sous-jacentes de parvenir en surface. Le second type de couverture concerne la transformation des roches du sous-sol sous l'influence des facteurs climatiques et de la vie (végétation, vie microbienne, animaux fouisseurs,...).

Les roches se transforment chimiquement: c'est **l'altération**. Les sols cultivés, forestiers se forment de cette manière. La roche saine se retrouve enfouie à des profondeurs variables suivant la durée et l'intensité de l'altération. A l'encontre de ce qui se passe pour les couvertures du premier type, l'uranium peut ici se concentrer dans ces sols d'altération. Ils constituent alors des sources potentielles de radon plus fortes que celles qui existent dans la roche saine.

CONCENTRATION EN URANIUM DANS LES ROCHES BELGES.

Nous vous présentons ces données sous forme de graphiques (Figure ⑦). Les roches sont regroupées suivant leur distribution dans les grandes régions naturelles belges. A partir de ces données, s'esquissent les grands traits de la distribution de l'uranium au travers des régions géologiques de notre pays.

La Basse Belgique est essentiellement le domaine des sables, des argiles et des limons. La concentration en uranium est faible dans les sables, moyenne dans les argiles. Ces faibles teneurs alliées au caractère imperméable des argiles font de cette région une région à risques radon faibles.

La Moyenne Belgique est une région de transition entre la Basse Belgique et la Haute Belgique. Le socle de roches dures que l'on trouve en Ardenne est présent mais souvent recouvert par des formations de couverture. Le Brabant, la Hesbaye, le Bassin de Mons donnent une image de plateaux faiblement ondulés dont la surface est sculptée dans des formations de couverture analogues à celles que l'on trouve en Basse Belgique: limons, sables et argiles. Les risques y sont faibles. Là où les rivières sont assez profondément incisées, le socle peut être atteint au fond des vallées. Les risques radon y sont plus élevés: concentrations plus fortes en uranium, fracturation. Les roches de l'Ere Secondaire (le Mésozoïque) sont présentes dans le Bassin de Mons et en Hesbaye. Il existe autour de Mons des craies phosphatées qui contiennent de l'uranium en quantités élevées: le risque est potentiellement élevé.

Enfin, c'est surtout dans les roches ardennaises que les concentrations en uranium sont les plus grandes.

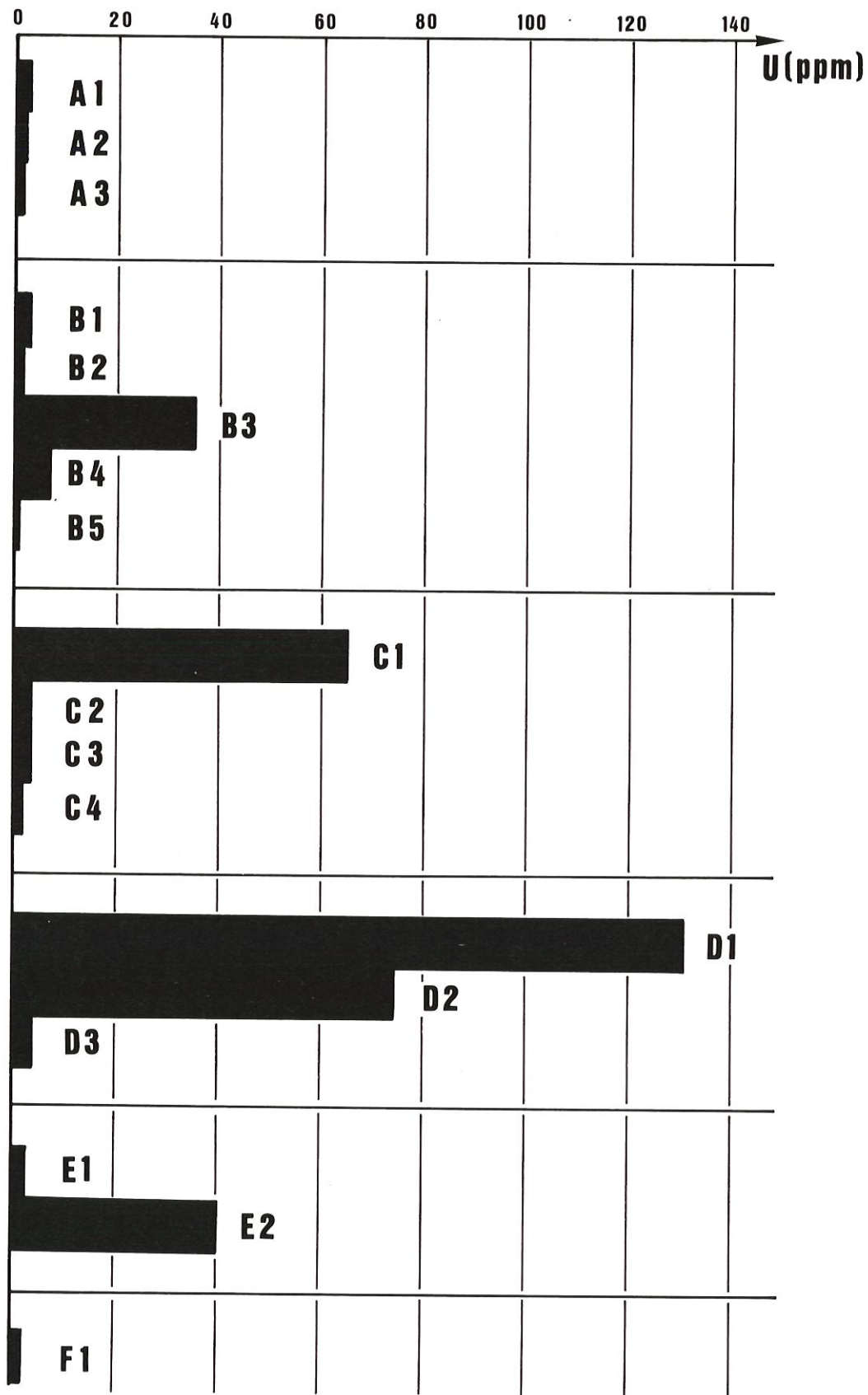


Figure 7 : *Distribution de l'uranium dans quelques roches belges. L'abscisse supérieure donne les concentrations en uranium exprimées en parties par millions (ppm).*

Le cadre **A** groupe les **sables et argiles des Flandres et de Campine** (A1 : argile rupélienne, A2 : argile yprésienne, A3 : sable argileux landénien. Ces termes "landénien", yprésien", etc. désignent des formations caractéristiques, des types de roches ayant une valeur d'âge. Par exemple, ces trois termes : rupélien, yprésien, landénien, se rapporte au début de l'Ere Tertiaire).

Le cadre **B** se rapporte au **sous-sol de la région de Mons** (B1 : limons, B2 : sable, B3 : craie phosphatée de Ciplly-Baudour, B4 : craie de Spiennes, B5 : craie de Nouvelles). La craie phosphatée se distingue par ses fortes valeurs en uranium; elle peut être source de contamination radon.

Le cadre **C** rassemble quelques **formations du Condroz et de Famenne** (C1 : couches calcaires et schisteuses séparant les roches du Dinantien des roches du Namurien, C2 : calcaire de Dinant, C3 : Grès et schistes de Famenne, C4 : calcaire dévonien). Nous avons mis en exergue ces couches de transition Dinantien-Namurien qui sont riches en uranium et provoquent des contaminations radon dans des localités telles que Bioul, Assesse, Anhaye, etc...

Le cadre **D** concerne la **Haute-Ardenne** (D1 : Grès fracturés avec minéraux d'uranium, D2 : schistes et grès de Chiny, D3 : schistes). Nous avons comparés ici deux types de roches anormales en uranium des schistes "normaux".

Le cadre **E** est une partie de l'Ardenne : **la région de Stavelot** (E1 : schistes "normaux", E2 : schistes anormaux du pourtour du massif de Stavelot). Le massif de Stavelot présente sur son pourtour des schistes anormaux en uranium. Ce sont eux qui provoquent des concentrations plus élevées en radon dans des localités comme Vielsalm.

Le cadre **F**, enfin, se rapporte à la **Gaume** (grès calcaireux, calcaire schisteux). Les concentrations en uranium sont très faibles. Mettons en exergue le fait que quelques localités présentent quand même des teneurs en radon un peu plus fortes. L'explication de cette observation demande des études précises mais souligne que la relation entre teneurs élevées en radon dans les habitations et teneurs en uranium des roches n'est pas simple.

Fiche 9 - LE RADON ET LA STRUCTURE GEOLOGIQUE DU SOUS-SOL

La Haute Belgique, pays de roches anciennes, fracturées, parfois riches en uranium, est la zone présentant le plus de risques. Aussi, examinons quelques cas typiques au travers de coupes géologiques.

LE CONDROZ (Figure ☺8)

Le Condroz est constitué d'une série de dépressions creusées dans les calcaires carbonifères et de crêtes sculptées dans des roches gréseuses plus résistantes du Famennien. Géologiquement, il s'agit d'une suite de synclinaux (plis en forme de fond de bateau) calcaires et d'anticlinaux (plis en forme de dôme) gréseux. Dans certains cas, les synclinaux renferment en leur coeur les formations du carbonifère supérieur avec des schistes et des grès. Ces formations sont importantes car les couches de passage entr'elles et les calcaires montrent des concentrations anormales en uranium (Florennes, Bioul, Assesse, Ocquier). Enfin, les calcaires sont parcourus de réseaux souterrains (grottes, rivières souterraines). Cette forte perméabilité due à tous ces conduits et les circulations d'eau qui s'y passent permettent le déplacement du radon.

LA FAMENNE (Figure ☺9)

La Famenne est la grande dépression schisteuse qui sépare le Condroz au nord des contreforts de l'Ardenne au sud. L'érosion des schistes donne des argiles qui couvrent de vastes étendues. Ces argiles sont imperméables et empêchent l'émanation radon. Au sud de la dépression, la bande calcaire givéto-frasnienne est fortement creusée de grottes (Han, Rochefort, etc...). Bien que ces calcaires soient très pauvres en uranium, ces conduits souterrains peuvent éventuellement jouer le rôle de drains pour le radon.

LE HAUT PLATEAU ARDENNAIS (Figure ☺10)

Ces hauts plateaux dont l'altitude dépasse 400 m et qui s'allongent de la Croix Scaille à l'ouest jusqu'aux hautes Fagnes à l'est correspondent aux roches dures du socle primaire: phyllades et schistes, grès et quartzites sont potentiellement riches en uranium. De plus, plusieurs concentrations anomaliques locales et régionales ont été découvertes. Enfin, ces roches dures sont très fracturées. Il faut ainsi noter qu'il y a une très nette différence entre les schistes de la Famenne qui sont tendres et dont les fissures sont colmatées par l'argile résultant de la désagrégation de ces schistes et les phyllades de l'Ardenne, roche également schisteuse mais à la minéralogie différente, plus dure et fracturée. Si les premières n'offrent que peu de voie au déplacement du radon, il n'en est pas de même pour les secondes qui sont infiniment plus favorables à la migration du radon.

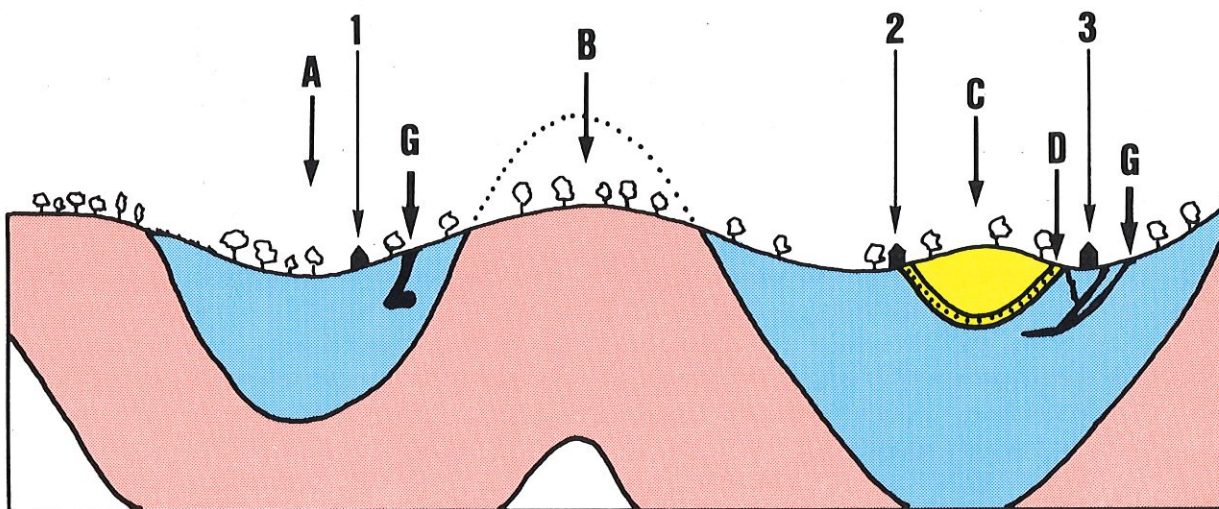


Figure 08 : Coupe géologique de principe au travers du Condroz. Le Condroz est une suite de plis anticlinaux (en forme de dôme) et de plis synclinaux (en forme de fond de bateau) orientés WSW-ENE. Les anticlinaux font affleurer les roches plus vieilles de cette région : des grés du Famennien (en orange, B) tandis que les synclinaux ont gardé en leur sein les calcaires du Dinantien (en bleu, A) et, dans certains synclinaux comme celui de Florenne par exemple les roches gréseuses et schisteuses du Namurien (en gris, C). Comme les grés du Famennien sont plus résistants à l'érosion que les calcaires, les crêtes anticlinales sont en relief par rapport aux dépressions des synclinaux calcaires. Cela amène sur ces derniers les ruisseaux qui se perdent sous terre en y formant des réseaux karstiques (G). Enfin, il faut noter une couche de roches de passage (D) entre les calcaires dinantiens et les roches namuriennes qui contiennent des anomalies en uranium. Dans ce contexte, une maison (1) située sur des calcaires non karstifiés n'est pas potentiellement à risque radon. Par contre, la maison (2) l'est car elle est située sur des roches contenant de l'uranium, la maison (3) également car le calcaire de son sous-sol est creusé de grottes qui accumulent le radon et provoquent son déplacement sur de grandes distances.

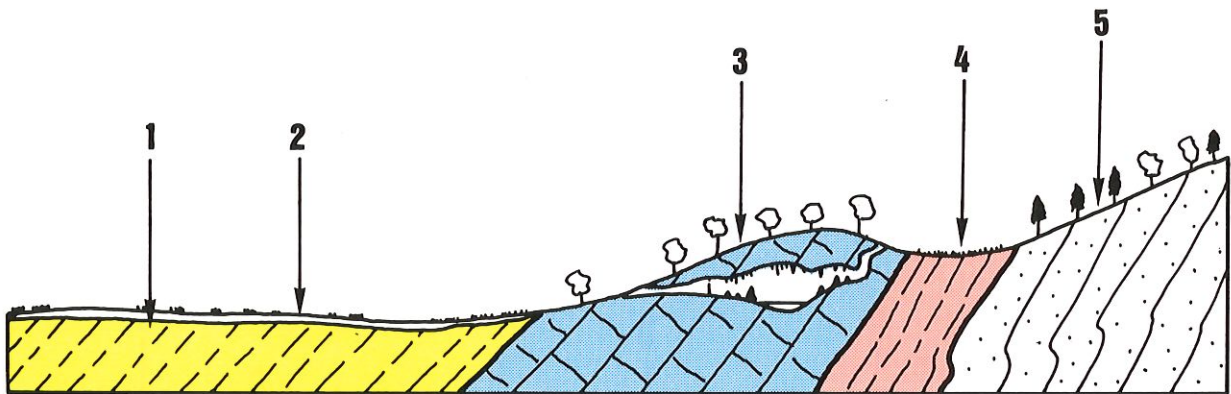


Figure 9 : Coupe géologique de principe au travers de la Famenne. La dépression de Fagne-Famenne est établie sur des schistes (1) du Dévonien moyen fort sensibles à l'érosion. Ils sont suivis vers le sud d'une bande calcaire (3) également du Dévonien moyen (essentiellement Givetien et Frasnien) creusée de grandes grottes (Han, Rochefort, Hotton). Une couche schisteuse intermédiaire (4) s'appuie sur les grès et phyllades ardennaises du Dévonien inférieur (5), restées en relief. Cette région est assez peu à risques radon d'après sa géologie. Les schistes (1) sont recouvert d'une couche d'argile imperméable (2) assez bien étanche au radon. Les calcaires sont pauvres en uranium; on ne doit y craindre que les zones creusées de grottes pour les mêmes raisons que celles exposées à la figure 9. Quant à l'Ardenne, nous allons y venir avec la figure 10.

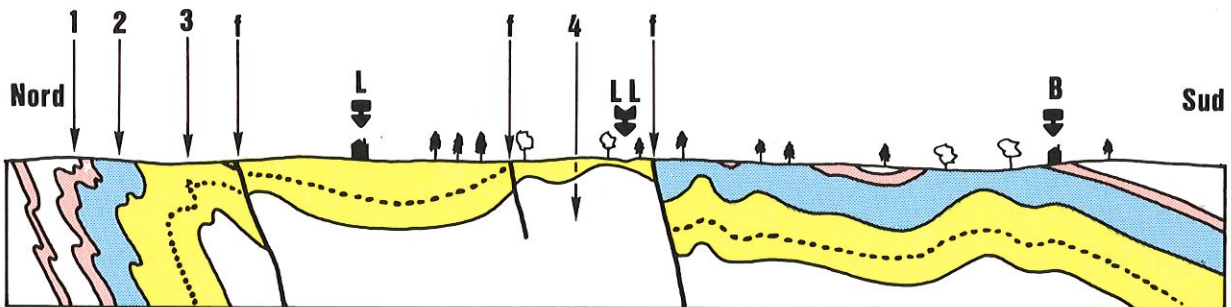


Figure 10 : Coupe géologique de principe au travers de l'Ardenne. l'Ardenne est façonnée dans des roches résistantes, gréseuses et schisteuses du Dévonien inférieur. Ces roches sont plissées et lacérées de grandes failles. On trouve du nord au sud en (1) des schistes et grès contenant parfois de l'uranium (anomalie de Chiny-la Vierre) avec des niveaux d'ardoises (en mauve), en (2) des schistes et grès verts, en (3) des schistes et grès parfois à gros grains, en (4) des schistes gréseux noirs et des grès dont certains niveaux renferment des fractures enrichies en uranium (anomalies de Oizy-Monceau). Les plis et failles (f) bouleversent la géométrie des différentes couches rocheuses. Il faut de plus noter qu'un même niveau peut présenter des variations rapides de la nature des roches. L : village de Libin, B : village de Bertrix, LL : la Lesse.

Fiche 10 - EXEMPLES D'ETUDES DE LOCALITES

LA REGION DE MONCEAU-EN-ARDENNE: UN EXEMPLE DE METHODOLOGIE.

La prospection de l'uranium en Moyenne et Haute Belgique, déjà évoquée dans la première partie, a conduit à reconnaître par mesure directe un certain nombre de zones où les concentrations d'uranium sont anormales. La région de Monceau-en-Ardenne est l'une d'elles. On voit sur la figure 14 (extrait de la cartographie de l'uranium par prospection autoportée) que la région de Monceau, Oizy, Baillamont se caractérise par des teneurs en uranium supérieures à 6 ppm.

Cette première étape franchie, que l'on qualifié de **géophysique stratégique**, des précisions sont obtenues par reconnaissance pédestre avec un détecteur portatif. Ce détecteur, tout comme celui installé sur la voiture tout-terrain, enregistre les rayons gamma émis essentiellement par les descendants radioactifs du radon (sans oublier les radio-éléments de la famille du thorium et le potassium).

La localisation des couches géologiques (on parle **d'assises**) d'accumulation préférentielle de l'uranium passe ensuite par un autre chemin: celui de la recherche du radon dans les sources. En effet, le géologue se dit que, si l'uranium s'est accumulé dans une assise particulière, il peut libérer une partie de son radon dans les eaux souterraines qui imprègnent cette assise et ressortent aux sources. La figure 11 situe sous forme de tâches rouges les zones regroupant les sources qui présentent des anomalies en radon. Il est remarquable que ces zones se calquent sur une assise bien particulière que l'on appelle **quartzo-phyllades de Braux**. Ce sont des grès fracturés dans lesquels l'eau et le radon peuvent circuler. Cette étape de la recherche peut être appelée **géochimie stratégique**.

La quatrième étape consiste à mesurer les flux de radon dans les sols autour des sources les plus anormales par émanométrie. Rappelons que l'émanométrie mesure de façon instantanée (la mesure dure une minute) le radon extrait du sol par pompage. C'est une **prospection géochimique tactique**. On en tire des cartes de flux de radon en sol qui contribuent à cerner encore mieux les zones anormales.

Après cette quatrième étape, les chemins divergent suivant le but recherché. Le géochimiste investit en détail les zones très anormales dans le but de trouver l'uranium responsable de ces émanations radon. Pour cela, on dose in situ les radioéléments jusqu'à quelques mètres de profondeur en creusant des trous et en y faisant descendre un détecteur relié par un câble à un appareil de mesure. On creuse des tranchées à la pelle mécanique et on peut même envisager d'effectuer des forages. Tout cela a été fait à Monceau. Nous y avons découvert des accumulations d'uranium allant jusqu'à l'expression de minéraux d'uranium trouvés en tranchées.

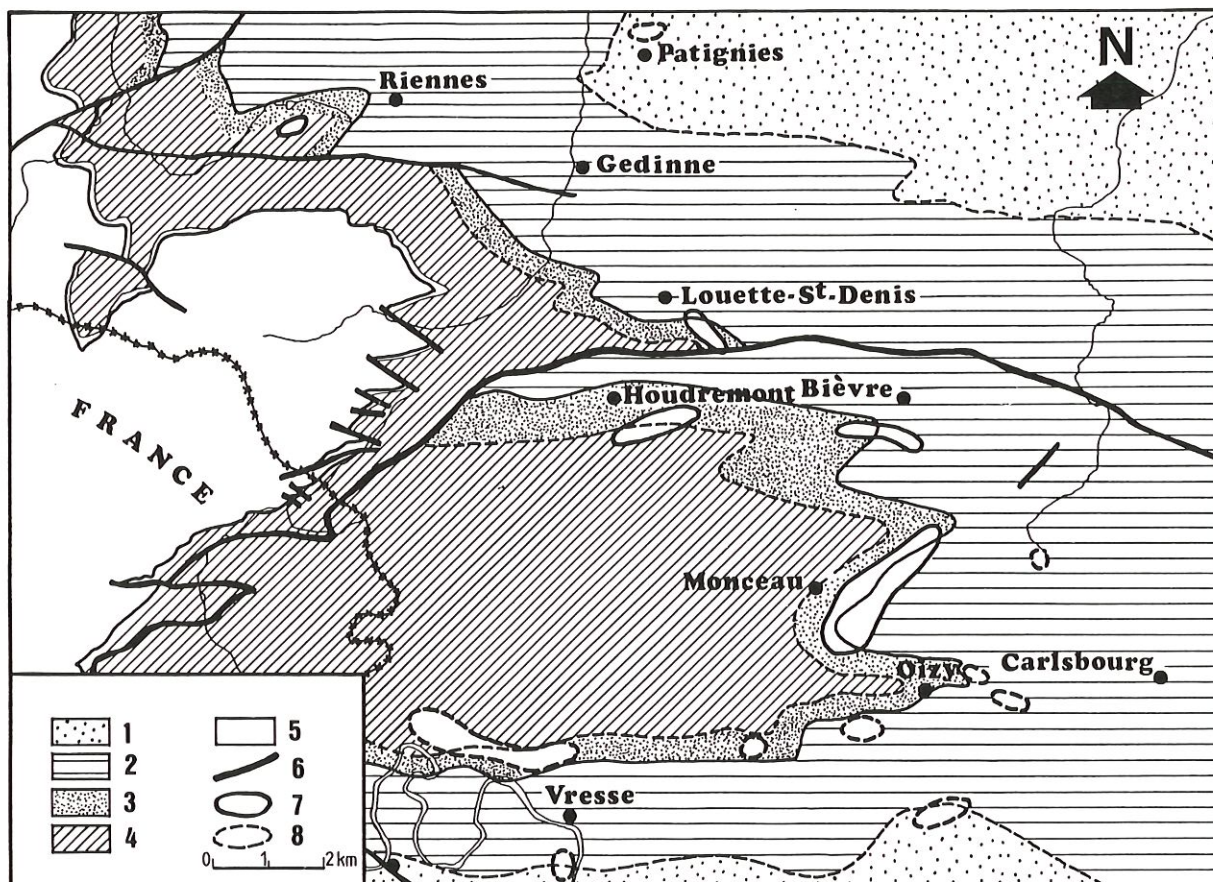


Figure 11 : Distribution des anomalies radon dans les eaux de sources (région de Monceau). 400 sources furent investiguées grâce à une méthode rapide d'analyse mise au point à la Faculté Polytechnique de Mons. Les résultats sont regroupés en surfaces de 2 types : les zones de sources à fortes anomalies (7) et les zones de sources à anomalies secondaires (8). Ces anomalies sont définies par analyse statistique de l'ensemble des résultats. Les zones anormales sont ici calquées sur le contexte géologique : **1 et 2** : schistes, phyllades et grès de Oignies et de Saint-Hubert (Gédinien supérieur ou, dans la nomenclature moderne, Lochkovien supérieur); **3** : Grès de Braux (Gédinien moyen ou Lochkovien inférieur); **4** : Schistes de Levezey (Gédinien inférieur ou Lochkovien inférieur); **5** : Cambrien du massif de Rocroi. On constate qu'à une exception près, les sources à teneurs radon anormales suivent la bande des grès de Braux. C'est ce qu'on appelle en géochimie un "horizon porteur". Ce sont ces grès qui renferment des concentrations en uranium.

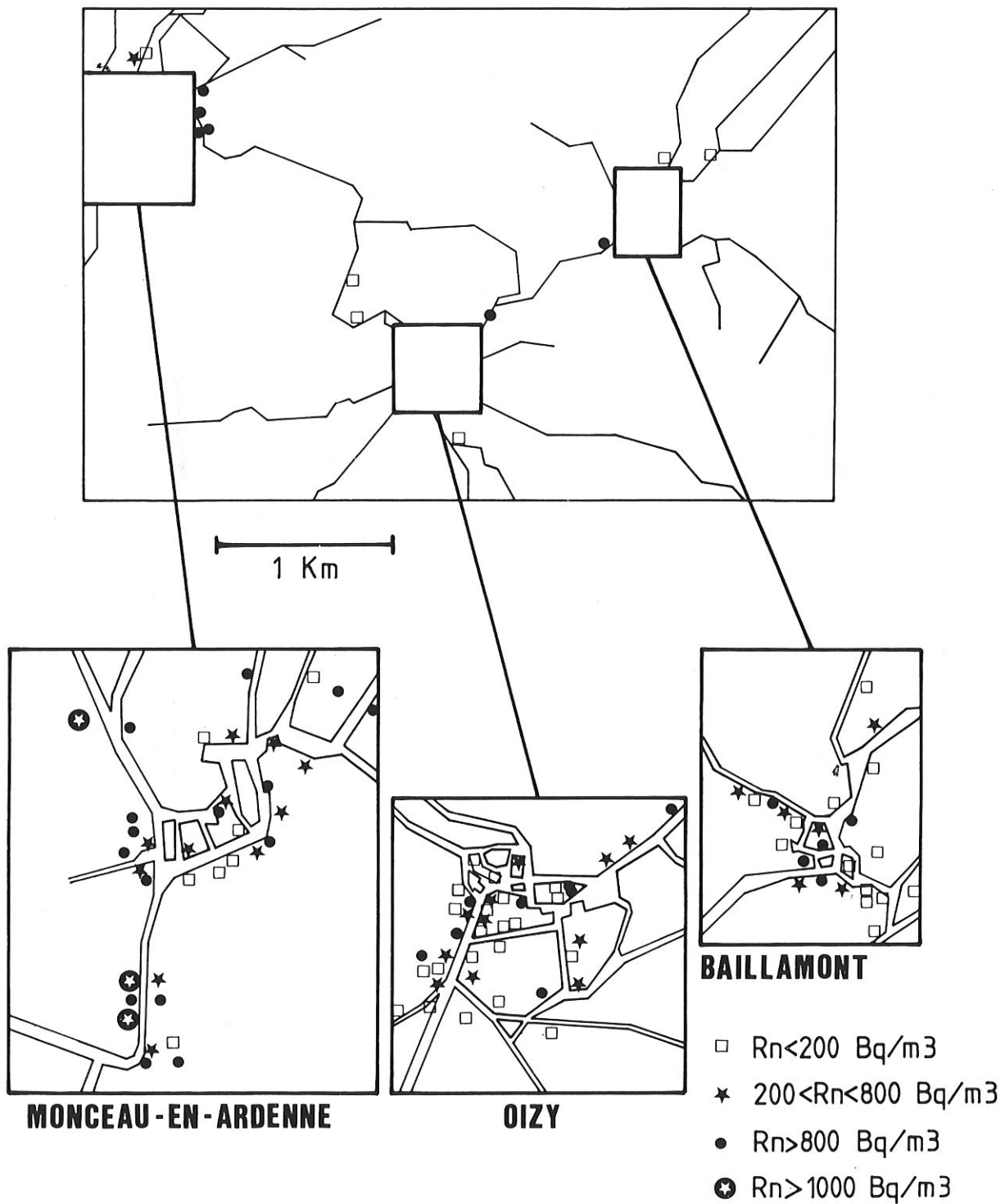


Figure ©I2 : Résultats de l'enquête radon dans les habitations de la région de Monceau-en-Ardenne.

Par contre, le chercheur préoccupé par la pollution des habitations par le radon entame une campagne de mesures du radon dans les maisons en reliant les données ainsi obtenues à la structure géologique afin de mettre en évidence des guides qui permettent dans le futur d'orienter les recherches. La figure 12 donne les résultats d'une première enquête entreprise dans la région par la FPMs en collaboration avec l'Institut d'Hygiène et d'Epidémiologie. Cette enquête a démontré la répercussion de ces anomalies uranifères sur les teneurs en radon des maisons. 80% des habitations ont un taux supérieur à 200 Bq/m³ et 10% de ces maisons ont un taux supérieur à 5 000 Bq/m³. Dans certaines caves, on a mesuré des valeurs de 12 000 à 15 000 Bq/m³, ce qui conduit parfois jusqu'à 1 900 Bq/m³ dans les pièces d'habitation. Indiscutablement, voilà une région habitée à risque radon indiscutable. Rappelons que la teneur limite conseillée en habitation est de 400 Bq/m³.

Cet exemple illustre une démarche de type **centripède**, analogue à celle utilisée par les géochimistes. On part d'une exploration générale pour cibler ensuite sur des zones les plus anormales. La recherche des régions habitées potentiellement à risque radon en partant de l'analyse géologique et géochimique est donc une méthode riche de résultats.

LES ECOLES DU LUXEMBOURG.

Une autre démarche part de préoccupations strictement sanitaires. On se pose la question de savoir si une pollution radon existe dans un type de bâtiments occupés par le public. Dans ce cas, il s'agit des écoles. On comprend évidemment la préoccupation des responsables publics. Bien-sûr, la nature du sous-sol du Luxembourg est la motivation première: c'est une source potentielle de radon. Mais, à l'encontre de l'exemple de Monceau, on ne commence pas par une analyse tactique des caractéristiques géologiques et géochimiques mais on mesure le radon dans toutes les écoles. Les résultats de cette enquête menée sous la responsabilité de la Communauté Française et de la Députation permanente de la Province du Luxembourg sont résumés dans la figure 13. Cette enquête met bien en évidence la différence entre les écoles de l'Ardenne proprement dite et les écoles de la Gaume. Nous savons à présent pourquoi.

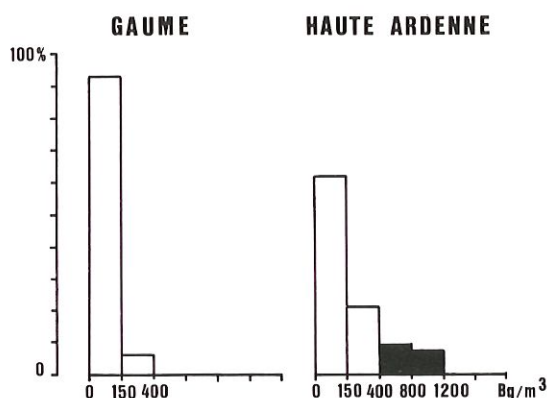


Figure 13 : Répartition statistique des écoles de Gaume et de Haute Ardenne suivant les teneurs radon qui y furent mesurées.

LA REGION DE VISE.

La ville de Visé est une localité à problème radon vu la nature du sous-sol. Nous avons vu que des concentrations d'uranium existent dans d'anciennes grottes colmatées contenant du phosphate riche en uranium. Etant donné le risque, une enquête fut menée dans les maisons. La figure 14 illustre les résultats obtenus, synthèse de l'enquête de l'Institut d'Epidémiologie et d'Hygiène.

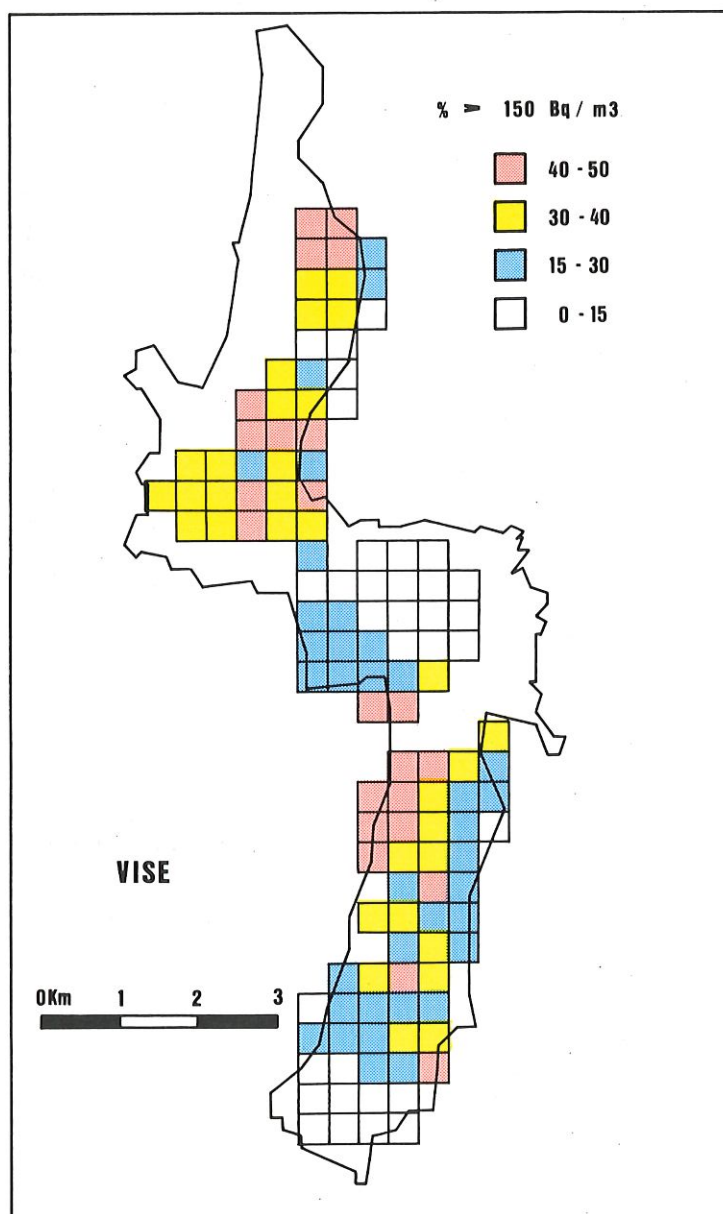


Figure 14 : Visé, répartition des habitations ayant plus de 150 Bq/m³ dans les caves. On définit des carrés regroupant un certain nombre d'habitations. Chaque carré reçoit un figuré qui représente le pourcentage d'habitations comptant plus de 150 Bq/m³ dans les caves.

Quelques adresses utiles

CABINET DU SECRÉTARIAT D'ETAT À L'ENERGIE

rue de l'Industrie 10
1040 BRUXELLES
02/513.61.80

SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE

rue Jenner, 13
1040 BRUXELLES
02/647.64.00

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS SERVICE DE GÉOLOGIE FONDAMENTALE ET APPLIQUÉE

Prof. J-M. CHARLET
rue de Houdain 9
7000 MONS
065/37.46.02

CENTRE D'ETUDES NUCLÉAIRES

Monsieur VANMARCKE
Boeretang 200
2400 MOL
014/33.21.11

INSTITUT DES RADIOÉLÉMENTS

6220 FLEURUS
071/82.92.11

INSTITUT SUPÉRIEUR INDUSTRIEL DE BRUXELLES

Monsieur TONDEUR
rue Royale 150
1000 BRUXELLES
02/217.45.40

RIJKSUNIVERSITEIT GENT

Prof. POFFYN
Proeftuinstraat 48
9000 GENT
091/23.38.21

DIRECTION DES CENTRES DE SANTÉ DE LA PROVINCE DE LUXEMBOURG

CENTRE RADON

Chaussée d'Houffalize, 1 bis
6650 BASTOGNE
061/21.36.71

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC)

Rue d'Arlon, 53 Bte 10
1040 BRUXELLES
02/230.62.82

SERVICE DE PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS IONISANTES

Cité Administrative de l'Etat
Quartier Vésale 2/3
1010 BRUXELLES
02/210.49.66

Réalisation

Cette plaquette a été réalisée à la demande de Monsieur le Secrétaire d'Etat à l'Energie Elie DEWORME par le Service de Géologie fondamentale et appliquée du Professeur CHARLET de la Faculté Polytechnique de Mons.

Nous remercions pour leur collaboration :

- Monsieur le Ministre de la Communauté Française Yvan YLIEFF.
- Le Centre de Santé de la Province de Luxembourg.
- Monsieur le Professeur TONDEUR, I.S.I.B.
- Monsieur le Professeur POFFYN, Rijksuniversiteit Gent.
- Monsieur le Professeur GARSOU, Université de Liège.
- Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (C.S.T.C.).

Coordination: Service Géologique de Belgique
Secrétariat d'Etat à l'Energie

Rédaction: Faculté Polytechnique de Mons,
Service de Géologie fondamentale et appliquée :
Monsieur Yves QUINIF, Monsieur Jean-Marie CHARLET

Dessins: Nicole CROMPS, Flavia VENUTI, Joceline BOSMANS

Impression: Imprimerie du Ministère des Affaires économiques

