

**Le Radon dans l'air, dans l'eau et dans les roches.
Mesure dynamique de son exhalation
et contribution à la caractérisation géologique des matériaux**

Dr Ir H.W. VANDERSCHUEREN



**KONINKLIJK BELGISCH INSTITUUT
VOOR NATUURWETENSCHAPPEN**

**INSTITUT ROYAL DES SCIENCES
NATURELLES DE BELGIQUE**

ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES

**GEOLOGICAL SURVEY OF BELGIUM
PROFESSIONAL PAPER 2011/1
N. 308**

**Le Radon dans l'air, dans l'eau et dans les roches.
Mesure dynamique de son exhalation
et contribution à la caractérisation géologique des matériaux**

Dr Ir H.W. VANDERSCHUEREN

Illustration de couverture: Pouhon Pietkin, Sourbrodt.

Table des matières

1.	Généralités	5
1.1.	Genèse et produits de filiation du radon	5
1.2.	Notions fondamentales de radioactivité	6
1.3.	Localisation du radon - spécificités de l'uranium	7
2.	Métrologie du radon.....	9
2.1.	Mesures « intégrales » ou « moyennes »	9
2.2.	Mesures « dynamiques » ou « en temps réel ».....	10
2.2.1.	Radon dans l'air	10
2.2.2.	Radon dans l'eau.....	12
2.3.	Radon dans les roches (ou solides en général).....	12
2.3.1.	Exhalation surfacique - ou « naturelle » ou « in situ ».....	12
2.3.2.	Exhalation volumique	13
2.3.3.	Loi réelle d'établissement de l'équilibre séculaire en cellule fermée - effet de l'adsorption → 1 ^{ère} thèse de ce mémoire.....	17
3.	Le radon dans l'air	21
3.1.	Variabilité de l'activité sur longue durée	21
3.2.	Variations nycthémérales de l'activité	21
3.2.1.	Mesures à l'intérieur d'une habitation	21
3.2.2.	Mesures « en extérieur »	21
3.2.3.	Mesures en cavité naturelle.....	22
3.3.	Etude particulière : évolution climatique	24
3.4.	Etude de la diffusivité libre du radon : détermination de l'efficacité d'aération d'un local.....	25
3.4.1.	Protocole des essais réalisés.....	25
3.4.2.	Résultats expérimentaux	25
3.4.3.	Interprétation des résultats	26
3.4.4.	Exemples caractéristiques de relevés sur sites particuliers	27
3.5.	Illustration d'efficacité de la ventilation forcée	28
3.6.	Distribution du radon dans l'air calme.....	30
4.	Le radon dans l'eau.....	31
4.1.	Pourquoi du radon dans l'eau des sources?.....	31
4.2.	Le cas particulier des pouhons	31
4.3.	Exemples concrets illustrant le comportement du radon dans l'eau	32
4.3.1.	Différence d'activité selon les conditions d'émergence.....	32
4.3.2.	Evolution de la teneur en radon d'une eau de source conservée en flacon clos.....	32
4.3.3.	Distribution du radon dans l'eau en contact avec l'atmosphère.....	33
4.3.4.	Résultats de mesures systématiques.....	34
4.3.5.	Qu'en est-il de l'eau alimentaire ?	35
5.	Le radon dans les roches et minéraux : loi statistique de distribution sur site	36
5.1.	Introduction.....	36
5.2.	Expression de la loi de distribution → 2 ^{ème} thèse de ce mémoire	36
6.	Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site simple. Application du protocole standard	39
6.1.	Localisation des prélèvements et brève description des sites.....	39
6.1.1.	Granite rose de « La Clarté » (Ar Sklerder) – Bretagne du Nord.....	39
6.1.2.	Phyllade noir de Petit-Thier (Vielsalm)	39
6.1.3.	Schiste noir de Malmédy	39
6.1.4.	Schiste à ampélite d'Engis (carrière Carmeuse)	40
6.1.5.	Argile rouge des termitières de Lubumbashi (Katanga, RDC)	40
6.1.6.	Ancien minerai de fer d'Arlon	40
6.1.7.	Schiste bigarré du Kerry (Irlande).....	40
6.1.8.	Calcaire de la mine de Kipushi (Katanga, RDC)	40
6.2.	Présentation des résultats numériques.....	41
6.2.1.	Granite rose de « La Clarté »	41
6.2.2.	Phyllade noir de Petit-Thier	42
6.2.3.	Schiste noir de Malmédy	42
6.2.4.	Schiste à ampélite d'Engis	42
6.2.5.	Argile rouge de Lubumbashi.....	43
6.2.6.	Minerai de fer de Châtillon (Arlon)	43
6.2.7.	Schiste bigarré d'Irlande	43

6.2.8.	Calcaire de la mine de Kipushi (RDC)	44
6.3.	Présentation isolée du graphe relatif au minerai de fer d'Arlon.....	44
7.	Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site simple. Protocole court	45
7.1.	Localisation des prélèvements du 1 ^{er} groupe et brève description des sites.....	45
7.1.1.	Roches schisto-gréseuses de Kinshasa (RDC) : Carrière Safricas du Mont Ngaliema	45
7.1.2.	Craie phosphatée du Bassin de Mons : Carrière souterraine de la « Malogne » (Cuesmes)	45
7.1.3.	Calcaire de Hony	46
7.1.4.	Calcaire de Lourdes (Hautes-Pyrénées – France)	46
7.2.	Résultats numériques du 1 ^{er} groupe de prélèvements	47
7.2.1.	Roches schisto-gréseuses de Kinshasa (RDC) : Carrière Safricas du Mont Ngaliema	48
7.2.2.	Craie phosphatée du Bassin de Mons : Carrière souterraine de la « Malogne » (Cuesmes)	48
7.2.3.	Calcaire de Hony	48
7.2.4.	Calcaire de Lourdes (Hautes-Pyrénées – France)	49
7.3.	Localisation des prélèvements du 2 ^{ème} groupe et brève description des sites	49
7.3.1.	Granite et arène granitique de la Revellate (Calvi, Corse).....	49
7.3.2.	Granite (et arène granitique) des Cévennes (France)	53
7.3.3.	Schiste des Cévennes	54
7.3.4.	Schiste bigarré emsien de Clervaux (Grand-Duché de Luxembourg).....	55
7.4.	Résultats numériques du 2 ^{ème} groupe de prélèvements	56
7.4.1.	Granite et arène granitique de la Revellate (Calvi, Corse).....	57
7.4.2.	Granite (et arène granitique) des Cévennes (France)	58
7.4.3.	Schiste des Cévennes	58
7.4.4.	Schiste bigarré emsien de Clervaux (Grand-Duché de Luxembourg).....	58
7.5.	Localisation des prélèvements du 3 ^{ème} groupe (Vielsalm et environs) et brève description des sites.....	59
7.5.1.	Schiste et schiste gréseux de Vielsalm (affleurement voisin de l'église).....	59
7.5.2.	Schiste de la tranchée du chemin de fer de Rencheux (passage à niveau).....	59
7.5.3.	Schiste de l'ancienne carrière « montagne en Fosse-Roulette »	59
7.5.4.	Galerie souterraine de Bêche	59
7.5.5.	Schiste mauve de la carrière du « Thier del Preux »	60
7.5.6.	Grès de Cierreux (falaise du chemin de fer)	60
7.5.7.	Quartzite de la carrière de Hourt.....	61
7.6.	Résultats numériques du 3 ^{ème} groupe de prélèvements	61
7.6.1.	Schiste et schiste gréseux de Vielsalm (affleurement voisin de l'église).....	62
7.6.2.	Schiste de la tranchée du chemin de fer de Rencheux (passage à niveau).....	62
7.6.3.	Schiste de l'ancienne carrière « montagne en Fosse-Roulette »	62
7.6.4.	Galerie souterraine de Bêche	63
7.6.5.	Schiste mauve de la carrière du « Thier del Preux »	63
7.6.6.	Grès de Cierreux (falaise du chemin de fer)	64
7.6.7.	Quartzite de la carrière de Hourt.....	64
8.	Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site « pluriel ». Protocole court.....	65
8.1.	Introduction.....	65
8.2.	Phyllade de Bertrix - Carrière souterraine de la « Morépître »	65
9.	Liste des résultats de mesures sur le phyllade de la «Morépître» et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique).....	67
9.1.	Schiste ordovicien du Val de Salm galerie souterraine des «Comtes de Salm» à Salmchateau.....	69
9.2.	Schiste praguien (anciennement « siegenien ») de Houffalize.....	71
9.	Le radon dans les dépôts ferrugineux. Protocole court.....	75
9.1.	Généralités	75
9.2.	Cycle géochimique du fer et des métaux radioactifs.....	76
9.3.	Caractéristiques physicochimiques du dépôt ferrugineux du pouhon d'Arumont	76
9.3.1.	Observation microscopique (MEB)	76
9.3.2.	Spectrométrie gamma	78
9.4.	Résultats des mesures d'exhalation par les dépôts ferrifères	78
9.4.1.	Ensemble des résultats de mesures « internationales »	78
9.4.2.	Distribution statistique des dépôts ferrifères sur le Massif de Stavelot.....	79
10.	Liste des résultats de mesures (moyennes de 3 enregistrements à 4 jours d'intervalle) et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique)	80
ANNEXE A.	Unités de mesure et valeurs de référence caractérisant la radioactivité et ses effets	81
A.1.	Radioactivité	81
A.2.	Effets des rayonnements ionisants	81

ANNEXE B. Nos résultats au crible de la « Loi de (Newcomb-) Benford ».....	82
B.1. Présentation “tendancieuse” (habituelle) de la loi.....	82
B.2. Présentation “naturelle” (physique) de la loi.....	82
B.3. Expression de la loi.....	83
B.4. Application aux données du présent mémoire : vérification de l’adéquation de la loi.....	84
ANNEXE C. Compléments statistiques sur la radioactivité.....	87
C.1. Statistique de l’activité volumique sur longue durée.....	87
C.2. Distribution statistique des écarts entre mesures et “meilleure droite” (“loi de répartition”).....	88
ANNEXE D. Aspects prophylactiques : le radon bénéfique à faible dose ?.....	90
MOTIVATION ET REMERCIEMENTS.....	91
Références et bibliographie.....	92

LE RADON DANS L'AIR, DANS L'EAU ET DANS LES ROCHES. MESURE DYNAMIQUE DE SON EXHALATION ET CONTRIBUTION À LA CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE DES MATÉRIAUX

H.W. VANDERSCHUEREN

Professeur émérite, ULg
e-mail : hw.vanderschueren@gmail.com

Résumé. Après un bref rappel des généralités concernant le radon, l'auteur fournit un ensemble de mesures (dynamiques) personnelles ayant trait aux 3 domaines air, eau et roches. Concernant « le radon dans l'air et l'eau », l'auteur rapporte un ensemble de mesures - en application des méthodologie et protocole traditionnels – visant essentiellement à préciser les détails de mise en œuvre couramment « ignorés » dans les compte-rendus classiques ; en bref, l'auteur s'est efforcé de répondre aux questions de détails qu'il s'est lui-même posées. En ce qui concerne, l'exhalation du radon par les roches et minéraux par contre, l'auteur présente une méthodologie personnelle débouchant sur un protocole de « caractérisation statistique » de site et ce par le biais de 2 thèses déclarées : l'une concernant la caractérisation, l'autre traitant de l'influence de l'auto-adsorption par l'échantillon sous test (à noter que la méthode est directement applicable à tous types de matériaux solides tels que les végétaux notamment).

Mots-clés : Radon, risque, protocole, caractérisation statistique de site, mesure, Ardennes.

Summary. Radon in air, water, rock. Dynamic measurement of exhalation and materials characterization. After a review of the general characteristics of radon, the author provides an overview of dynamic measurements in air, water and rock. Measurement of radon in water and air according to classical methodology and protocols is discussed with respect to practical details which tend to be forgotten and on which the author provides some hindsight. A new methodology is proposed for measurement of radon exhaled from rocks and minerals, resulting in a protocol on statistical site characterization and derived from a discussion of two theses based on the distribution law and adsorption effects. This new methodology is directly applicable for all kinds of materials including vegetal matter.

Key-words : radon, hazard, protocol, statistical site characterisation, measurement, Ardennes.

1. Généralités

1.1. Genèse et produits de filiation du radon

Très succinctement, on peut dire que le radon est un gaz radioactif résultant de la désintégration naturelle directe du radium, lui-même produit (relativement éloigné) de désintégration de l'uranium. Ce faisant, on utilise un langage à la fois très réducteur et très intéressant car on sous-entend des éléments de définition qui se révèlent sans grande portée pratique dans les cas qui nous intéressent ici : en fait on se limite à l'isotope 222 du radon qui est en définitive le plus « perturbant ». La figure 1.1 montre sa *famille* radioactive (nous pourrions dire son *arbre généalogique*) principale. Son premier parent est l'uranium 238, son dernier descendant (donc stable) le plomb 206. Nous

disons famille principale car de très nombreux embranchements secondaires existent en réalité mais ils ne présentent aucun intérêt dans le cadre du présent sujet vu leurs très faibles proportions.

Une désintégration α consiste en l'éjection, hors du noyau de l'élément, d'un noyau d'hélium (particule α) constitué de 2 protons et 2 neutrons ce qui laisse un élément « fils » dont A est diminué de 4 unités et Z de 2 unités. Une désintégration β résulte de l'éjection d'un électron par un neutron ce qui transforme ce dernier en proton, accroissant donc Z d'une unité.

Il est à noter que les produits de désintégration directs sont des *ions* (ce qui peut conduire à d'intéressantes propriétés relevant de l'électrostatique. Ces ions sont par ailleurs émis sous haute énergie ce qui d'une part conduit à des

méthodes de détection aisées et sensibles et d'autre part induit des destructions ou des dislocations - très localisées - dans les matériaux où elles se produisent.

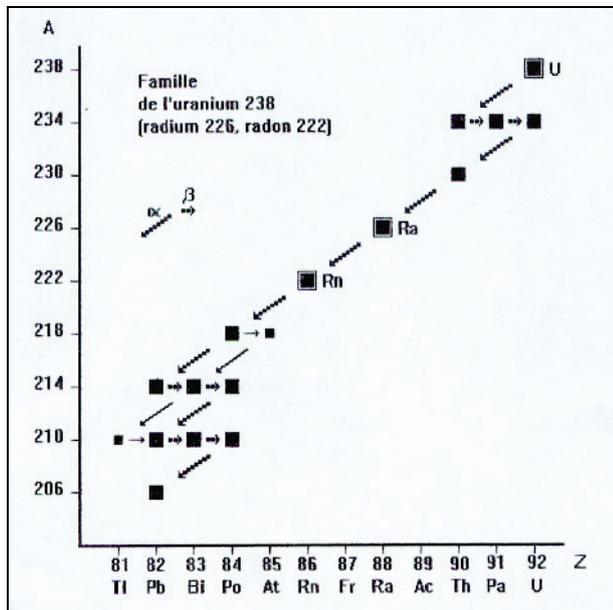


Figure 1.1. Famille radioactive naturelle de l'uranium 238.

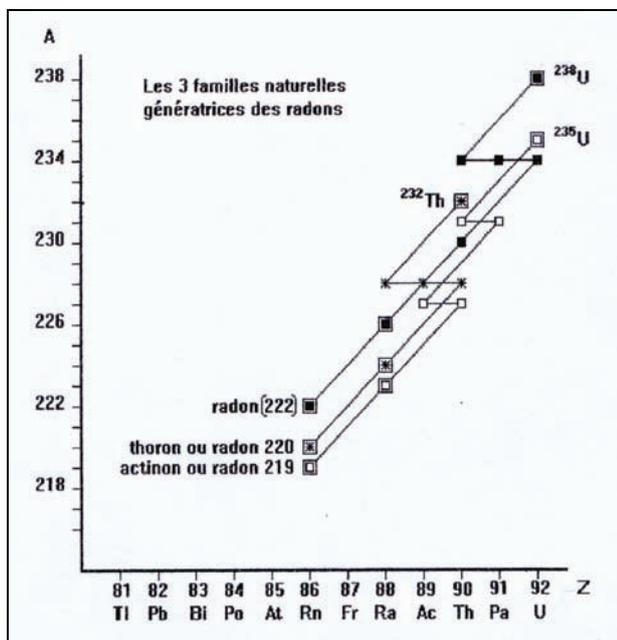


Figure 1.2. Les 3 familles radioactives naturelles (jusqu'au radon).

Pour être - provisoirement - plus précis, nous dirons qu'il existe 3 familles radioactives naturelles dont les premiers parents respectifs sont l'uranium 238, l'uranium 235 et le thorium 232 et qui toutes 3 fournissent un isotope du radon. La figure 1.2 montre les débuts de ces 3 familles jusqu'aux isotopes du radon.

La désintégration nucléaire résulte de l'instabilité du noyau, c'est un processus probabiliste aussi bien spatialement que temporellement ce qui veut dire que dans un échantillon donné, il est impossible de prédire dans quel ordre et à quels moments se désintégreront individuellement les atomes. Par contre, le comportement global de chaque élément d'une filiation obéit à une loi (probabiliste) très bien définie et très bien vérifiée expérimentalement.

1.2. Notions fondamentales de radioactivité

La désintégration nucléaire d'un élément radioactif obéit à une loi de probabilité très simple. Chaque noyau d'un ensemble d'atomes de cet élément a une probabilité donnée λ de se désintégrer pendant l'unité de temps (la seconde dans notre système d'unités de mesures normalisé MKS).

Cette probabilité est caractéristique de l'élément. Ainsi dans le cas du radium 226, λ vaut sensiblement $1,4 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ (soit 1,4 cent milliardième par seconde) ce qui peut s'exprimer en d'autres termes : **1 noyau sur quelque 70 milliards se désintègre en moyenne par seconde** ou encore : **la durée de vie moyenne** (ou **espérance de vie**) τ des noyaux de radium 226 est de 70 milliards de secondes soit environ 2200 ans.

En ce qui concerne le radon 222, son espérance de vie est considérablement plus courte, elle vaut 5,5 jours.

Partant de la probabilité de désintégration λ , on déduit immédiatement que, pour un échantillon qui compte N atomes à un instant considéré t , la fraction de cette population qui - *en moyenne* - se désintégrera pendant la durée élémentaire dt qui suit l'instant considéré t , sera proportionnelle à dt et à λ :

$$dN / N = - \lambda \cdot dt$$

L'intégration est élémentaire et conduit évidemment à l'exponentielle décroissante :

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

La figure 1.3 reproduit le graphe de cette fonction qui illustre la manière dont se désintègre tout échantillon radioactif. On y a fait figurer la durée caractéristique τ ainsi qu'une autre caractéristique temporelle à laquelle on se réfère plus couramment parce qu'elle est particulièrement « parlante », la **période** ou **demi-vie** $t_{1/2}$.

La période désigne la durée au bout de laquelle la moitié des atomes de l'échantillon de départ se sont désintégrés. Cette propriété est répétitive - ce qui

explique son grand intérêt pratique – ainsi au bout d'une nouvelle durée identique $t_{1/2}$, la moitié des atomes restants se seront à leur tour désintégrés et ainsi de suite. On peut facilement vérifier qu'après une durée correspondant à 7 fois $t_{1/2}$, plus de 99% des atomes de départ se sont désintégrés.

Comme on peut le voir sur la figure 1.3, la durée τ peut, elle aussi, avoir une interprétation « parlante »: ce serait la durée après laquelle tout l'échantillon se serait désintégré si la loi était non pas exponentielle mais linéaire avec la même pente qu'au départ (tangente à l'origine). Il existe évidemment une relation simple entre les 2 grandeurs introduites : $t_{1/2} = 0,69 \tau$. On notera aussi que τ est la « **constante de temps** » des électriciens et des électroniciens.

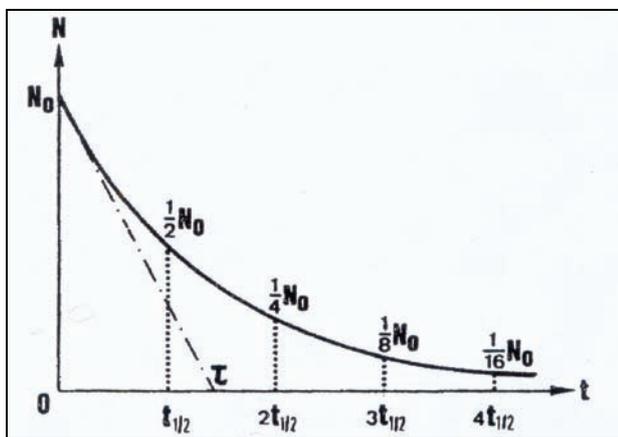


Figure 1.3. Courbe de désintégration d'un élément radioactif.

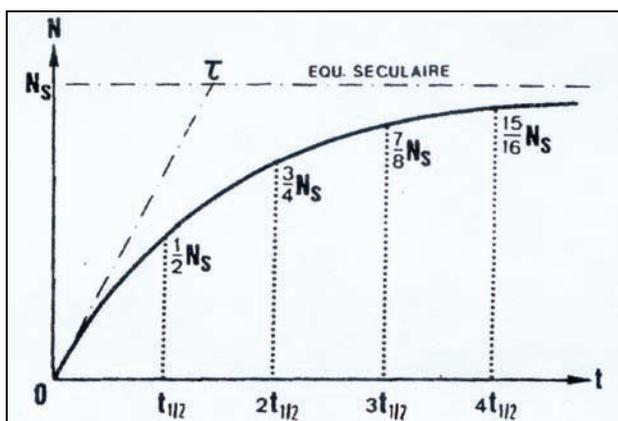


Figure 1.4. Courbe illustrant l'établissement de l'équilibre en radon dans un récipient clos contenant une source de radium.

Dans notre cas, la courbe de la figure 1.3 traduit par exemple la manière dont se désintègre le radon contenu dans un échantillon d'air enfermé dans un récipient étanche ne contenant aucune autre source.

Au contraire si l'on enferme dans un récipient préalablement décontaminé une source de radon « idéale » - c'est-à-dire libérant immédiatement dans l'air ambiant tout le radon produit - la courbe traduisant l'évolution temporelle du contenu en radon du récipient aura évidemment l'allure inverse de la précédente (Fig. 1.4).

L'allure de cette courbe peut se comprendre aisément. En effet, le radium ayant une demi-vie considérablement plus longue que celle du radon qu'il produit (environ 1600 ans contre 4 jours), on peut le considérer comme « éternel » ou encore dire qu'il émet du radon à un « rythme » constant puisqu'il ne s'appauvrit pratiquement pas au cours d'une expérience. Il s'ensuit que le récipient, dès l'instant de sa fermeture, s'enrichit progressivement en radon et cet enrichissement se poursuivrait sans fin si le radon était stable, mais comme il se dégrade au fur et à mesure de sa production selon son rythme à lui (courbe de la figure 1.3), on peut assez facilement se persuader que la situation doit tendre vers un équilibre. Cet équilibre ne doit théoriquement être atteint qu'après une durée « infinie » - pour cette raison, on nomme cet état théorique: « équilibre séculaire » - mais pratiquement, comme dans le premier cas (Fig. 1.3), après une durée valant 7 fois la demi-vie du radon - soit environ 1 mois - l'équilibre est approché à moins de 1% près.

Remarque. La source « idéale » évoquée ci-dessus peut en fait être bien approchée et même très simplement. Une solution aqueuse d'un sel de radium agitée mécaniquement ou – mieux – dans laquelle on fait circuler (« buller ») un courant de l'air ambiant (ainsi qu'expliqué dans le chapitre concernant la mesure du radon dans l'eau ou tout autre liquide) libère en effet le gaz dans l'ambiance. Par contre un solide, fût-il en couche mince ou sous forme pulvérulente, ne peut être considéré comme idéal ainsi qu'on aura l'occasion de s'en expliquer longuement dans le chapitre réservé au radon dans les roches (adsorption notamment).

1.3. Localisation du radon - spécificités de l'uranium

L'uranium pouvant se présenter sous divers états de valence, on trouve parmi ses nombreux composés des produits insolubles (oxydes et sels où l'uranium a essentiellement la valence 4) mais également de très nombreux produits solubles (sels de valence 6 prioritairement) et ces derniers sont donc très « mobiles ». De ce fait, il n'est pas étonnant de trouver des produits de filiation de l'uranium

pratiquement dans tous les types de terrains - tout particulièrement dans les failles - voire au sein de produits fossiles d'origine végétale tels que la houille ou la tourbe (d'ailleurs connus pour leur faculté de concentration de l'uranium !) ou d'origine organique comme les phosphates sédimentaires.

Les sels solubles d'uranium étant surtout acides, ils peuvent au cours de leur migration rencontrer des roches « basiques » avec lesquelles ils sont susceptibles de réagir pour donner des composés insolubles qui précipiteront pratiquement sur place; c'est ainsi que l'on peut même trouver des taux d'exhalation de radon relativement élevés dans des sites calcaires.

A titre de curiosité - et d'information -, on notera que sur les 3720 **minéraux** recensés officiellement et répertoriés dans le glossaire de Fleischer (éd. 1999), il s'en trouve 202 contenant de l'uranium dans leur formule chimique.

En conclusion, si l'on peut avancer qu'aucun site ne peut être, sur simple référence géologique, déclaré a priori exempt de radon, il reste vrai que les roches d'origine plutonique (granite) sont celles qui, exception faite de cas ponctuels, donnent lieu à la plus forte génération de radon par désintégration naturelle directe du radium présent, lui-même descendant de l'uranium originel ou exogène.

Ceci permet en effet, par les joints de grains, une infiltration suffisamment efficace, sinon aisée. Il s'ensuit qu'une fraction substantielle du radon, en soi déjà très diffusif, peut arriver en surface - et ce malgré sa demi-vie relativement courte (3,8 jours) - et s'échapper librement avant désintégration en polonium, son produit de filiation direct. Généré dans la masse, ce polonium, naturellement solide, y serait resté confiné.

Les roches plutoniques résultent de l'intrusion du magma dans le manteau et l'écorce terrestres, l'ascension s'étant interrompue avant d'atteindre la surface. Les roches encaissantes étant peu conductrices thermiquement, le magma emprisonné dans ce "calorifuge" s'est refroidi très lentement permettant la cristallisation des composants ce qui explique l'aspect "granuleux" (et donc le nom de "granite") de la roche en question. L'érosion naturelle, agissant sur la "coupole" sus-jacente après solidification du granite, a en de nombreux endroits débarrassé celui-ci de cette couverture de roche ce qui conduit aux affleurements granitiques actuels qui s'étendent parfois sur des surfaces considérables (les deux tiers de la Corse, les côtes de Bretagne, le Massif Central, etc).

Nous nous devons de préciser que si, dans le contexte de la recherche du radon en particulier, on ne peut s'en tenir aux grands principes de la géologie fondamentale (vu la "mobilité" des composés susceptibles de le générer), il en va tout autrement dans la prospection industrielle de l'uranium par exemple.

La Wallonie, on le sait, présente une diversité géologique remarquable dans les domaines sédimentaire et métamorphique.

Par ailleurs, la richesse du réseau hydrographique naturel et la densité des chantiers routiers, autoroutiers, ferroviaires et même hydrographiques (Canal Albert, Canal du Centre par exemple), dont l'implantation a nécessité de très nombreux déblais, donne lieu à de spectaculaires affleurements du plus haut intérêt au même titre d'ailleurs que les nombreuses cavités naturelles (grottes) ou artificielles (mines et carrières de tous types). Cette diversité et la commodité d'accès nous a particulièrement favorisé en ce qui concerne la collecte d'échantillons de roches divers.

L'absence quasi totale de roches magmatiques (plutoniques tout spécialement) en Wallonie est un handicap surtout pour l'étude du radon mais en choisissant d'implanter en Corse (à Calvi sur la Presqu'île de la Revellate) une Station océanographique « Stareso », l'Université de Liège nous a offert, et dans des conditions optimales, le « chaînon manquant » ce qui, dans le cadre du présent travail, nous a fourni un heureux point de comparaison.

D'autre part l'abondance remarquable des aquifères (en particulier des « pouhons ») en région wallonne nous a doté d'une panoplie de résultats permettant de circonscrire l'importante problématique du « radon dans l'eau ».

En conclusion, à partir d'une majorité de mesures quasi locales, nous avons pu rencontrer la quasi-totalité des questions qui se posent en général lorsqu'on aborde le sujet complexe du radon et nous pouvons les présenter ici systématiquement, après un bref aperçu touchant les méthodes de mesure elles-mêmes.

2. Métrologie du radon

« Testis unus, testis nullus »

2.1. Mesures « intégrales » ou « moyennes »

L'activité radon mesurée dans une habitation résulte essentiellement de l'exhalation par les roches du sous-sol. Elle est tributaire des conditions atmosphériques (température, pression et degré hygrométrique) et des particularités locales (géologiques, pédologiques, environnementales et domestiques). Il s'ensuit que cette activité évolue – ou du moins peut évoluer – considérablement au cours du temps : c'est ainsi que le rapport entre valeurs maximale et minimale de l'activité nyctémérale par exemple peut atteindre très couramment 5 et parfois beaucoup plus.

Ceci explique que la cartographie à l'échelle nationale ou régionale passe obligatoirement par des mesures « intégrales » ou « moyennes » portant sur plusieurs mois. Quatre techniques sont couramment utilisées à cette fin.

La plus ancienne consiste en l'adsorption cumulée du radon sur charbon actif suivie d'une mesure en laboratoire – par spectrométrie gamma – de l'activité de ses produits de filiation à longue « durée de vie ».

Deux autres méthodes reposent sur le comptage des impacts obtenus lors de la désintégration alpha du radon sur une « cible » ad hoc. Celle-ci peut être une feuille polymère – polycarbonate – ou une pellicule photographique spéciale. Dans l'un et l'autre cas, les impacts directs sont d'un diamètre trop faible pour être directement perceptibles (nanométriques) mais la déstructuration de la zone impactée rend celle-ci plus sensible à une attaque chimique, par une solution de soude caustique par exemple. Il s'ensuit que si l'on soumet le matériau concerné à un tel traitement chimique pendant un temps judicieux, on peut finalement obtenir des traces aisément détectables au microscope optique (micrométriques) qu'un traitement d'image élémentaire permet de dénombrer automatiquement.

La quatrième méthode repose sur la propriété des électrets : un polymère – couramment le PTFE – préalablement chargé électriquement par implantation ionique est installé dans l'atmosphère à contrôler. Les particules alpha impactant ce substrat le déchargent à un rythme dépendant évidemment de l'activité locale de sorte qu'il suffit de mesurer le potentiel électrique de la surface, lui-même proportionnel à la charge électrique résiduelle en vertu de la loi de Gauss, pour déduire

(en se référant à la courbe d'étalonnage) l'activité radon moyenne ambiante.

Les cellules sensibles de l'un des types décrits sont installées dans des pots munis d'un filtre permettant la diffusion du radon 222 tout en retardant suffisamment la pénétration du thoron (radon 220). De très courte période, il se désintègre majoritairement dans le filtre qui piège les produits de filiation et les particules alpha du thoron et de ses descendants. Le récipient en question est déposé dans le local à contrôler (living, chambre, lieu de travail, sous-sol ou tout autre endroit suspect) pendant plusieurs mois selon le protocole adopté par l'organisme de contrôle responsable. La figure 2.1, reproduite avec l'aimable autorisation du Département « Prévention Santé » de la Province de Luxembourg, montre la cartographie de l'activité radon relevée sur le territoire de la province. Le niveau de référence de 200 Bq/m³ est l'activité jugée « préoccupante » : au-delà de cette valeur, les « autorités », par application du *principe de précaution*, conseillent des méthodes de remédiation (aération régulière voire ventilation forcée si ce niveau est nettement dépassé). Une activité de 200 Bq/m³ correspond à un équivalent de dose (ou « effectance » biologique) de 1 µSv.

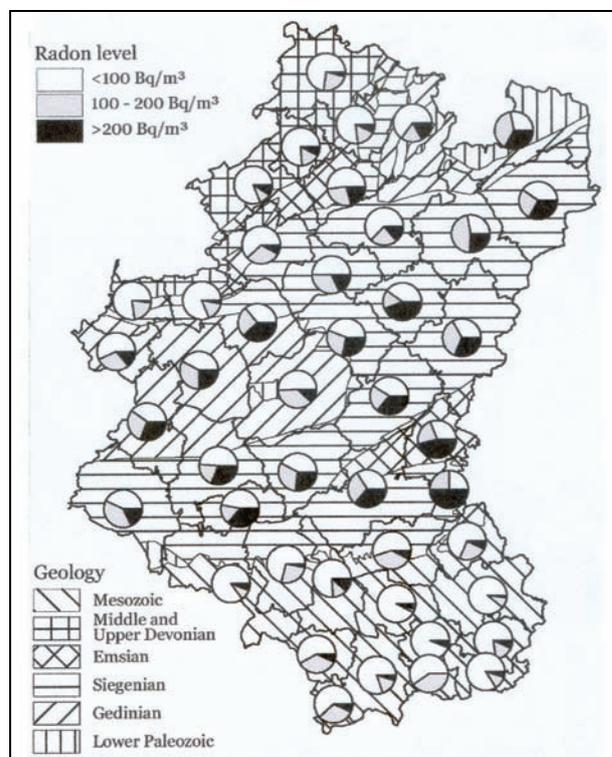


Figure 2.1. Cartographie de l'activité radon moyenne en province de Luxembourg en relation avec la géologie locale (reproduit avec l'autorisation du « Département Santé » de la Province, Kuske et al., 2001).

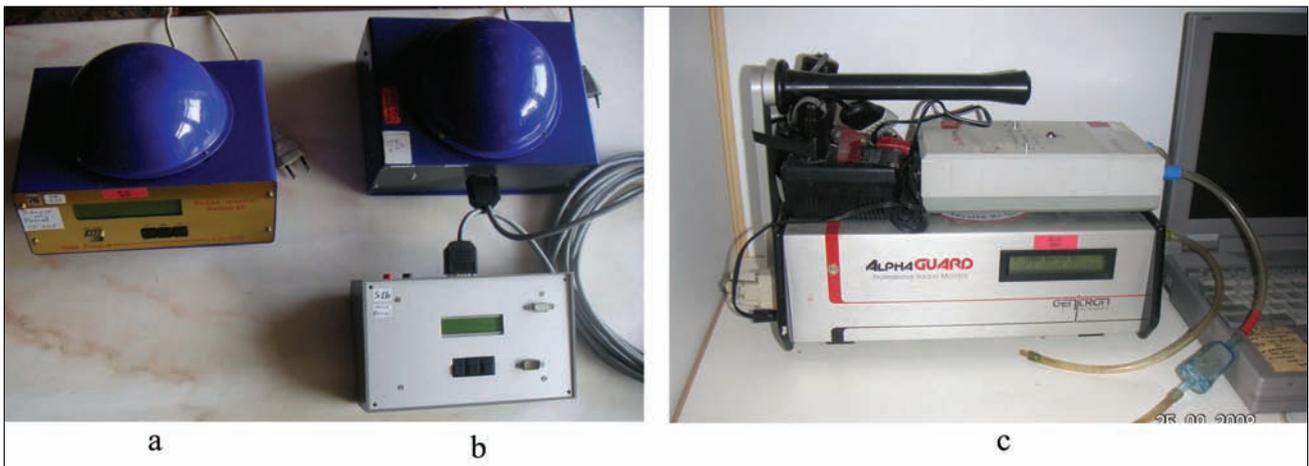


Figure 2.2. Nos appareils de mesures dynamiques les plus employés :
a. Radim d'origine, b. Radim adapté, c. Alphaguard et sa pompe.

2.2. Mesures « dynamiques » ou « en temps réel »

2.2.1. Radon dans l'air

Des mesures moyennes sont évidemment inutilisables pour quantifier, si ce n'est à très long terme, l'efficacité d'une méthode ou d'un dispositif de remédiation préconisé (ou déjà mis en oeuvre) dans une habitation, un lieu de travail ou un site touristique par exemple où une activité « prohibitive » aurait été détectée ou serait suspectée.

C'est là notamment que s'imposent des appareils de mesures « dynamiques » ou « temps réel ». Il s'agit d'appareils actifs et programmables permettant de stocker et de traiter des quantités de mesures effectuées à cadence réglable. Ils sont donc susceptibles de renseigner très rapidement l'opérateur quant à l'effet d'une modification de l'environnement sur l'activité mesurée. Endéans quelques heures déjà, on peut ainsi par exemple « se rendre compte » de l'efficacité d'une aération ou d'une ventilation d'un local. Un programme portant sur une durée de quelques jours à quelques semaines permet de tester diverses possibilités, le plus souvent très simples, conduisant à une revalidation des lieux. Le *Laboratoire radon de l'Université de Liège* s'est spécialement équipé en vue de ce « service citoyen » et a pu au cours des années écoulées répondre aux diverses demandes qui lui ont été adressées tant en Province de Liège qu'en Province de Luxembourg soit chez des particuliers, soit sur sites touristiques (tels l'Archéoforum de la Place St-Lambert à Liège, la mine de Blégny ou la carrière souterraine de la

Morépître à Bertrix, les grottes de Ramioul et Comblain-au-Pont par exemple).

Deux types principaux d'appareils équipent présentement le Laboratoire-radon et ont été intensivement utilisés (Fig. 2.2).

Une dizaine d'appareils programmables (du type « Radim » de la firme Plch de Prague : Fig. 2.2.a), qui sont directement conçus pour les mesures d'activité radon dans l'air, permettent principalement de répondre aux demandes ponctuelles de mesures sur site (deux ou plusieurs appareils pouvant être disposés simultanément en plusieurs endroits significatifs dudit site).

Le principe de mesure repose sur la sensibilité à l'impact des particules alpha d'une diode P.I.N. à *effet Schottky*. Les particules, franchissant la fenêtre très mince d'or (couche P de la diode), créent des paires électrons-trous dans la couche intrinsèque intermédiaire (I) donnant donc lieu à un courant équivalent dans la « diode » (ou mieux « cellule voltaïque »). Ce dernier étant évidemment directement fonction du taux d'impacts, permet, moyennant étalonnage, la mesure de l'activité radon dans l'ambiance. Un filtre permet ici aussi d'empêcher efficacement l'accès à la cellule du thoron.

En ce qui concerne nos diverses investigations concernant le radon « dans l'air », nous avons systématiquement eu recours à ces appareils dont plusieurs ont été transformés – avec l'accord et la collaboration du constructeur – pour en augmenter les potentialités d'emploi. L'appareil compact de départ, alimenté par le réseau, a été pourvu d'une alimentation par batterie et scindé en 2 parties : la cellule de mesure d'une part et le système de

traitement des résultats d'autre part reliés par câble (Fig. 2.2.b). Ceci a permis des investigations commodes dans des sites particuliers (anfractuosités ou galeries sans possibilité d'alimentation locale, études en laboratoire dans diverses cellules particulières).¹

Le Laboratoire s'est en plus doté d'un appareil très performant, l'« Alphaguard Professional Radon Monitor de la firme allemande Genitron » à chambre d'ionisation « classique » (Fig. 2.2.c).

La chambre d'ionisation, – plus connue sous le vocable « compteur de Geiger-Müller » alors que cette appellation désigne rigoureusement une application limitée de ladite chambre – consiste en une « diode » tubulaire à air (cylindre et « fil » coaxiaux) polarisée sous tension élevée (plusieurs centaines de volts dans le cas présent). Une particule ionisante (alpha dans le cas qui nous occupe) pénétrant dans la chambre y crée une gerbe ionique qui se traduit par un courant mesurable dans le circuit extérieur.

Le système est muni d'un processeur digital permettant le traitement du signal (DSP) : il « reconnaît » la forme du signal de courant détecté et permet ainsi de sélectionner les signaux utiles (séparer par exemple les signaux provenant de la désintégration du thoron). L'appareil est de plus équipé de capteurs adéquats pour fournir les conditions d'ambiance de la mesure : température, taux d'humidité et pression atmosphérique, qui influencent les résultats.

Comme les Radims, cet appareil est par son principe directement adapté à la mesure du radon dans l'air ambiant. A cette fin, une fenêtre munie d'un filtre permet la diffusion directe de l'air dans la chambre de mesure. Pour des mesures dans d'autres conditions (radon dans le sol ou exhalé par des matériaux contenus en cellules ad hoc - comme on le verra dans la suite – par exemple), l'appareil est muni d'une pompe de circulation à débit adaptable.

La désintégration nucléaire étant fondamentalement un phénomène statistique, il importe de moyennner les relevés : l'appareil permet donc le choix des durées de saisies des résultats et de moyennage. D'une très grande souplesse de programmation : il permet aussi bien un fonctionnement complètement autonome (commode pour une mesure sur site) qu'un pilotage

par PC qui en étend les possibilités d'observation, traitement, stockage et présentation des résultats.

La figure 2.3 reproduit un exemple d'enregistrement obtenu à partir des données stockées par le moniteur selon le mode adopté systématiquement pour l'archivage des résultats de recherche.

Chaque créneau correspond au taux moyen mesuré pendant la période d'échantillonnage choisie (ici 1 minute). Cette figure fournit une belle illustration du caractère statistique des phénomènes radioactifs : ce n'est qu'en prenant la moyenne totale des résultats sur une durée judicieuse que l'on obtient une valeur significative de l'activité cherchée.

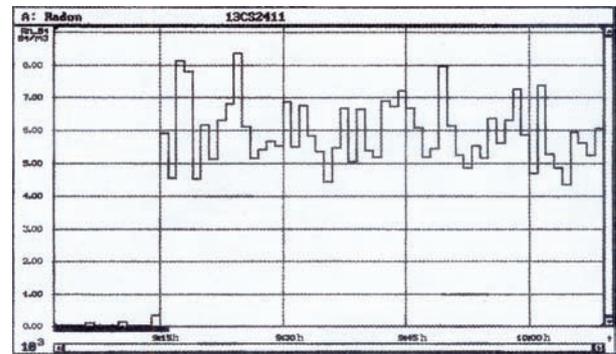


Figure 2.3. Exemple d'enregistrement effectué à l'aide de l'Alphaguard. Une durée de 10 minutes, précédant la mesure d'exhalation proprement dite, est ici consacrée à l'enregistrement du bruit de fond après balayage par air (exempt de radon).

Vu les remarquables propriétés d'un tel appareil, il nous a été possible de dépasser le cadre des investigations radon habituelles et d'appréhender la problématique radon sous toutes ses facettes, notamment en ce qui concerne le radon « **dans l'eau** » et « **dans les matériaux solides** ».

Les résultats de ces investigations, d'intérêt direct dans le cadre du présent travail, sont systématiquement développés dans la suite mais il est nécessaire de présenter ici les protocoles et méthodes de mesures adaptés à chaque cas étant donné le mode de fonctionnement de l'appareil.

En effet, comme la mesure est faite dans la « cellule-diode à air », il y a évidemment lieu de « faire passer le radon dans un volume d'air défini avant d'attaquer l'appareil et de tenir compte de ce volume pour traduire la mesure en une grandeur significative. Si le cas de la mesure du « radon dans l'eau » est classique et le protocole préconisé par le constructeur bien conforme aux besoins, il n'en va pas de même du cas des solides, c'est pourquoi nous présenterons ici notre méthode personnelle ainsi que le protocole optimal que nous

¹ Les résultats de ces études sont explicités plus loin sous le titre « Le radon dans l'air ».

avons déduit de nos nombreuses investigations en ce domaine.

Remarque. A titre d'information, nous signalerons qu'il existe un troisième type d'appareil, très bien adapté aux mesures « dynamiques » du radon dans l'air, le moniteur à « cellule de Lucas ». Il s'agit d'un appareil contenant un réceptacle couvert intérieurement d'une couche luminescente et dans lequel est introduit l'air contenant le radon. Les impulsions lumineuses produites sous l'impact des particules alpha sont détectées par un tube photomultiplicateur et leur nombre converti en activité volumique du radon. Les recherches menées au Laboratoire radon avec ce type d'appareil concernent des propriétés très spécifiques – effets électrostatiques d'impacts notamment – non rapportées dans ce travail.

2.2.2. Radon dans l'eau

Le radon est très soluble dans l'eau. Dans les conditions normales (à la pression atmosphérique et à la température de 20°C), l'eau peut en effet dissoudre 8 fois plus de radon que d'oxygène (3 fois moins que de gaz carbonique). Ce taux varie évidemment en fonction de la température, de la pression et du contact ou non avec une phase gazeuse ainsi qu'on va le vérifier à partir des expériences présentées ci-après. Mais on déduit aisément d'un fait d'expérience quotidien quel peut être le principe de la méthode de transfert du radon de l'eau vers l'air en vue de sa mesure.

Il suffit en effet d'agiter dans des conditions déterminées un échantillon standard d'eau, en présence d'air, dans un volume clos pour provoquer le dégazage de l'eau. On s'en convaincra en pensant au résultat de l'agitation d'une bouteille d'eau gazeuse (ou de champagne !) avant son ouverture. C'est ainsi qu'est utilisé l'appareil à cellule de Lucas pour la mesure du radon dans l'eau ; dans le cas de l'Alphaguard, la pompe de circulation fait simplement « buller » l'air dans l'eau afin d'assurer le transfert.

La figure 2.4 reproduit le schéma d'installation tel que préconisé par le constructeur.

Le mode opératoire est très simple : 100ml d'eau à analyser sont précautionneusement injectés à la seringue dans la première cellule, tandis que l'ajutage supérieur de la seconde est ouvert pour maintenir la pression atmosphérique en permettant l'évacuation de l'air excédentaire. Les robinets à 3 voies sont ensuite tournés de manière à supprimer

la communication avec l'extérieur de l'installation tout en assurant la communication continue du circuit interne. Enfin la pompe de circulation est mise en route sous un débit de 1l/min de sorte que l'air puisse « buller » dans l'eau (au travers d'un filtre en verre fritté bloquant d'éventuelles gouttelettes).

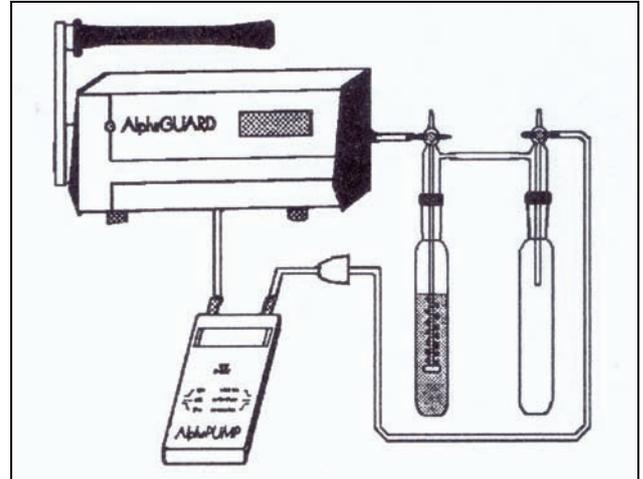


Figure 2.4. Dispositif de mesure de l'activité du radon contenu dans l'eau. Le second récipient constitue un tampon de sécurité pour éviter toute entrée d'eau accidentelle dans la pompe et le moniteur. Un filtre assure un deuxième niveau de sécurité.

L'appareil étant calibré pour indiquer l'activité mesurée dans l'air, il doit être tenu compte du volume interne et de la quantité d'eau selon la formule (donnée par le constructeur, N = indication):

$$A \text{ (Bq/l)} = N \text{ (Bq/m}^3\text{)} / 95,4$$

2.3. Radon dans les roches (ou solides en général)

2.3.1. Exhalation surfacique - ou « naturelle » ou « in situ »

Si l'on veut mesurer en place l'exhalation (par unité de surface) à partir d'une roche, d'une paroi, d'un revêtement mural ou encore d'un plan de travail (granite - cuisine par exemple), il « suffit » d'appliquer le principe du stéthoscope au circuit de la figure 2.4 en tenant compte du volume total du « circuit d'air » fermé. Une précaution élémentaire doit être prise pour éviter les fuites au contact entre le « stéthoscope » et la surface étudiée (idéalement par un joint – élastique - en tygon® ou viton®, sous forme d'un O-ring par

exemple). La figure 2.5 visualise le circuit proposé.

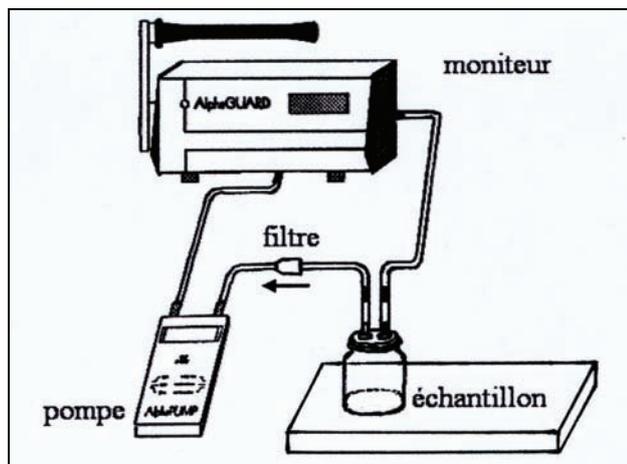


Figure 2.5. Dispositif de mesure de l'exhalation du radon par un échantillon solide compact à surface plane. La pompe assure la circulation permanente et l'homogénéisation de l'air entre la cellule (« stéthoscope ») et l'appareil de mesure (moniteur).

On remarquera que si l'on dispose d'un échantillon (non destructible) d'un matériau à caractériser (exemple de cas pratique: échantillon de granite soumis par les cuisinistes), il suffit de l'installer dans un récipient étanche de volume approprié dans lequel l'appareil de mesure peut lui-même être simplement enfermé (mesure par diffusion naturelle : appareils de type Radim ou Alphaguard) ou raccordé extérieurement pour mesure avec circulation d'air (type Alphaguard).

2.3.2. Exhalation volumique

a. Conformation et adsorption

S'il n'y a guère de difficulté à concevoir qu'il est possible de mesurer sans ambiguïté l'activité du radon dans l'air ou dans l'eau, il est beaucoup moins aisé de mettre au point une méthode de mesure pleinement satisfaisante quant à l'activité susceptible d'être produite par un échantillon de roche dans l'air ambiant. Malgré la grande énergie acquise par l'ion lors de la désintégration de l'atome de radium (« énergie de recul ») consécutive à l'éjection de la particule α), on conçoit aisément que le radon produit au sein d'une roche ne pourra traverser, directement ou par diffusion ultérieure, qu'une mince couche du matériau massif (petite fraction de mm typiquement).

Le radon naturellement exhalé dans l'environnement d'une roche résulte donc

fondamentalement du radon produit dans la couche superficielle.

Toutefois la majorité des roches, même bien lapidifiées, ont une certaine « pseudo-porosité » mésoscopique (intergrains des roches granitiques ou gneissiques, interfeuillettes des roches schisteuses ou des micas par exemple).

Il s'ensuit que le radon produit dans les grains ou feuillettes, même loin de la surface de la roche elle-même, trouve là des chemins de **diffusion** privilégiés et comme le radon est connu pour sa très haute diffusivité, une part appréciable du radon dans l'ambiance peut en pratique « venir des profondeurs ».

Mais un deuxième phénomène physique, lié à la « porosité » des matériaux en général - et *antagoniste* du précédent - consiste en l'**adsorption** capillaire des gaz : en conséquence de laquelle une partie du radon reste *piégé* dans les pores. Le radon exhalé résulte donc de la compétition entre ces 2 processus.

Sur site, la porosité évoquée, intrinsèque au matériau, se double évidemment d'une porosité macroscopique souvent importante de **fracture** (fentes ou fissures de roches gélives ou bioturbées ou de roches détritiques...), d'**imperfection de lapidification** (tuf, craie, argile,...) ou de **granularité** (sable, arène, phosphate, dépôts ferrifères de pouhons, téphra...).

b. Adoption du protocole standard conventionnel de conditionnement

De ce qui précède, on conçoit qu'il n'est pas possible de caractériser parfaitement une roche (au sens large), on ne peut qu'adopter une méthode **conventionnelle** de mise en oeuvre permettant « d'approcher » le problème en évitant au maximum toute ambiguïté d'interprétation des résultats. Tout en restant bien conscient des limites de la méthode, il importe qu'une étude approfondie préalable puisse lui garantir en tout état de cause une vertu de comparaison « raisonnable ». Il faut notamment que la méthode soit suffisamment circonscrite pour que divers expérimentateurs puissent raisonnablement intercomparer leurs résultats.

On ne perdra pas de vue par exemple que l'importance de la porosité évoquée entraîne une conséquence importante et inéluctable : l'influence des conditions d'ambiance, température, pression et surtout humidité relative. Ce dernier aspect résulte du fait que l'humidité ambiante elle aussi s'adsorbe considérablement et que le radon est très soluble dans l'eau.

Si l'on envisage d'appliquer la méthode pour caractériser et comparer les solides dans leur ensemble, une standardisation des échantillons est nécessaire étant donné les conformations très diverses des matériaux naturels : roche compacte (calcaires, basaltes, quartzites, serpentine,...), granulaire (granite,...), poreuse (ponce, pouzzolane, travertin,...), pulvérulente (sable, arène, craie, dépôts ferrugineux,...), non lapidifiée (argile, marne, phosphate,...) ou encore échantillons botaniques (lichens,...).

Il s'ensuit que pour se rapprocher autant que faire se peut (*aisément* et sans avoir recours à de trop grandes quantités prélevées in situ - et donc à transporter !-) de conditions comparables quant à la conformations des échantillons de toute nature, autant d'ailleurs que pour **augmenter la sensibilité de la mesure**, nous avons choisi de les étudier sous forme pulvérulente. Ce faisant on se heurte au problème de l'adsorption **que l'on accroît par cette pulvérisation** ! Qu'en résulte-t-il au total ?

Paradoxalement, on constate que cet accroissement d'adsorption conduit à un gain de temps de conditionnement : le radon stocké - et libéré (partiellement) sous l'effet de la circulation d'air - permet d'anticiper sur l'établissement de l'équilibre séculaire (selon la loi théorique de la Fig. 2.4): une durée de 20 jours de stockage peut déjà être considérée comme très raisonnable !²

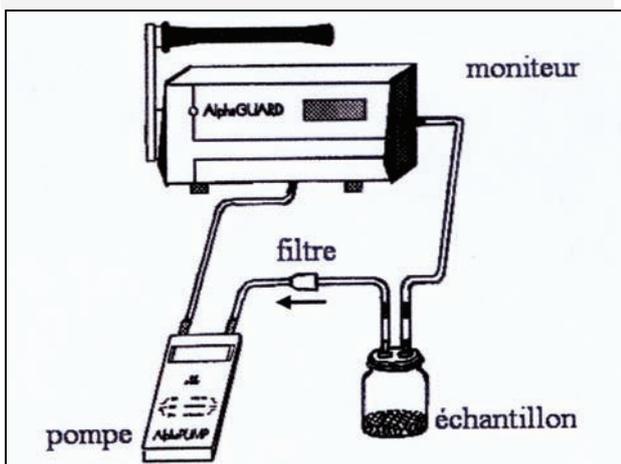


Figure 2.6. Dispositif de mesure de l'exhalation du radon par un échantillon solide sous forme pulvérulente. La pompe assure la circulation

permanente et l'homogénéisation de l'air entre la cellule de stockage et l'appareil de mesure (moniteur).



Figure 2.7. Cellules de stockage des échantillons dans leur récipient de garde pendant la période de conditionnement.

Dans le cas présent, après moult tentatives et essais d'adaptation du principe général élémentaire (exhalation dans un volume d'air puis transfert dans l'appareil) en vue d'une mise en œuvre commode et fiable du processus, nous avons abouti à une méthode dérisoirement simple. Son adaptation à des études systématiques (requérant le conditionnement simultané d'un nombre appréciable d'échantillons – Fig. 2.7) s'avère, on le comprendra, peu onéreuse et aussi « extensible » que souhaitable en pratique :

Un échantillon de 50 grammes du matériau concassé et tamisé (mailles de 2 mm) est enfermé dans un récipient étanche d'une contenance de 0,36 litre pendant une durée suffisante pour que soit approché *raisonnablement* l'équilibre séculaire (soit supérieure à 20 jours comme on le justifiera plus loin).

Le radon s'y exhale donc progressivement selon la loi illustrée à la figure 1.4 mais corrigée, pour tenir compte de l'adsorption par le matériau. Ce récipient est muni de 2 tuyaux souples en tygon simplement fermés par des bouchons cylindriques en laiton (facilement insérés ou retirés pour remplacement par des traversées de jonction de tuyaux), permettant de le connecter à l'appareil de mesure selon le schéma de la figure 2.6, lorsque la durée d'exhalation est jugée adéquate.

² Nous nous réservons d'explicitier en fin de chapitre cette assertion que nous présentons comme 1^{ère} thèse de ce mémoire sous le titre : Loi réelle d'établissement de l'équilibre séculaire - effet de l'adsorption.

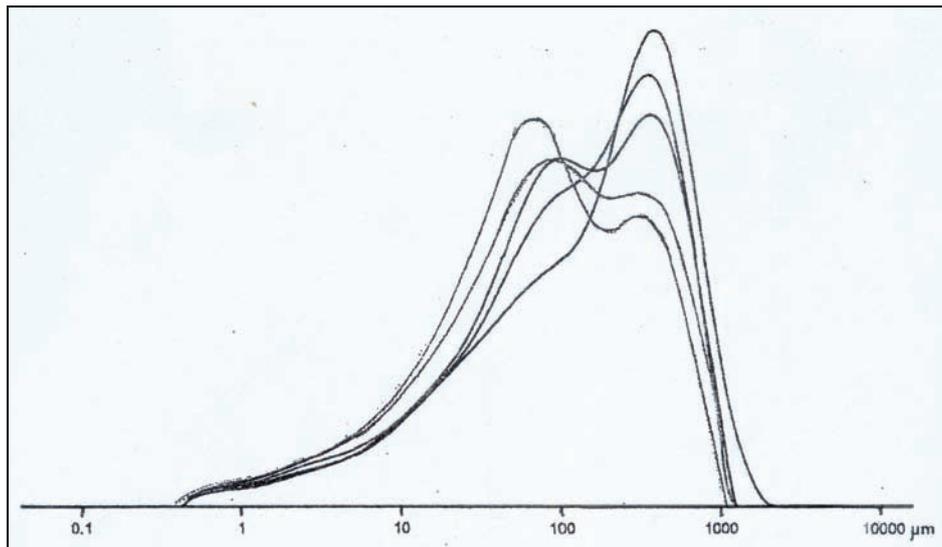


Figure 2.8. Distribution granulométrique de 5 échantillons de roches différentes concassées et tamisées selon « notre méthode standard ».

Ce récipient – c'est la seule spécificité de notre méthode – est stocké préalablement pendant la durée en question dans un second récipient, fermé hermétiquement (Fig. 2.7), qui contient lui-même une quantité du même échantillon telle que la concentration en radon y suive identiquement la même évolution que celle qui existe dans le premier (on choisit en principe un bocal commode de 1 litre ce qui amène à y stocker une masse de 85 grammes d'échantillon³).

Ce faisant, on pare à toute éventualité de fuite du récipient intérieur : en effet si un défaut d'étanchéité existait dans le premier conteneur, aucune fuite de radon ne pourrait se produire, la pression étant égale de part et d'autre de sa paroi. Il s'agit en l'occurrence de l'adaptation à notre méthode de la technique, dite « **de garde** » fréquemment employée sous diverses formes en métrologie⁴, et a priori sage dans notre application vu la longue durée de stockage avant mesure.

Le récipient de garde est supprimé lors de la mesure car celle-ci, ne durant qu'un laps de temps court, une microfuite éventuelle serait sans conséquence appréciable.

La figure 2.8 reproduit des mesures de distribution granulométrique de divers échantillons. Ces dernières ont été effectuées pour nous, avec l'aimable autorisation de notre Collègue A. Rulmont, sur le granulomètre du Département de

Chimie de l'ULg. On constate une raisonnable concordance des distributions.

c. Influence des conditions d'ambiance et de la nature du matériau sur l'équilibre de désorption

Il est a priori évident que le taux d'exhalation à l'équilibre du radon par un matériau donné dépend, pour un débit d'air donné, non seulement de la nature de celui-ci mais aussi des conditions environnementales au moment de la mesure : elles-mêmes résultant des conditions qui ont prévalu lors de la fermeture de la cellule de mesure - et qui y ont perduré - : (pression atmosphérique et surtout humidité relative de l'air) et des conditions régnant dans le moniteur avant mise en communication avec la cellule.

En conséquence, il convient d'effectuer plusieurs mesures du même échantillon (nous optons pour 3 mesures) et d'adopter leur **moyenne comme valeur de caractérisation finale**, après s'être assuré que leur dispersion est acceptable.

Mais le mode d'évolution vers cet équilibre dépend lui-même de ces mêmes paramètres et la figure 2.7 montre que l'établissement de l'équilibre peut selon les cas et les conditions différer grandement.

³ ou 0,75 l contenant 50 gr (lorsqu'on dispose d'insuffisamment d'échantillon : moins aisé)

⁴ métrologies électrique et électronique (anneau de garde de Kelvin, câble « triaxial »), thermique (chemisage du calorimètre)...

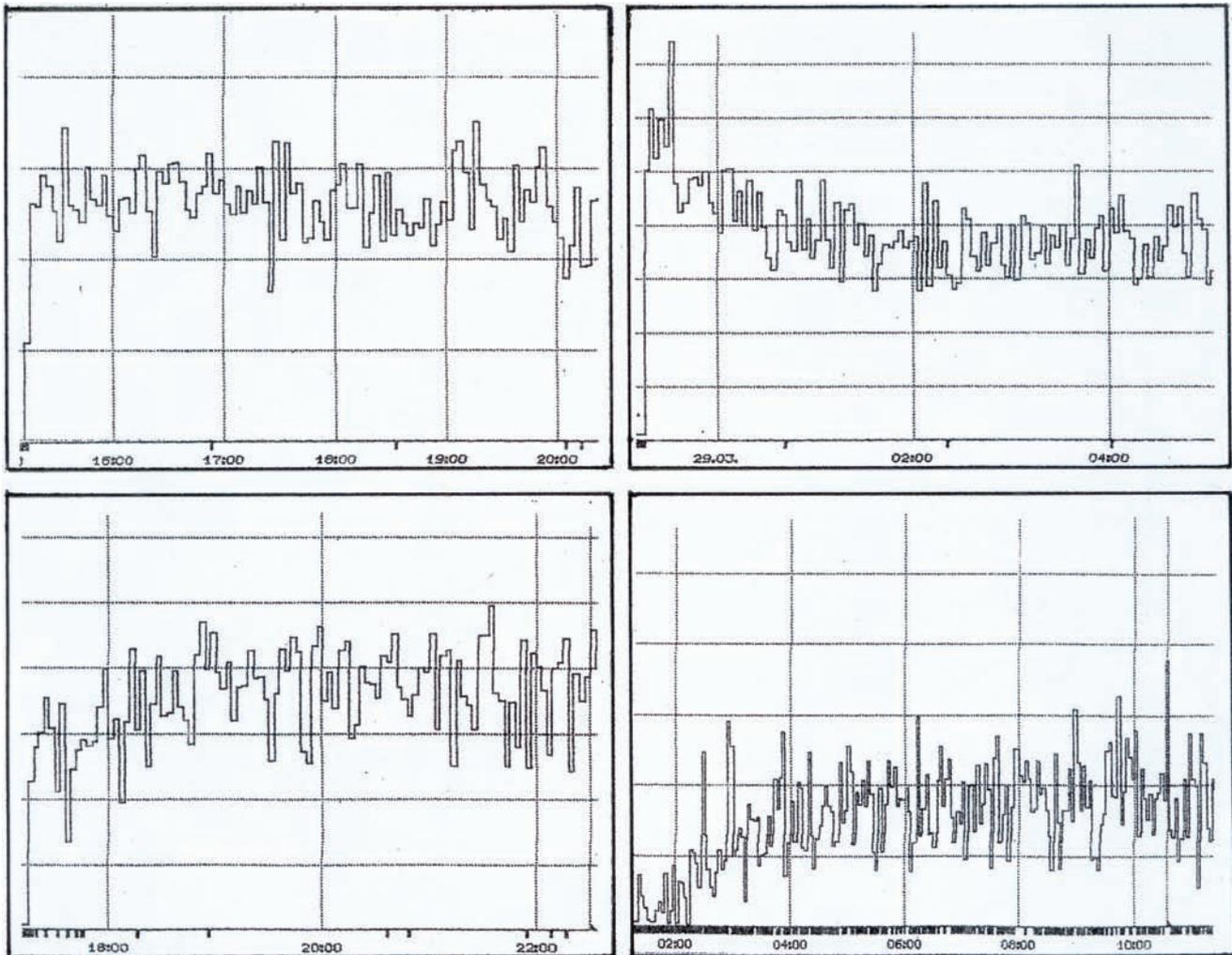


Figure 2.9. Divers cas d'évolution vers l'équilibre de l'exhalation pendant les premières heures suivant la mise en contact de la cellule de stockage avec le circuit de mesure.

d. Adoption du protocole standard conventionnel de mesure

De ce qui précède, on déduit qu'il est prudent d'adopter comme valeur d'équilibre le niveau atteint après plusieurs heures ! Après analyse de très nombreux cas, nous décidons d'ignorer les 3 premières heures d'enregistrement et d'adopter définitivement, comme valeur représentative, la **moyenne obtenue sur les 3 heures suivantes d'enregistrements.**

Le protocole de mesure « standard » finalement adopté eu égard à ce qui précède et après une longue étude systématique explicitée ci-après est le suivant :

- Débit de la pompe: 0,3 litre par minute
- Durée d'échantillonnage: 1 ou 3 minutes
- Mesure du bruit de fond: 20 minutes
- Etablissement de l'équilibre: 3 heures
- Valeur adoptée: moyenne des 3 h. suivantes
- Caractérisation finale : moyenne de 3 mesures

L'appareil étant calibré pour indiquer l'activité mesurée dans l'air, il doit être tenu compte du volume d'exhalation total (cellule, chambre d'ionisation et tuyauterie de raccordement) et de la quantité de produit selon la formule (N = indication de l'appareil en Bq/m^3) :

$$A (\text{Bq/m}^3 \cdot \text{kg}) = N / 50$$

Remarque importante: "protocole court".

Avant l'étude détaillée systématique de l'évolution de l'exhalation en cellule fermée, nous avons réalisé « trop hâtivement » une série considérable de mesures dans des conditions moins fiables que celles que nous garantissons les protocoles de conditionnement et de mesure que nous avons ci-dessus qualifiés de standards et dorénavant appliqués sans exception.

La mesure était effectuée avant l'équilibre séculaire, le plus souvent après une durée de stockage de l'ordre de 4 jours, correspondant donc

sensiblement à la demi-vie du radon. La valeur supposée correspondre à l'équilibre séculaire était déduite de la formule « idéale » (donc sans tenir compte de l'effet d'adsorption).

Une deuxième *faute de principe* résultait du fait que la valeur adoptée lors de la mesure elle-même l'était trop rapidement, avant que l'équilibre de l'exhalation soit réellement établi et ce parce que le protocole de mesure – rapide – des cas air et eau avait été simplement, mais abusivement adapté au cas des solides.

De cette double faute de manipulation résulte une faute pratiquement systématique dans les valeurs obtenues qui peut parfois atteindre 30 à 50 % !

Toutefois, étant donné le domaine des valeurs caractérisant les divers matériaux auxquels cette méthode d'investigation donne accès (quelque 3 ordres de grandeurs), nous n'avons pas voulu renoncer à l'ensemble des résultats ainsi obtenus⁵ qui, on le verra, n'infirment en rien (puisque les écarts sont sensiblement systématiques) la loi que nous établissons et tout au contraire apportent leur lot de renseignements directement utiles. Ces résultats seront désignés dans la suite sous le vocable : « protocole court ».

2.3.3. Loi réelle d'établissement de l'équilibre séculaire en cellule fermée - effet de l'adsorption

→ 1^{ère} thèse de ce mémoire

Si l'on peut a priori s'attendre à obtenir une loi proche de la loi théorique traduite par la figure 1.4, on doit aussi « craindre » un effet parasite inhérent à la conformation pulvérulente de l'échantillon. En effet, si cette conformation est bénéfique comme on l'a dit pour la sensibilité et la standardisation des mesures, il faut envisager le fait que cette accumulation de « grains » détermine une porosité ouverte considérable qui doit conduire à un « préstockage » de radon (dépendant des conditions d'ambiance) et donc invalider la loi théorique (Fig. 1.4) a priori au moins au voisinage de l'origine des temps. C'est ce que nous avons voulu élucider par les mesures rapportées ci-après.

Les figures 2.10.a et 2.10.b rapportent l'ensemble des résultats de mesure obtenus sur 8 échantillons de *solides très variés*, pour des durées de stockage échelonnées entre 0 et plus de 30 jours (les valeurs correspondant aux durées excédant 30 jours sont

figurées par des flèches groupées et positionnées à leur niveau correct).

Dans chacun des 8 cas, les exhalations sont reportées en valeurs relatives (100% correspondant aux valeurs moyennes obtenues à partir de plus de 20 jours de stockage – ce qui se justifiera a posteriori –, soit donc très sensiblement les **valeurs des exhalations à l'équilibre séculaire** (ces dernières sont indiquées – en Bq/m³.kg – dans chaque cas en regard de l'indication 100%).

On comprendra ci-dessous le bien fondé de ce choix mais avant tout, on peut constater déjà d'un seul regard plusieurs caractéristiques qui justifieront le traitement mathématique – d'ailleurs élémentaire – qui suivra :

- dans chaque cas, on trouve comme on l'avait bien présumé un effet – parfois important – de **l'adsorption** initiale,
- dans chaque cas, les points expérimentaux suivent « raisonnablement » une courbe moyenne, pour la plupart à moins de 10% près sans conteste (ceux qui *de visu* violent ce principe ont été -indiqués à l'aide du symbole 0),
- l'allure générale de ces diverses courbes est « étonnamment » semblable et rappelle – en les prolongeant jusqu'à l'axe des abscisses – la courbe théorique.

De là à imaginer que l'effet de l'adsorption initiale consiste tout simplement à « avancer », sans autre modification, l'exhalation - soit à faire subir à la courbe théorique une simple translation « arrière » de telle manière qu'elle passe par la valeur de l'exhalation « initiale » - (exhalation mesurée sans stockage préalable en cellule fermée), il n'y a qu'un pas que nous franchissons pour fournir la première thèse du présent travail.

Remarque. Avant d'explicitier la formule exacte, signalons que dans chaque cas, étant donné l'allure exponentielle de la loi, nous avons superposé à la distribution « complète » des valeurs d'exhalation (de 0 à 30 jours), le début de la distribution selon une échelle temporelle dilatée (d'un facteur 5). Ceci permet de mieux juger, du premier coup d'œil, de l'adéquation de la thèse proposée.

⁵ Etant bien entendu qu'au fur et à mesure des disponibilités, ces mesures seront recommencées selon le protocole standard.

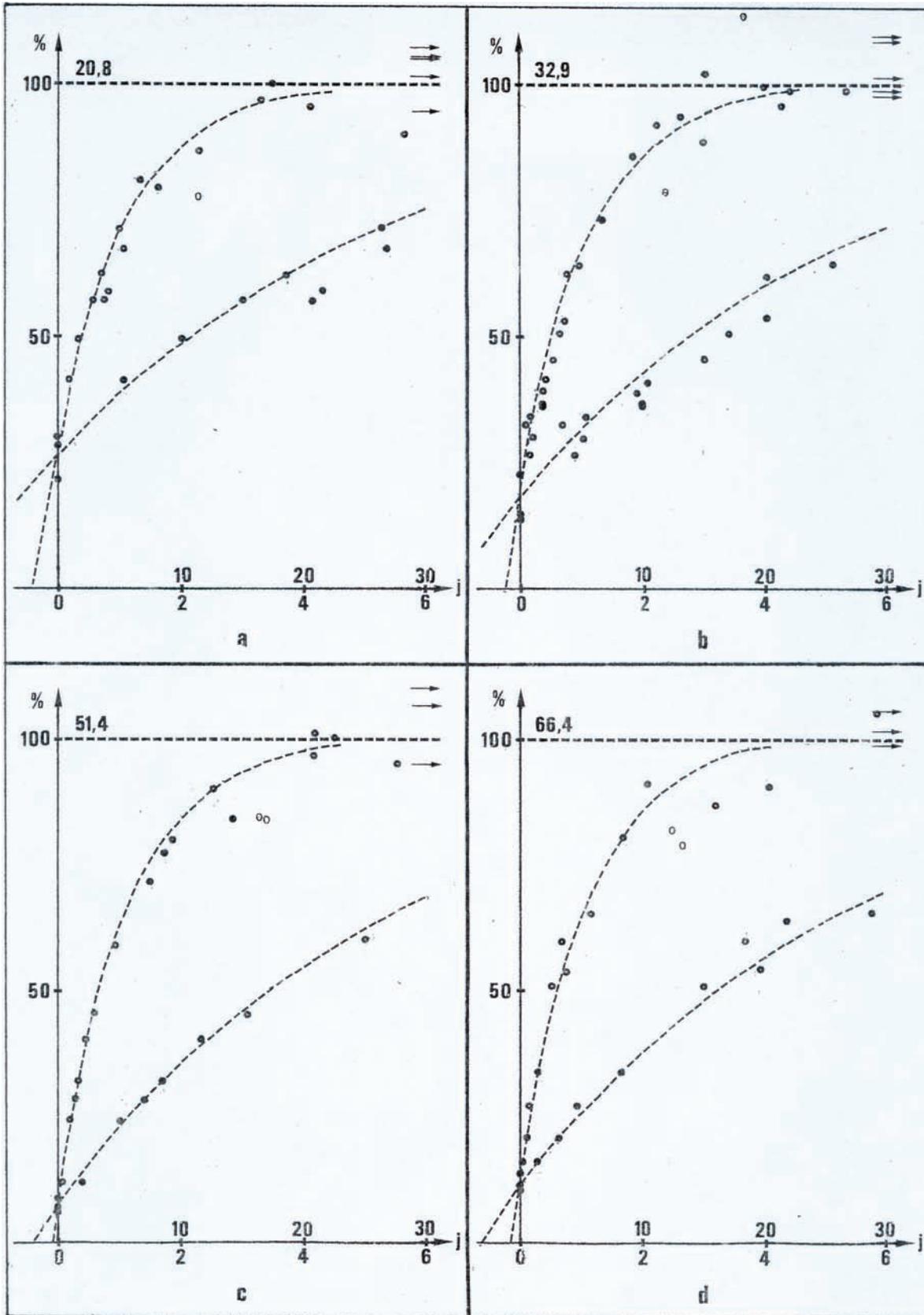


Figure 2.10.a. Exhalation [en % de la valeur moyenne d'équilibre séculaire (indiquée sur chaque graphe au niveau 100%)] en fonction de la durée de stockage des échantillons.

- a. argile termitière ocre de Lubumbashi (ATLO);
- b. minerai de fer de Châtillon (FL);
- c. phosphate de la Malogne (PhM);
- d. schiste noir de Petit-Thier (PT).

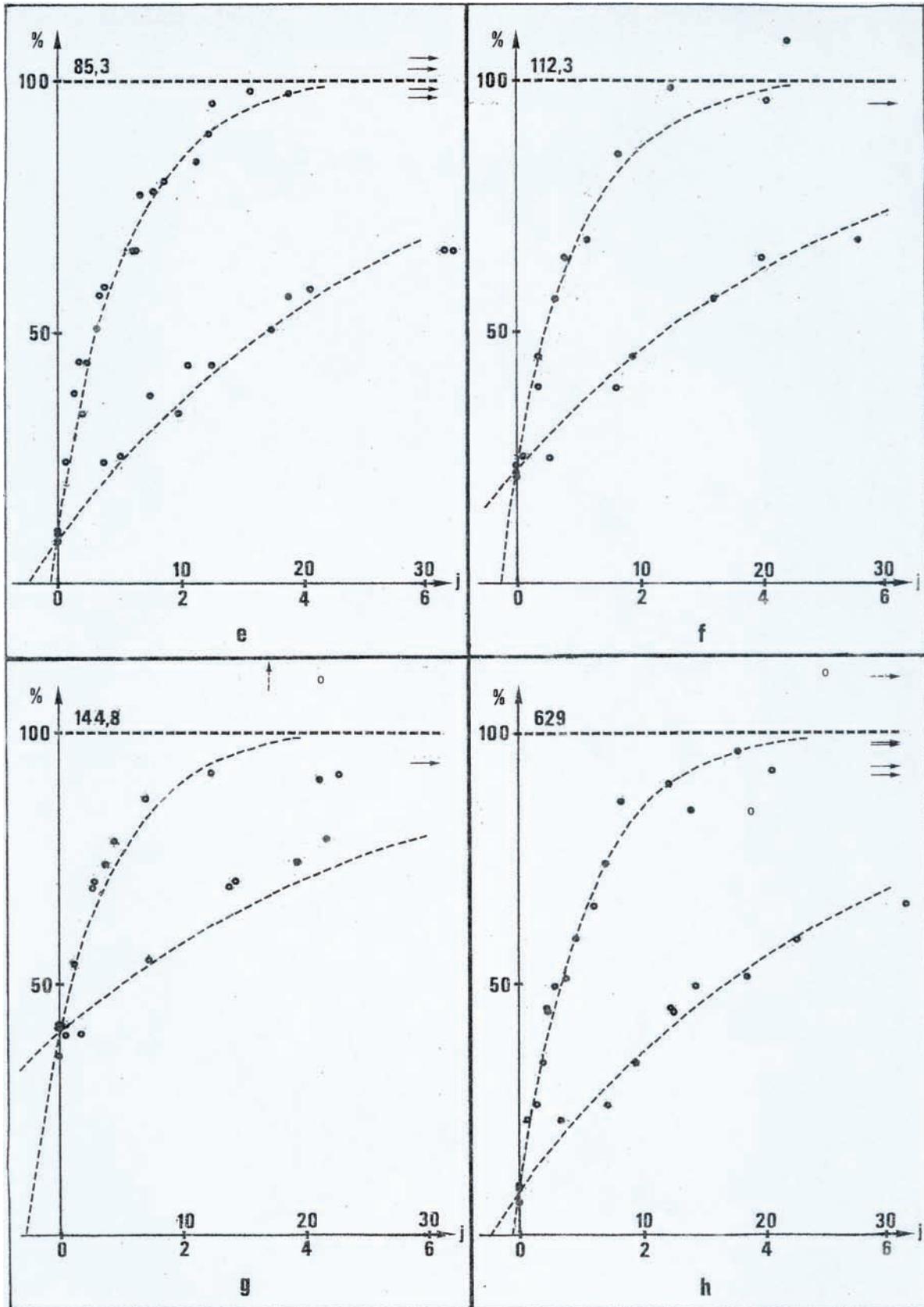


Figure 2.10.b. Exhalation [en % de la valeur moyenne d'équilibre séculaire (indiquée sur chaque graphe au niveau 100%)] en fonction de la durée de stockage des échantillons

- e. schiste noir de Malmédy-Waimes (M);
- f. arène granitique de Calvi- grotte des chauves souris (AGCS);
- g. granite de La Clarté (Bretagne Nord) (GLC);
- h. dépôt rouge ferrifère d'Arumont (DRA).

Explicitation de la loi effective d'exhalation des échantillons pulvérulents.

Nous désignerons par t la durée de stockage de l'échantillon en cellule fermée (depuis l'instant de fermeture jusqu'à la mise en contact avec le circuit de mesure) et par t_0 la durée évoquée dans l'expression de la thèse ci-dessus, à savoir le temps qu'il faut « remonter » pour trouver l'origine de l'exhalation équivalant à un échantillon sans adsorption initiale).

De plus, nous tenons compte qu'une durée de 4,5 heures s'écoule entre la mise en communication avec le circuit de mesure de la cellule contenant l'échantillon et l'« instant médian de la période de prise de mesure » (3 heures d'établissement de l'équilibre + 3 heures d'enregistrement selon notre protocole).

La formule traduite par la courbe « idéale » (sans effet d'adsorption initiale) de la figure I.4 s'écrit évidemment:

$$N_i = N_s (1 - e^{-\lambda t}) = N_s (1 - e^{-t/\tau})$$

avec :

- N_i : indication (idéale) de l'appareil à l'instant t
- N_s : indication à l'équilibre séculaire
- λ : probabilité de désintégration du radon
- τ : espérance de vie du radon
(= 5,52 j = 132,5 h)

La formule effective (tenant compte de t_0 et des 4,5 h supplémentaires) quant à elle se déduit simplement de la précédente en y incluant la translation temporelle correspondante :

$$N = N_s \left(1 - e^{-\frac{t+t_0+4,5}{\tau}} \right)$$

(avec t , t_0 et τ exprimés en heures)

Comme explicité plus haut, si l'on veut obtenir la valeur de l'activité volumique unitaire à partir de l'indication de l'appareil, il suffit d'appliquer la formule de conversion citée :

$$A \text{ (Bq/ m}^3 \cdot \text{kg)} = N \text{ (Bq/m}^3) / 50$$

Remarque. On déduit immédiatement de la formule effective que t_0 ne dépend que de la valeur de l'activité initiale ($t = 0$) relative rapportée à la valeur séculaire selon :

$$\frac{N_0}{N_s} = 1 - e^{-\frac{t_0+4,5}{\tau}}$$

(avec t_0 et τ exprimés en heures)

la courbe complète ne dépend quant à elle que des 2 paramètres N_0 et N_s (ou évidemment A_0 et A_s , selon ce que l'on veut exprimer).

3. Le radon dans l'air

Ce sujet a été abondamment cité dans la littérature – surtout de vulgarisation – essentiellement au vu de son impact sur les mesures dans les habitations et les lieux de travail ou de séjour. Mais peu d'études d'intérêt directement pratique ont été effectuées de manière quelque peu détaillée, c'est à cette tâche que nous nous sommes attelés et nous aborderons ici quelques aspects de ce sujet ayant fait l'objet d'études particulières de notre part.

3.1. Variabilité de l'activité sur longue durée

On connaît l'extrême variabilité des mesures d'activité dans l'air en fonction des conditions atmosphériques du moment : pression, température et humidité relative. Ce fait est a priori normal puisque le radon émane des roches où une bonne part de ce gaz est maintenue par adsorption vu la porosité propre de celles-ci et l'humidité résiduelle elle-même adsorbée et en équilibre avec l'atmosphère ambiante. De plus, la part de radon, comme de tout autre gaz d'ailleurs, qui vient des profondeurs du sous-sol à travers les fissures des roches du soubassement dépend évidemment de l'« accessibilité » directe de celles-ci et à ce titre peut être tributaire de contraintes aussi diverses (à court et à long termes) que la température ou l'effet de marée terrestre (dilatation-contraction des roches), de la pluviosité (eau de remplissage), de la ventilation naturelle (courants d'air eux-mêmes tributaires des phénomènes d'inversion de température)⁶.

La figure 3.1.a reproduit l'évolution de l'activité mesurée en continu pendant 2 mois, à quelque 4 m sous le niveau du sol au fond d'une ancienne galerie subhorizontale d'extraction du cotricule située sur le territoire de Regné et ce grâce à la très aimable autorisation de son propriétaire M. Célis. On peut constater sur la figure que l'exhalation du radon semble au cours du temps très « capricieuse » : elle évolue dans le cas présent entre quelques dizaines et quelques milliers de Bq/m³, les transitions – brutales – se produisant le plus souvent d'un jour au lendemain. On observe des périodes caractéristiques : plusieurs jours à bas niveau, de longues durées à haut niveau et des zones d'instabilité notoire où les oscillations journalières passent pendant plusieurs jours d'affilée d'un niveau bas à un niveau très élevé.

⁶ Communication privée par Camille Ek et Jean Godissart.

La figure 3.1.b reproduit des extraits d'un enregistrement de très longue durée (plurimensuelle) d'exhalation de radon à la sortie d'un puits profond dans la grotte de Ramioul, réalisé dans le cadre d'une étude systématique en cours⁷.

On peut résumer ces enregistrements en disant que « tout peut se rencontrer », on comprend dès lors qu'une mesure qui se veut représentative de l'activité d'une région doit être, comme nous l'avons signalé plus haut, une « mesure intégrale » ou pour mieux dire une « mesure moyennée sur plusieurs mois » et c'est bien ainsi que procèdent les organismes de surveillance patentés. On notera d'ailleurs qu'au vu des différences considérables pouvant exister par exemple entre les exhalations estivale et hivernale, même les études les plus soignées doivent être considérées avec un maximum de circonspection.

3.2. Variations nyctémérales de l'activité

3.2.1. Mesures à l'intérieur d'une habitation

La figure 3.2 reproduit l'évolution nyctémérale enregistrée dans une habitation sur une période de plusieurs jours. Il s'agit d'un enregistrement effectué en Corse à la station de recherches océanographiques de Stareso dans une vaste pièce de séjour, porte et fenêtre closes.

L'intérêt particulier réside ici essentiellement dans le fait que non seulement l'habitation se trouve sur terrain granitique donc très émissif mais encore qu'une importante source de radon se trouve dans la pièce « auscultée » elle-même car celle-ci est dotée d'un « coin cuisine » comportant un plan de travail avec dossier de plusieurs mètres en granite très décoratif mais également très émissif. Deux détecteurs opèrent ici simultanément, l'un est installé sur le plan de travail, l'autre se trouve au même niveau à 1 mètre de distance.

3.2.2. Mesures « en extérieur »

L'investigation est menée dans le jardin de la Station Stareso qui est, du point de vue pédologique, entièrement artificiel : de l'arène granitique mélangée à des déchets végétaux, du maquis pour la plus grande part, ainsi qu'à du compost local ou apporté, constitue la couche arable déposée sur une surface aplanie (horizontale) sur le flanc assez abrupt (quelque 45°) du socle granitique.

⁷ C. Ek, J. Godissart, H. Vanderschueren.

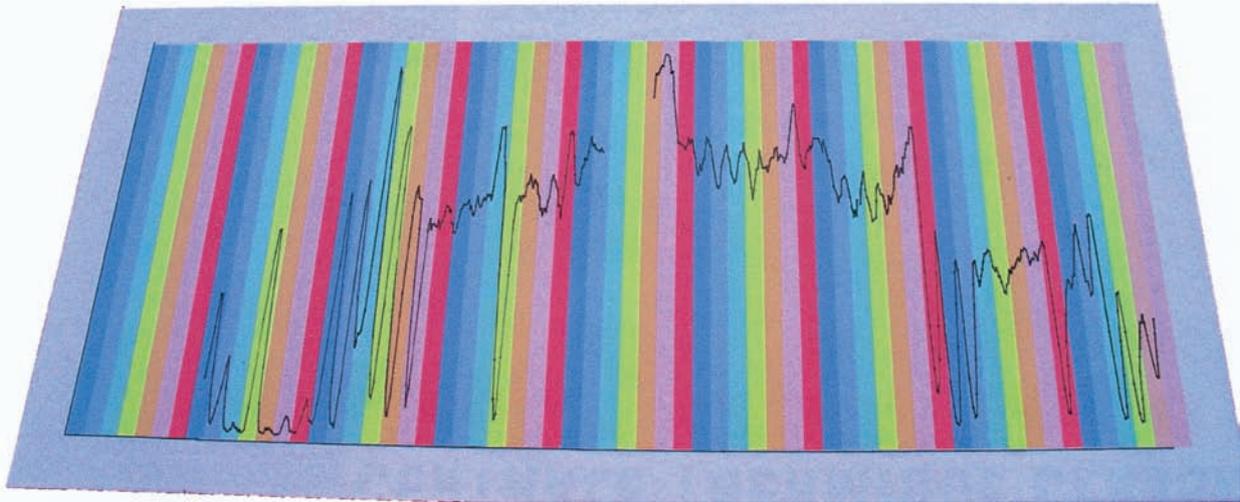


Figure 3.1.a. Activité mesurée pendant 8 semaines (chaque bande colorée correspond à une journée) dans une galerie d'extraction du coticule à Regné, avec l'aimable autorisation de Monsieur M. Célis (propriétaire, géologue et artisan du coticule à Sart).

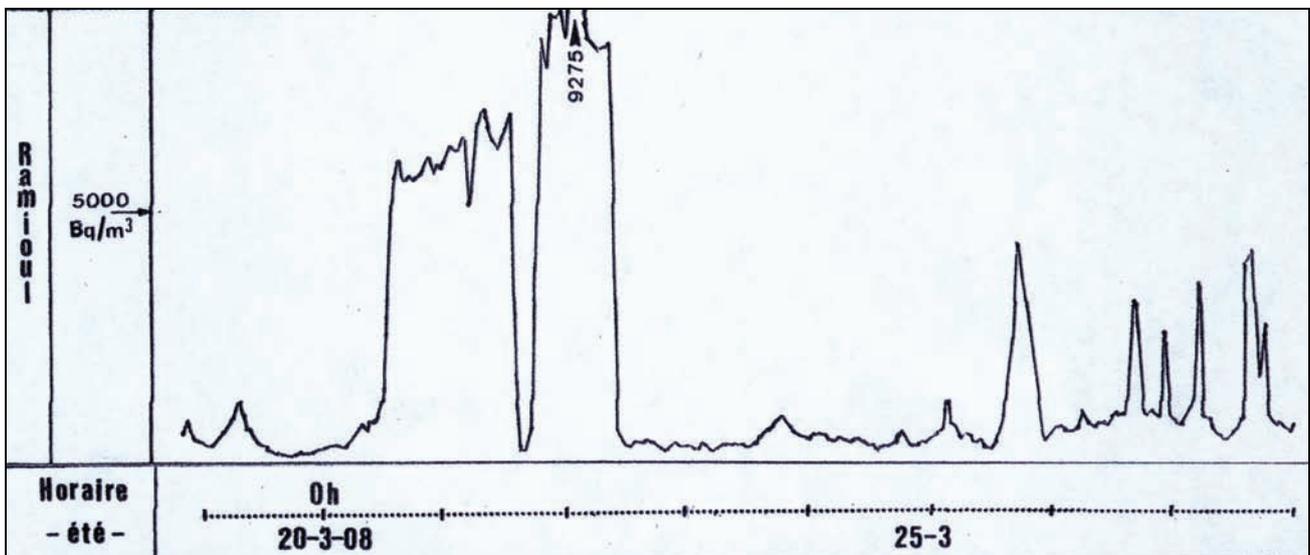


Figure 3.1.b. Extraits choisis dans l'enregistrement permanent des moyennes horaires de l'exhalation du radon à la sortie du puits profond de la grotte de Ramioul (étude en cours).

Cet aspect des choses est intéressant quant aux résultats obtenus: l'exhalation provient pour une part de l'arène elle-même mais également du socle sous-jacent pour lequel elle constitue à la fois une voie de passage peu reluctante mais aussi un lieu poreux de stockage partiel par adsorption.

La mesure est donc ici – “comme toujours” est-on tenté d'ajouter – la résultante de cet ensemble de contributions et interactions (une mesure dans un sous-sol ou vide ventilé d'une maison d'habitation dépend elle aussi bien évidemment non seulement de la géologie mais également de la pédologie du lieu).

L'appareil utilisé dans ce cas est le Radim autonome (batterie) et la mesure est effectuée sous « cloche » (en

fait un aquarium de la station de recherche) et à l'abri du rayonnement solaire direct intense et pratiquement permanent à l'époque des mesures (Fig. 3.3).

La figure 3.4 reproduit l'évolution de l'exhalation de radon par le sol. On y a fait figurer les enregistrements des évolutions concomitantes de la température et du taux d'humidité relative.

3.2.3. Mesures en cavité naturelle

La figure 3.1.b montre qu'occasionnellement l'évolution nyctémérale « classique » se manifeste clairement même dans ce contexte. C'est l'une seulement des diverses manifestations caractérisant un tel site.

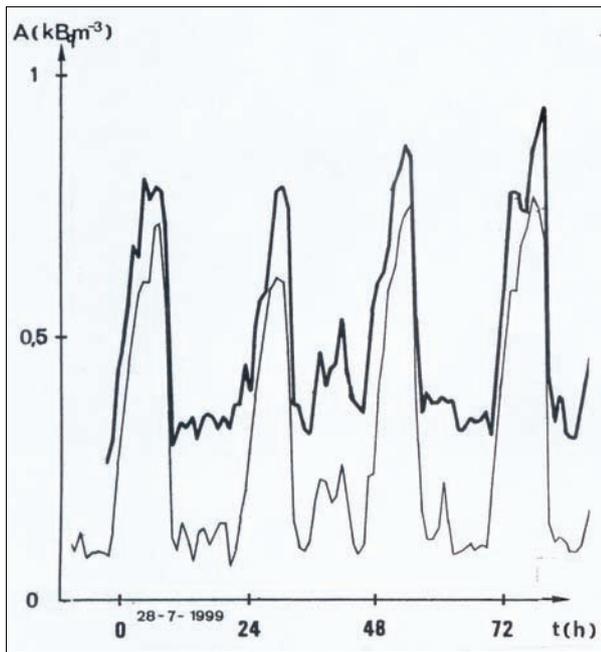


Figure 3.2. Evolution nyctémérale de l'exhalation mesurée en habitation.
 Courbe en traits gras : détecteur placé sur le plan de travail (cuisine) en granite.
 Courbe en traits fins : détecteur placé à 1 m du plan de travail, au même niveau.



Figure 3.3. Installation de mesure de l'exhalation par le sol (à l'abri du rayonnement solaire direct).

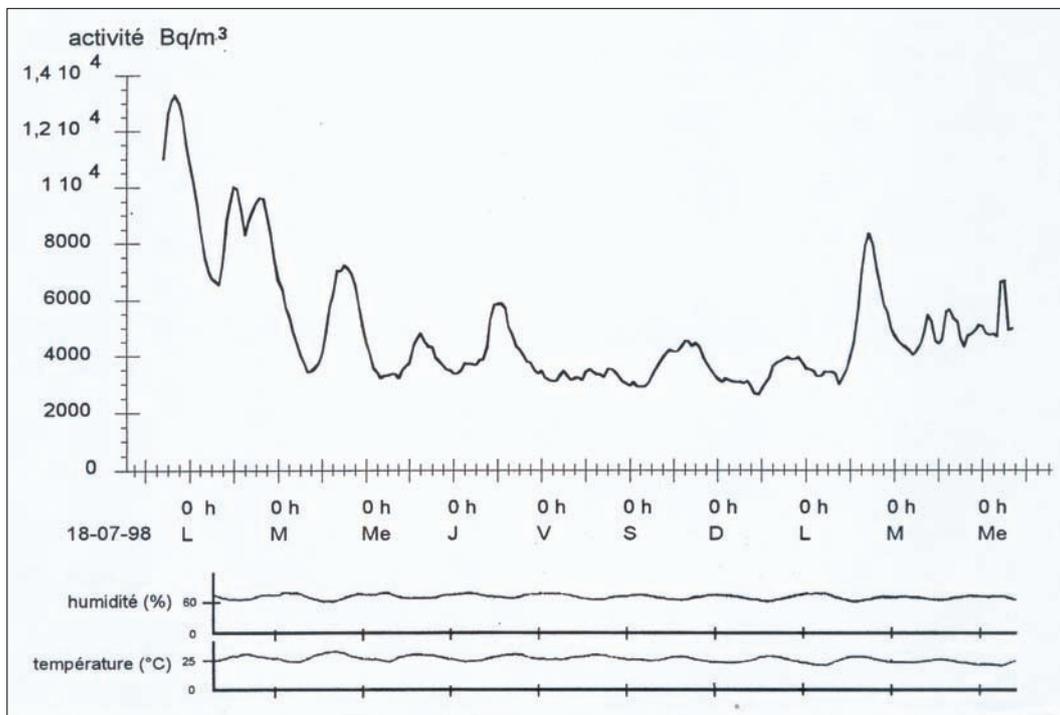


Figure 3.4. Evolution nyctémérale de l'activité mesurée en extérieur.
 Lieu : jardin de Stareso, sol d'arène granitique et de limon pauvre sur socle granitique.

3.3. Etude particulière : évolution climatique

Une étude systématique visant à simplement illustrer l'influence d'une transition climatique a été entreprise sur la presqu'île de la Revellate.

A quelques dizaines de mètres au-dessus du niveau de la mer, existe sur la face ouest de la presqu'île une grotte, qui s'est révélée d'un intérêt considérable à plusieurs points de vue pour nos recherches. S'ouvrant par une faible anfractuosité dans le flanc très abrupt de la montagne, non repérable de la terre ferme et très peu visible de la mer, elle n'est pratiquement connue que des autochtones et des résidents de notre station. Jadis baptisée "grotte des chauves-souris" par les marins-pêcheurs (ils utilisaient comme amorces les déjections de ces chiroptères, qui ont aujourd'hui déserté cet habitat), elle est d'un accès difficile et d'une conformation très intéressante pour notre étude.

En effet, non seulement son ouverture est petite devant les dimensions de la grotte mais elle est de plus située au sommet de la cavité (à la manière du soupirail d'une cave) ce qui est pour nous doublement intéressant.

La figure 3.5 montre schématiquement la conformation générale très particulière de la grotte, qui nous a permis la mesure in situ : on a situé sur le schéma l'appareil de mesure (M), l'entrée " (E) et les stalactites S et D (en draperies et évidemment de nature siliceuse).

Cette conformation est très intéressante pour l'étude de l'exhalation in situ du radon car, elle comporte un palier situé pratiquement à mi-hauteur, bien abrité par la paroi faciale, et non en vue directe de l'ouverture ce qui permet, en plaçant l'appareil (M sur la figure) sur le sol de ce palier de mesurer valablement l'activité du radon ambiant dans les conditions naturelles.

Cette conformation est aussi très favorable pour la récolte des échantillons d'arène à analyser en laboratoire. Au cours des âges, la paroi (gauche), constituée d'un granite leucocrate, a subi l'érosion éolienne marine et s'est donc lentement désagrégée.

Il en résulte un amoncellement considérable d'arène (plusieurs centaines de kilos) qui séjourne en un monticule bien abrité des éléments par la paroi faciale (repéré A sur la figure). Ce matériau n'a, depuis son dépôt, subi, semble-t-il, d'autre outrage que celui résultant de la visite des lapins! Plusieurs dizaines de kilos de cette arène ont donc été patiemment extraits et remontés "à dos

d'homme" le long des pentes abruptes afin d'être tamisés au laboratoire de la Station puis expatriés pour être caractérisés tant du point de vue émanation du radon que du point de vue géochimique.

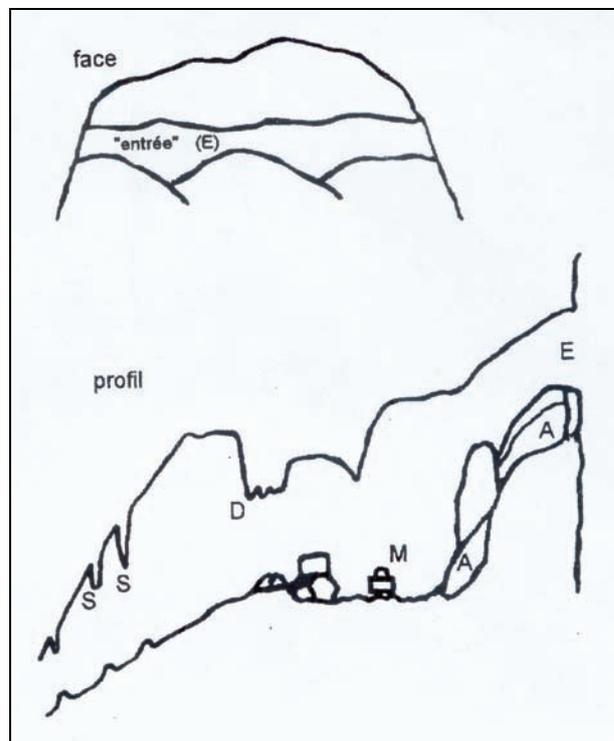


Figure 3.5. Grotte des chauves-souris. Schéma montrant la conformation et les particularités locales : E : « entrée », A : arène, M : mesure, S et D : stalactites silice (largeur en « façade » d'environ 2,50m).

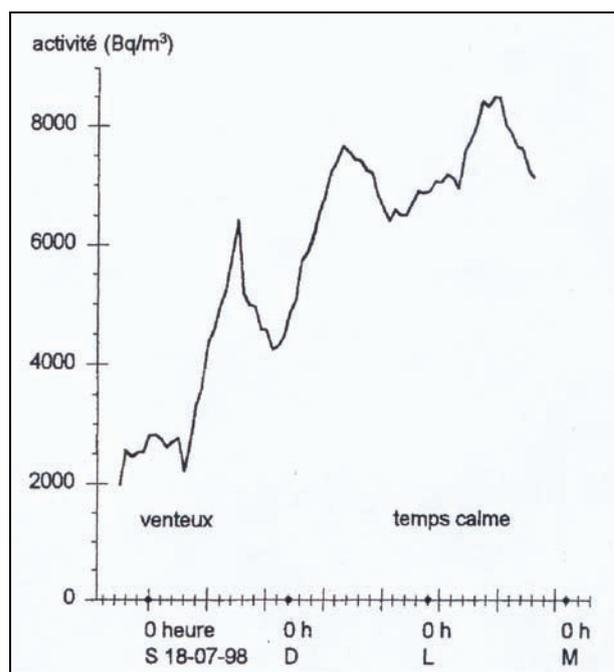


Figure 3.6. Grotte des chauves-souris. Mesure effectuée au niveau du palier.

On peut noter sur la figure une particularité de cette *anfractuosité* (terme certainement mieux indiqué que celui de *grotte*) dont le fond au moins semble bien révéler qu'elle a été produite par une faille ou à tout le moins par une *fracture* locale.

La figure 3.6 reproduit une partie de l'enregistrement effectué qui comporte deux périodes au cours desquelles les conditions météorologiques très différentes ont évidemment conduit à des niveaux moyens d'activité considérablement différents dont l'interprétation est aisée.

3.4. Etude de la diffusivité libre du radon : détermination de l'efficacité d'aération d'un local

Une étude systématique a été entreprise en laboratoire afin de chiffrer l'efficacité (par la vitesse et le taux de réduction de l'activité) de l'évacuation du radon d'un réservoir, préalablement clos et en quasi équilibre séculaire (radon 222 – radium 226), à partir de l'instant où on le met simplement en communication (ouverture d'un orifice calibré) avec l'espace libre « infini » environnant. On étudie l'évolution des 2 paramètres en cause en fonction du diamètre de l'orifice du réservoir. Le but est de mettre en évidence – en la quantifiant – la grande diffusivité du radon, remarqu e dès les premières études sur ce gaz, comme en atteste l'assertion de A. Berget (1907) :

« *Ce gaz se propage même à travers des tubes capillaires et des fissures imperceptibles* ».

A noter que l'on sait d'ailleurs depuis, – contrairement cette fois à ce que cet auteur affirmait aussi – que le radon traverse assez facilement certains matériaux solides tels le caoutchouc et certains polymères (le silicone et le polyéthylène basse densité notamment) ce qui oblige à prendre des précautions drastiques pour la réalisation de conduits souples, par exemple dans la méthode de mesure principale faisant l'objet du présent travail (appareil Alphaguard: obligation d'utilisation de tuyaux en tygon[®]).

3.4.1. Protocole des essais réalisés

Source et « réservoir »: dépôt solide de radium (solution étalon de chlorure de Ra, déposée sur coupelle en acier inoxydable et «  vapor e » à 400 C) installé à demeure dans un réservoir en polyéthylène H.D.  pais d'une contenance de 550 litres, hermétiquement fermé jusqu'à établissement

raisonnable de l'équilibre séculaire (soit 6 semaines). L'obturation est réalisée à l'aide d'un couvercle muni de clapets circulaires calibrés permettant à volonté la mise en contact avec l'atmosphère ambiante.

Niveau d'activité initiale: afin d'obtenir des résultats significativement transposables en pratique, la source de radium 226 choisie fournit dans le réservoir à l'équilibre une activité de 1,6 kBq/m³ de radon 222. Ceci correspond à une valeur qui en pratique justifierait une rémédiation telle qu'envisagée (simple aération).

Méthode de mesure : l'appareil utilisé est un Radim modifié, alimentation secteur, séparation sonde et afficheur (mesure et stockage des résultats).

3.4.2. Résultats expérimentaux

La figure 3.7 montre la décroissance de l'activité volumique dans le réservoir pour 2 diamètres différents de l'ouverture : 50 et 120 mm.

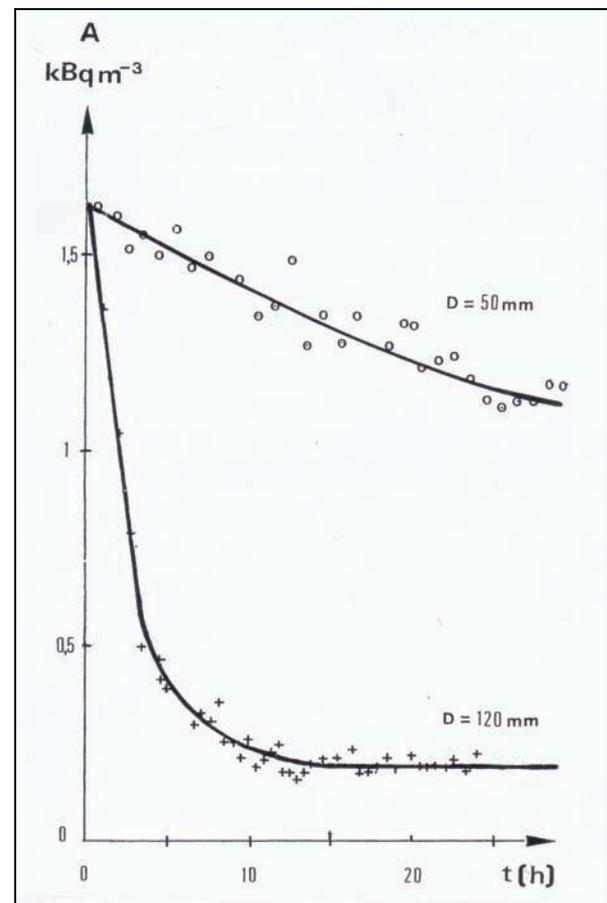


Figure 3.7. Exemples de décroissance de l'activité volumique dans le réservoir pour 2 diamètres différents de l'ouverture : 50 et 120 mm.

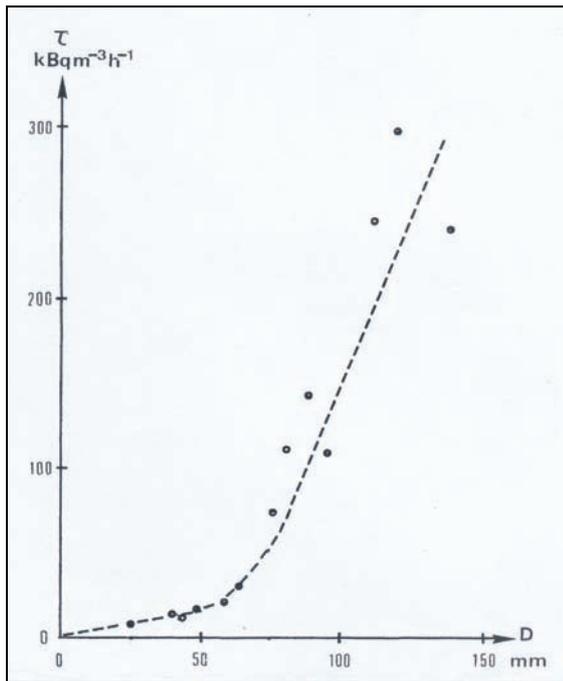


Figure 3.8. Taux initial de décroissance de l'activité volumique (ou pente à l'origine de la courbe) en fonction du diamètre de l'orifice

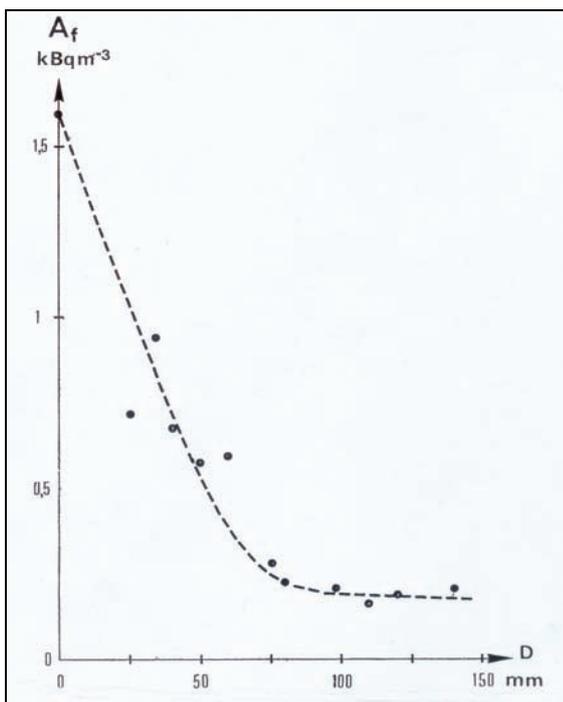


Figure 3.9. Activité volumique finale dans le réservoir en fonction du diamètre de l'orifice.

Les figures 3.8 et 3.9 présentent, en fonction du diamètre de l'orifice, respectivement le taux initial de décroissance de l'activité volumique (ou pente à l'origine de la courbe) dès ouverture du réservoir et l'activité volumique finale ou résiduelle dans le réservoir.

3.4.3. Interprétation des résultats

Les figures 3.8 et 3.9 sont directement édifiantes, elles révèlent 2 domaines aux propriétés essentiellement différentes de part et d'autre d'un diamètre de l'ordre de 80 mm. En deçà de ce seuil, la vitesse initiale d'évacuation croît faiblement et à peu près linéairement tandis qu'au-delà du seuil, elle s'accroît considérablement. Corrélativement l'activité résiduelle diminue d'abord progressivement jusqu'à une valeur – très faible – qui ne se réduit plus significativement au-delà de cette valeur-seuil.

En conclusion, on tire de la présente expérience un enseignement pratique significatif pour ce qui concerne les techniques de remédiation. Sous réserve de vérification dans d'autres conditions expérimentales (volume de chambre, activité initiale,...), on constate qu'il existe une **valeur critique** pour le diamètre de l'orifice à préconiser pour une aération naturelle : **un diamètre de l'ordre de 80 mm** semble donc idéal. Le gain pour une section plus grande n'apparaît pas significatif tandis que les inconvénients ne peuvent que croître : dissipation thermique prohibitive par exemple dans le cas d'une cave-chaufferie ou d'une pièce de séjour.

Scientifiquement parlant, l'examen des courbes traduisant l'évolution de l'activité dans le réservoir révèle l'existence de **2 régimes extrêmes différents** avec passage progressif de l'un à l'autre.

Pour un orifice de faible section, l'évolution est régie, au moins dans sa première partie, par une loi du type exponentiel :

$$A = (A_i - A_f) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + A_f$$

où A_i et A_f désignent les activités volumiques initiale et finale respectivement et dont la pente (ou taux de décroissance à l'origine) est évidemment donnée par :

$$\frac{A_i - A_f}{T}$$

La courbe supérieure de la figure 3.7 (diamètre 50 mm) illustre ce cas.

D'un simple coup d'œil sur la deuxième courbe de la figure 3.7, au contraire, on constate un régime à très longue décroissance initiale pratiquement

linéaire jusqu'au voisinage du régime d'équilibre, très vite atteint.

3.4.4. Exemples caractéristiques de relevés sur sites particuliers

Station océanographique de l'ULg à Calvi. Dans une cave du phare de Calvi **creusée dans le roc granitique**, nous avons procédé à une mise en évidence de l'efficacité de la simple aération du local. Pour ce faire nous avons obturé – assez sommairement – pendant une quarantaine d'heures les issues de la cave centrale (un sas d'accès correspondant à une petite porte et un conduit de type cheminée vers le rez-de-chaussée) à l'aide de matelas de mousse synthétique puis réouvert la porte.

La figure 3.10 illustre l'évolution observée. En 3 heures, l'activité mesurée dans la cave passe de 5010 à 430 Bq/m³.

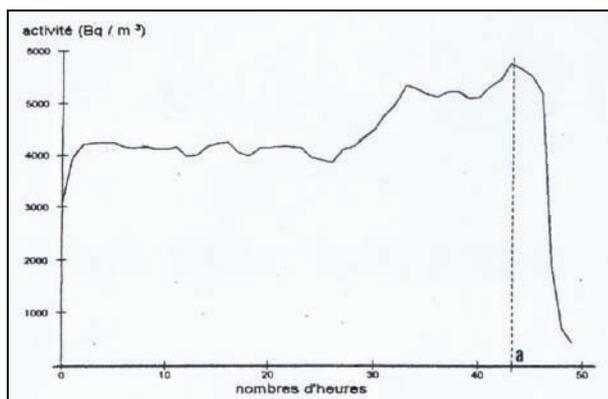


Figure 3.10. « Vidange » de la cave du phare de la Revellate (a : ouverture du sas).

Une variation aussi nette de l'activité en fonction des conditions d'échange avec l'environnement est particulièrement intéressante lorsqu'une démonstration doit être faite auprès de particuliers chez qui on est appelé à effectuer des mesures. Sans préparation spéciale, tout un chacun peut en effet devant un tel diagramme immédiatement appréhender l'efficacité de la simple aération ou de mesures de remédiation proposées.

Un cas très important, pour lequel une simple aération n'a pas suffi, est présenté dans le paragraphe suivant (Fig. 3.12).

Maisons particulières. Un cas « spécial » est ici rapporté, il illustre combien une idée, bonne a priori, peut être mal ou incomplètement comprise et conduire à des mécomptes en pratique.

Voulant éviter, pour son feu ouvert, de « consommer » l'air de la salle de séjour, un particulier chez qui nous fûmes appelé (villa dans la région d'Esneux), nous apprit qu'il en avait disposé la prise d'air dans son vide ventilé, lequel était directement creusé dans la roche (du schiste). L'idée lui en avait été suggérée à la lecture d'un prospectus publicitaire.

Après plus ample information, il s'avéra que ce dispositif était effectivement préconisé mais dans le cas de foyers-cassettes ce qui est effectivement a priori judicieux puisque, dans ces conditions particulières, l'air non consommé par la combustion – **et le radon qui a accompagné l'air prélevé au vide ventilé** – sont évacués par la cheminée.

La figure 3.11 montre directement ce qui résultait chez l'intéressé d'une mise en œuvre inadéquate du principe en question.

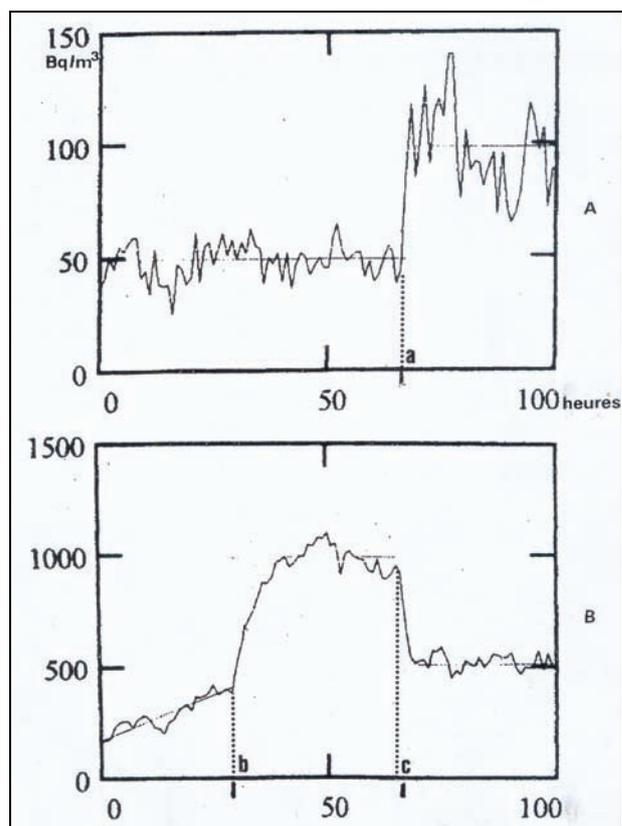


Figure 3.11. Evolution de l'activité (Amostrenne).

A au living (avec feu ouvert)

a : ouverture de l'arrivée d'air (venant du vide ventilé)

B dans le vide ventilé

b : obturation des bouches d'aération,

c : leur réouverture.

Après avoir obturé la prise d'air pendant plusieurs jours, nous avons enregistré l'activité dans la salle de séjour (dans les conditions d'occupation

normale) pendant quelque 2 jours puis réouvre la prise d'air : la figure montre que le taux passe en conséquence de 50 à 100 Bq/m³ !

Le verdict sans appel entraîna la conviction immédiate de l'intéressé.

3.5. *Illustration d'efficacité de la ventilation forcée*

Maison particulière

Dans une maison particulière d'une commune de la Province du Luxembourg, un niveau d'activité particulièrement élevé fut détecté (en 2002) par le Service-Radon de l'«Observatoire de la Santé» de la Province qui nous soumit le cas pour contrôle de l'efficacité des moyens de remédiation que le technicien de ce Service avait judicieusement préconisés.

Un petit soupirail permet une aération naturelle de la cave en cause (superficie faible de quelque 4 à 5 m². Une ventilation forcée avait été jugée nécessaire et il avait été suggéré d'utiliser le conduit de cheminée (à percer) qui atteignait le sous-sol en cause pour installer un extracteur.

La figure 3.12 reproduit l'enregistrement effectué dans le sous-sol de cette maison. On peut constater que l'aération seule fait chuter l'activité de moitié: avant l'instant marqué α sur le diagramme le soupirail est ouvert, entre α et β il est obturé, entre β et γ il est réouvert. Mais l'activité reste élevée.

La mise en route de l'extracteur (en γ) ramène l'activité à un niveau qui pour être encore élevé est néanmoins acceptable eu égard au fait que la salle

de séjour n'est pas directement au voisinage de la cave (une pièce annexe et le hall les séparent) et que celle-ci n'est plus elle-même utilisée (parce que d'un accès malaisé vu les transformations réalisées dans l'habitation).

A noter que le niveau mesuré dans le living était tout juste acceptable même avant la ventilation forcée (moyenne d'environ 200 Bq/m³).

Sites touristiques

Blégny-mine. Nous avons eu la chance d'être accueilli au Domaine touristique de Blégny pour effectuer des enregistrements d'exhalation de radon dans la mine accessible au public et cela avant l'automatisation complète des installations de contrôle et de régulation de la qualité de l'air.

A l'époque, une ventilation forcée renouvelait l'air périodiquement pendant les heures de visite et les prestations du service d'entretien.

La figure 3.13 montre suffisamment clairement l'efficacité (et l'utilité! – surtout pour les travailleurs évidemment qui peuvent être appelés à séjourner longtemps dans la mine –) de la ventilation.

Archéoforum de la Place St-Lambert à Liège. A la demande du Service de « Médecine du Travail de Bruxelles », de nombreux enregistrements ont été réalisés sur le site et les niveaux d'activité relevés en certains endroits particulièrement confinés ont conduit les instances responsables à faire réaliser une importante installation de conditionnement qui a d'ailleurs largement contribué à retarder l'ouverture du site au public.

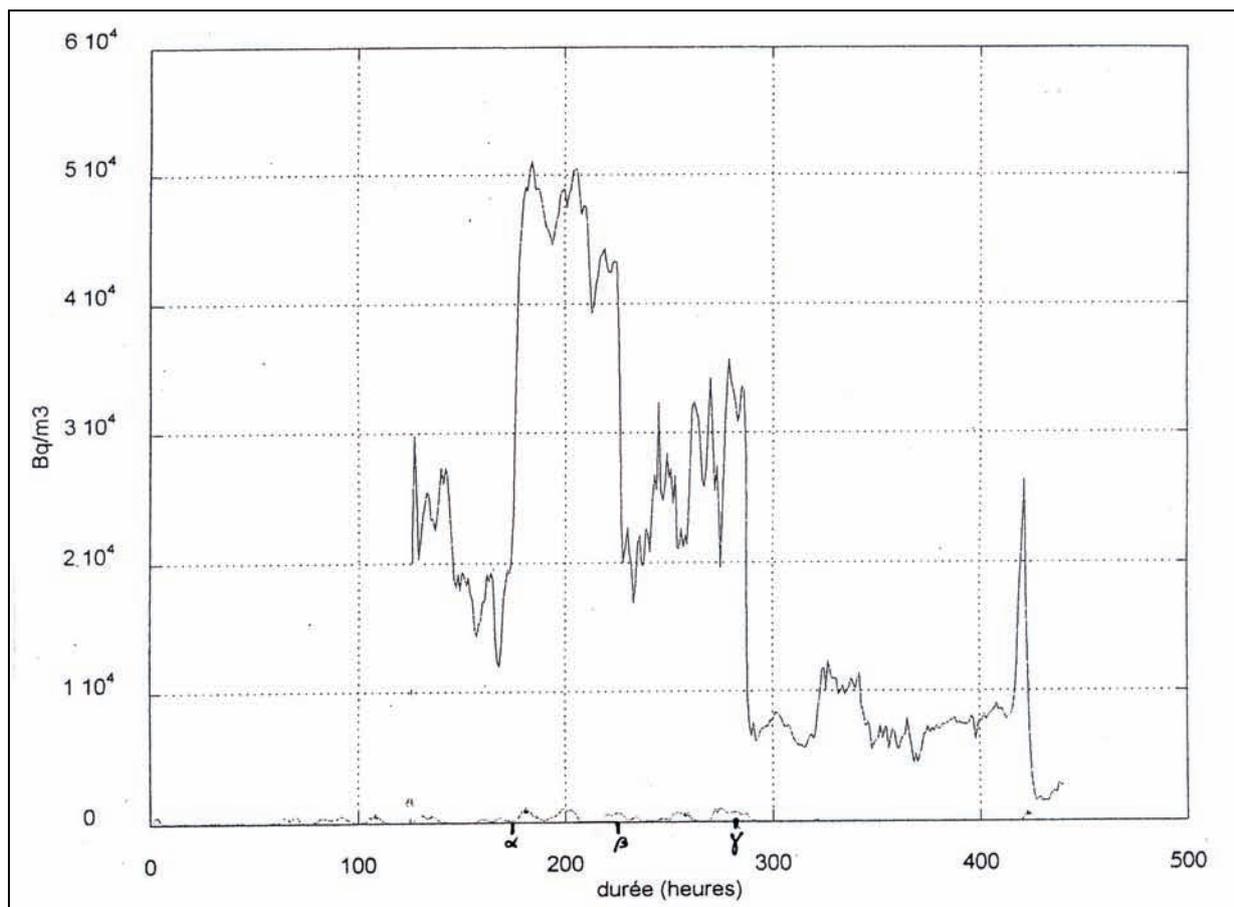


Figure 3.12. Activité au sous-sol et au living (maison particulière, Erezée)

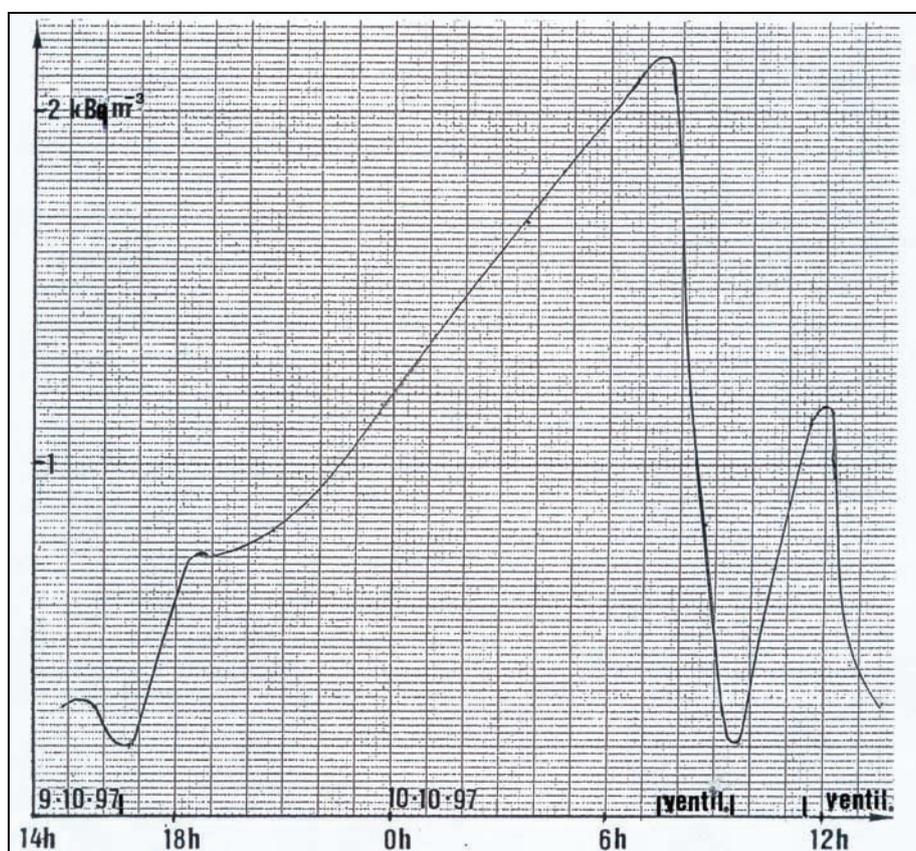


Figure 3.13. Activité dans la galerie principale de la mine de Blégny (-60 m).

3.6. Distribution du radon dans l'air calme

Une assertion courante veut que le radon, gaz beaucoup plus lourd que l'air (masse spécifique 222) « stagne dans le bas des locaux ».

C'est là une preuve de méconnaissance des propriétés des gaz qui a la vie dure.

Nous avons voulu en faire la démonstration expérimentale profitant de la sensibilité des mesures-radon et des facilités offertes par la conformation particulière des sous-sols du phare à la Station Stareso.

Les anciennes citernes à eaux de pluie et les caves du phare sont entièrement creusées dans la roche et les parois internes sont évidemment bâties en granite. Nous en avons profité pour effectuer une mesure en volume clos dans une petite cave centrale, (celle-là même dans laquelle ont été effectuées les mesures d'aération naturelle évoquées plus haut). Celle-ci est comprise entre les citernes (une petite ouverture – un regard – au niveau du plafond permettait le contrôle de ces dernières, et un “tunnel” ou “sas” au travers d'une paroi très épaisse est sa seule communication avec les autres caves, un ancien conduit vertical de type « cheminée assurait une communication avec le rez-de-chaussée.

Ces diverses issues ont été obturées comme déjà évoqué (mousse synthétique) afin d'éviter tout déplacement d'air et d'isoler au maximum l'espace de mesure, les caves jointives constituant ainsi un sas intéressant entre la cellule de mesure elle-même et “le monde extérieur”.

Le taux d'activité a été relevé pendant 24 h à 5 niveaux différents du sol au plafond (les mesures ont été effectuées dans le désordre comme il se

doit afin d'éviter l'artefact dû à toute évolution systématique de température, humidité ou pression).

La figure 3.14 où sont rapportés les résultats montre que l'effet de hauteur est négligeable malgré la masse spécifique élevée du radon.

Le fait a été vérifié en laboratoire. L'activité du radon exhalé par une masse d'arène granitique placée dans le fond d'une canalisation verticale fermée d'une hauteur de 5m (PVC épais, diamètre 30cm) révèle une évolution pratiquement synchrone et identique au sommet et au fond du conduit.

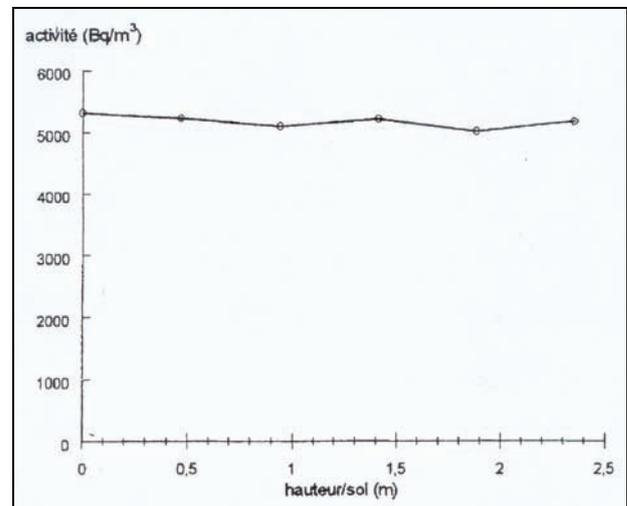


Figure 3.14. Distribution du radon en hauteur (cave granite).

4. Le radon dans l'eau⁸

4.1. Pourquoi du radon dans l'eau des sources?

Chez nous rares sont les sources dont l'eau ne contient pas de radon. Cela s'explique par le fait que cette eau provient fréquemment de nappes profondes ou de grande extension ou éloignées du point d'émergence. Dans tous ces cas, l'eau peut avoir stagné ou cheminé longuement sous terre avant d'émerger à l'air libre et a eu, de ce fait, le loisir de côtoyer divers types de roches contenant des composés uranifères soit en concrétions localisées (on pense au cas célèbre de la source du Plétrou à Visé qui assurait jusque dans les années 70, au moins en partie, l'alimentation de la ville), soit en répartition diffuse mais sur de grandes étendues.

Pratiquement tous les types de roches en effet contiennent de l'uranium. Ainsi en est-il surtout du granite – roche bien connue pour être la plus émissive en radon – qui en recèle surtout dans ses impuretés ou constituants mineurs dispersés dans ses intergrains, ainsi que dans ses micas (biotite et muscovite) dont la structure lamellaire est évidemment favorable « au stockage » de composés microscopiques *exotiques*. Dans ce cas, l'uranium et (ou) ses composés sont surtout stockés depuis la genèse de la roche. Mais on rencontre des composés uranifères aussi – et parfois en quantités comparables à celles trouvées dans les granites – dans les schistes notamment, dont la structure est également favorable au stockage de composés divers.

Dans ce cas, il s'agit le plus souvent de composés originellement solubles (uranium hexavalent) qui ont été mobilisés par l'eau et peuvent ainsi se retrouver dans divers sites où on ne les attendrait pas a priori mais où ils ont pu être adsorbés ou surtout immobilisés par précipitation - à cause d'un changement de milieu - en cours de pérégrination.

4.2. Le cas particulier des pouhons

Les pouhons⁹ constituent un cas particulièrement interpellant. Ils sont remarquables pour tout un chacun puisque l'eau parfaitement limpide qui sourd du sol laisse sur son passage, dès le point d'émergence, un dépôt ferrugineux d'une très vive

coloration rouge-orange à rouge-brun selon les cas (Fig. 4.1). Mais cet attrait, visible, s'accompagne d'une manifestation plus sournoise : le dépôt révèle en effet une activité radon qui peut être considérable.

Les eaux fagnardes de surface ont cette propriété remarquable d'être très réductrices, ce qui explique entre autres la non putréfaction des végétaux morts dont les résidus se superposent de génération en génération pour constituer la tourbe.

En s'infiltrant dans le sol, ces eaux peuvent dissoudre du fer – notamment – contenu dans les roches qu'elles côtoient : ce composé dans lequel le fer est à l'état *dissous* est incolore. Lorsque ces eaux reviennent au contact de l'atmosphère, ce composé s'oxyde quasi instantanément en un composé insoluble et vivement coloré.

Ce produit insoluble qui trahit par sa coloration typique la présence du fer dans l'eau des pouhons, trahit aussi, par l'exhalation du radon qu'il manifeste, à l'état sec au moins, la présence de radium (et uranium).

Particulièrement nombreux chez nous en Fagnes et en bordure des Fagnes, on en trouve également en région liégeoise (Wérister, Ramioul, Awirs, ...) et à l'étranger où certains sont célèbres (Source de Citrin dans le Val d'Aoste par exemple ou Fontaine d'Orezza en Haute-Corse dont les *dépôts rouges* sont impressionnants).

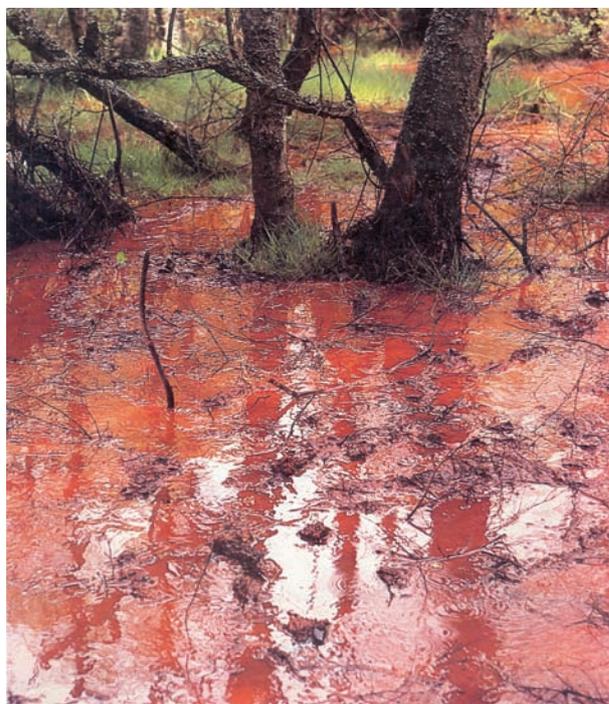


Figure 4.1. Pouhon de Bernister) à « L'Eau Rouge » (Photo J.-M. Groulard, Revue Hautes Fagnes n°2, 1988, reproduite avec l'aimable autorisation des intéressés).

⁸ Hommage au Prof. Eric Gérard, premier professeur « Mesures él. » à l'Institut Montefiore. Etude radon à Liège, dès la découverte de l'« émanation » par Marie Curie. « Mesure de la radioactivité dans les eaux de Spa et des environs » : E. Gérard, F. Fontaine, Bull. Scient. Assoc. Ing. El. (A.I.M.), Liège 1906.

⁹ Terme d'origine dialectale (wallon liégeois « pouhî » = puiser).

4.3. Exemples concrets illustrant le comportement du radon dans l'eau

4.3.1. Différence d'activité selon les conditions d'émergence

La teneur en radon d'une nappe aquifère dépend bien évidemment des particularités de la roche qui la contient, puisque c'est son radium qui « la nourrit » soit à partir de la roche, où il est resté emprisonné et se désintègre, soit par dissolution de lui-même ou d'un « ancêtre ». Mais la teneur en radon est aussi conditionnée, comme on l'a laissé entendre déjà, par les conditions d'ambiance. Les nappes captives étant sous pression hydrostatique et géostatique, la teneur y est supérieure à ce qu'elle serait à l'air libre. En conséquence les taux mesurés dépendent des conditions dans lesquelles on recueille les échantillons.

Nous avons eu la chance de « découvrir » un point d'émergence directe d'une source à moins d'un mètre du pouhon d'Arumont (région de Malmédy) qui se présente lui-même sous forme d'un puits affleurant alimenté par une source immergée. L'analyse chimique des 2 eaux confirme évidemment leur origine commune bien que les résultats des mesures d'activité soient notoirement différents vérifiant ainsi la remarque ci-dessus. En effet, l'eau du puits étant en contact avec l'atmosphère, un équilibre s'établit dans des conditions différentes de celle de la nappe captive et le radon, en surpression dans le sous-sol, « a le temps » de se libérer partiellement à l'air libre ce qui n'est pas le cas à l'émergence ponctuelle de la source voisine. Rien d'étonnant donc à ce que l'on mesure des activités notablement différentes :

400 Bq/l à la source
160 Bq/l dans le puits.

4.3.2. Evolution de la teneur en radon d'une eau de source conservée en flacon clos

A l'exclusion de celle des sources thermales, la température de l'eau à l'émergence est pratiquement toujours de l'ordre de 10 à 12°C, il s'ensuit que si l'on effectue des mesures espacées dans le temps sur une cohorte d'échantillons recueillis en même temps puis conservés dans des récipients clos que l'on stocke en laboratoire à température ambiante (environ 20°C), les mesures effectuées dans les premières heures correspondront à une température progressivement croissante et l'on obtiendra des mesures d'activité elles-mêmes en croissance - puisque le dégazage

est évidemment exalté par la température (penser à la bouteille d'eau gazeuse !).

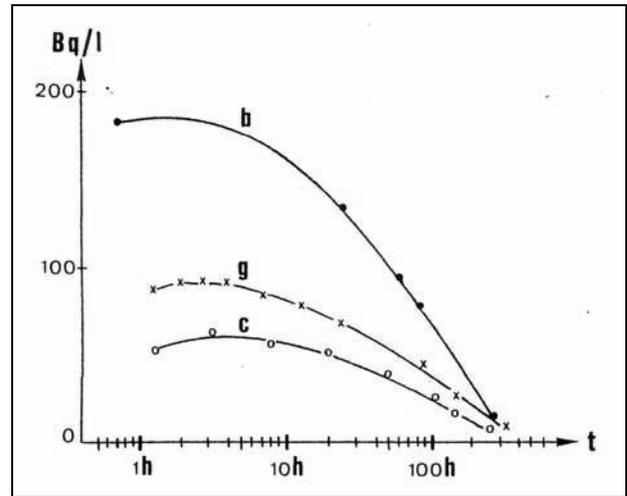


Figure 4.2.a. Evolution de l'activité mesurée sur des populations d'échantillons d'eau de diverses sources (sans dépôt-fer), b : source du village de Bihain, g : source du Ghaster - niveau d'Ovifat, c : source de Colonster, « captage du château ».

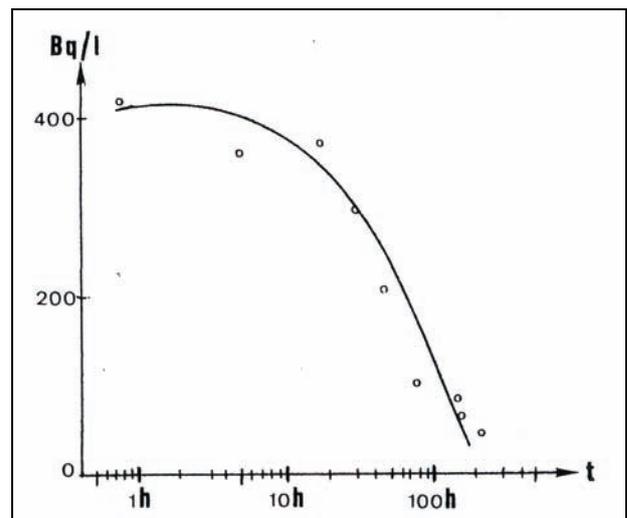


Figure 4.2.b. Evolution de l'activité mesurée sur une population d'échantillons d'eau provenant de la source (émergence) du pouhon d'Arumont.

Au fur et à mesure de l'écoulement du temps, par contre, l'activité mesurée ira en décroissant sous l'effet combiné d'une perte en radon : dégazage naturel progressif de l'eau dans le récipient stocké et désintégration du radon restant. C'est ce qui est montré à la figure 4.2.a qui rapporte les résultats de mesures effectuées sur l'eau de diverses sources de Wallonie.

On en déduit un fait d'expérience remarquable : il y a quasi compensation des 2 effets antagonistes en début de période de stockage. Cela signifie que l'on

dispose en fait d'un temps appréciable (plusieurs heures) après le prélèvement pour effectuer la mesure, sans conséquence vraiment significative. Que l'on songe à ce que cela sous-entend lorsque le prélèvement doit avoir lieu en haute montagne par exemple ou dans tout autre endroit d'accès malaisé qui exclut toute possibilité de mesure directe sur le site.

La figure 4.2.b montre le même effet obtenu à partir d'une eau très fortement gazeuse (et très riche en radon). On peut constater, on ne s'en étonnera guère, que dans ce cas la dispersion des résultats est assez grande ce qui montre qu'une plus grande prudence doit être apportée aux mesures et qu'un moyennage portant sur plusieurs résultats est souhaitable pour accroître le degré de confiance.

4.3.3. Distribution du radon dans l'eau en contact avec l'atmosphère

Des tests systématiques ont été effectués en divers endroits pour vérifier comment se répartit le radon dans une masse d'eau appréciable. Les mesures ont révélé une uniformité quasi parfaite de la dissolution du radon en eau calme et confirmé, en la précisant, l'active déperdition en eau agitée.

Distribution en profondeur

Des mesures effectuées à divers niveaux dans le puits (profondeur de 3,15m, parois de schiste) du « Bois d'Hestré » à Bihain ont sensiblement donné la même valeur.

Ces mesures ont été réalisées en automne (le 29 novembre 2000) lorsque l'alimentation du puits - affleurant - était suffisante pour que celui-ci soit « débordant » :

0,65 m de la surface : 164 Bq/l

1,50 m de la surface : 159 Bq/l

2,80 m de la surface : 161 Bq/l.

Il est remarquable de constater que des mesures effectuées en été (le 7 août 2001) alors que le puits n'est pratiquement plus alimenté (niveau à 1,50 m seulement), révèlent une activité en radon de 36 Bq/l. Ceci s'explique aisément par le dégazage et la désintégration naturelle du radon, plus efficaces que la réalimentation (d'ailleurs probablement imputable en cette saison pour une bonne part au schiste plutôt qu'à la source elle-même).

Distribution en surface

Des mesures systématiques ont été effectuées en divers points d'une « mare » remarquable au sud du ruisseau du Rolay dans la région de Bihain.

Cette mare, d'une profondeur moyenne d'environ 20 cm, d'une superficie de plusieurs m² et d'une limpidité remarquable, aboutit dans le ruisseau au courant assez vif et à la coloration brune traditionnelle des ruisseaux fagnards. La source, immergée, qui l'alimente est très faiblement gazeuse et est située à quelque 20 cm de la rive opposée au Rolay, au pied de la colline en rive droite du ruisseau.

La figure 4.3. schématise cette mare et situe, par l'indication des résultats, les points de récolte des échantillons d'eau qui ont été testés.

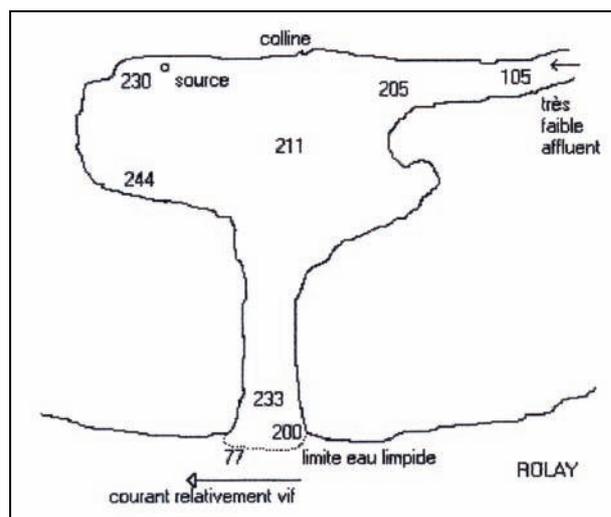


Figure 4.3. Illustration de l'uniformité de la concentration de radon en eau calme. Les valeurs d'activité sont indiquées aux endroits de mesure.

Déperdition du radon sous l'effet de « l'agitation naturelle » in situ d'une eau de source

La fontaine du village d'Ombret (Condroz) est alimentée par 2 sources émergeant sur le flanc de la « montagne », l'activité mesurée à la fontaine est nulle (au bruit de fond de l'appareil près), l'activité des sources est par contre importante : 110 Bq/l pour l'une d'elles, que nous avons étudiée spécialement.

La figure 4.4 précise les conditions d'écoulement à partir de la petite mare alimentée par la source immergée (débit faible d'environ 4 l/min). L'eau ruisselle en pente douce sur des cailloux et débris de végétation assurant sa turbulence et un contact important et renouvelé avec l'air ambiant.

Les résultats de la mesure de l'activité aux points a,b,c repris sur la figure valent respectivement :

110, 71 et 34 Bq/l.

On retrouve ici la concrétisation « sur le terrain » de la méthode de dégazage par agitation préconisée pour les mesures.

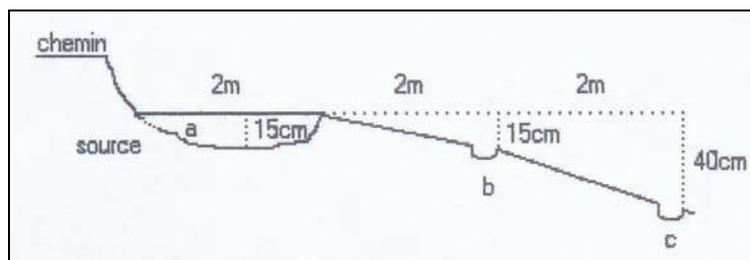


Figure 4.4. Configuration de l'un des 2 rus alimentant la fontaine du village d'Ombret (région de Huy) ;
b et c : cuvettes creusées pour recueillir l'eau sans remous.

Déperdition en parcours complexe

Un cas particulièrement illustratif a été trouvé lors de « l'étude radon » dans la zone de Vielsalm. Non seulement les teneurs en radon de l'eau y sont importantes mais encore la configuration du terrain (déclivité importante) et l'existence de 2 émergences très voisines et très différentes (un pouhon et une eau non ferrifère) permettent d'enrichir l'approche du comportement du radon dans l'eau dans diverses configurations pratiques.

C'est dans cette région – au nord de Vielsalm, exactement dans une propriété privée du Thier de Justice – que nous avons trouvé à ce jour (septembre 2008) le *record* de teneur en radon de l'eau souterraine (1220 Bq/l contre 390 Bq/l pour la source du pouhon d'Arimont, deuxième *performance nationale* à ce jour).

1) Puits-pouhon

Un puits affleurant (en fait un pouhon), creusé à la limite supérieure d'un pré en pente, comporte un trop-plein à 10 cm sous la surface du sol constitué d'un tuyau en PVC de 19m de longueur, enfoui dans la couche arable selon la plus grande pente du terrain et émergeant à la limite de séparation entre le pré et une pâture située en contrebas (dénivellation d'environ 1m).

L'eau limpide qui sort en permanence du tuyau de trop-plein dépose sur le sol, dès son point de chute, un important dépôt ferrifère puis s'enfonce dans le sol pour émerger à nouveau dans une petite mare permanente d'environ 1m de diamètre.

Nous reprenons ci-dessous les résultats des mesures d'exhalation effectuées aux divers endroits accessibles sur le parcours de l'eau :

Puits (collecte à 3m de profondeur):	1220 Bq/l
Sortie du tuyau de trop-plein :	1030
Mare de résurgence :	140

2) Source non ferrifère

Dans une maison voisine (« propriété » en contre-haut de la précédente) une eau limpide non ferrifère sourd dans la cave (laquelle comporte

aussi un puits) et s'écoule dans le sol pour réémerger dans la propriété ci-dessus après quelque 100m de parcours.

Les teneurs mesurées aux divers endroits sont les suivantes :

Emergence dans la cave:	187 Bq/l
Réémergence « propriété »:	60
Puits dans la cave :	30

4.3.4. Résultats de mesures systématiques

Eaux de sources belges

Massif cambrien de Stavelot

1. Vielsalm, Thier de Justice (puits-pouhon, pré)	1220 Bq/l
2. Arimont, émergence effective (à côté du pouhon)	390
3. Vielsalm, Thier de Justice, (puits cave)	187
4. Pouhon Pietkin – Sourbrodt	170
5. Arimont, pouhon	150
6. Source de Blanchimont (Francorchamps) bas	85
7. Forage Herzogenhügel	80
8. Pouhons de Ménil (4 et 6)	80
9. Pouhon Préaix (puits-citerne)	80
10. Source du Spoorbach	64
11. Pouhon de Barisart	48
12. Pouhon du Ruy	48
13. Pouhon Delcor (Spa)	43
14. Pouhon du Tonnelet (Spa)	38
15. Pouhon de Bernister (captage)	33
16. Source de Groesbeek (Spa)	33
17. Source de la Sauvenière (Spa)	29
18. Pouhon Pia (Spa)	27
19. Pouhon du Bayehon (passerelle bois, près pont du Moulin)	19
20. Pouhon du gué du Trô Marets (Malmédy)	18
21. Fontaine de Blanchimont (Francorchamps) haut	16
22. Pouhon de Harzé (Ste-Anne)	13
23. Pouhon de Fays (Manhay)	11
24. Pouhon de Harzé	8
25. Pouhon des Cuves (Trô Marets, Malmédy)	6

Région liégeoise

26. Source de Plétrou - Visé (ancien captage condamné)	120
27. Source de Seraing, route de Plainevaux	110
28. Source de Boncelles (Famelette)	60
29. Source thermale (36°C) Astrid (Chaudfontaine)	10
30. Source de Vaux (Wérister)	1

Eaux de sources étrangères**Val d'Aoste (Italie)**

31. Source de Citrin	38
32. Val d'Ayas	8
33. Grand Chamén - Bionaz	2
34. Champillon - Allein - Saron	1

Haute-Corse (région schisteuse Est)

35. Fontaine d'Orezza (Rapaggio, captage et embouteillage)	3
36. Caldane (Fontaine de la Vierge, Fium' Alto)	1

4.3.5. Qu'en est-il de l'eau alimentaire ?

Selon sa provenance et ses conditions de stockage et traitement avant distribution, l'eau alimentaire révèle des teneurs en radon très diverses et il est des endroits où le taux communément considéré comme limite acceptable (100 Bq/l) est dépassé.

De ce qui précède, il résulte que l'on pourrait très aisément faire chuter le taux de radon « à la source » c'est-à-dire avant distribution. Il suffirait en effet d'assurer - comme dans les techniques de préparation aux mesures - un brassage suffisant de l'eau en présence d'air voire un simple « bullage » systématique. En tout état de cause, il est très facile à l'utilisateur de se débarrasser du radon contenu dans son eau de distribution ou de source d'ailleurs. Il lui suffit de « prendre la précaution inverse » de celle que doit prendre le technicien qui veut y mesurer le radon, à savoir recueillir l'eau en veillant à augmenter son agitation et sa durée de contact avec l'air (jet important, agitation du récipient, ...).

Soumise à l'ébullition, l'eau faut-il le dire, perd tout son radon.

Mais on ne perdra pas de vue que par ces processus, le radon est transféré dans l'air ce qui risque de déplacer le problème. Au lieu d'être ingéré, le radon a ainsi des chances d'être inhalé si l'aération ou la ventilation de l'endroit où l'eau est dégazée n'est pas suffisante, ce qui risque fort d'être le cas par exemple dans une cabine de douche :

Résultats de mesures dans un cas concret
(région de Vielsalm):

eau récoltée «à la pomme»:	137 Bq/l
eau récoltée 2m plus bas:	67 Bq/l.

5. Le radon dans les roches et minéraux : loi statistique de distribution sur site

5.1. Introduction

Depuis les années 1970, de nombreuses publications dans le domaine géologique (mais aussi en physique) ont défendu la loi de distribution log-normale pour les éléments en traces [L.4].

Nous avons quant à nous entrepris une étude systématique sur de nombreux sites afin de circonscrire le plus précisément possible la problématique radon notamment quant à la validité de notre "approche géologique" à partir de la modeste méthode de mesure que nous proposons ici.

Ce faisant, nous avons tout normalement été amené nous-même à nous intéresser à la distribution statistique des valeurs de l'exhalation produite par les échantillons que nous prélevions sur un même site géologique et par le fait même à la distribution du radium ("élément en trace" s'il en est) sur le site en question.

Il nous est rapidement apparu que "nos" résultats (traduits en logarithmes) se distribuaient en fait très valablement selon une loi beaucoup plus simple que la loi log-normale évoquée ci-dessus.

Mode opératoire

Pour caractériser un site, nous prélevons systématiquement une quinzaine d'échantillons en principe, parfois moins lorsque le site est exigü, parfois beaucoup plus - notamment au début des recherches évidemment - lorsque le site s'y prête et afin de valider au mieux la méthode.

Les échantillons sont collectés régulièrement selon une logique adaptée localement au site : quadrillage relativement régulier d'une aire d'affleurement facilement accessible, espacement régulier le long d'un affleurement pratiquement continu (falaise routière ou ferroviaire, front de taille d'une carrière, paroi de galerie souterraine...).

Bien vérifiée tout d'abord à partir d'un quadrillage *fin* de la presqu'île de la Revellate (Calvi, Corse) où est implantée la Station de Recherches Sous-marines et Océanographiques (Stareso) de l'Université de Liège, la **loi** que nous détaillerons ci-dessous et que nous baptiserons ici « loi vds » (pour « venant du sud ») a été depuis confortée par un ensemble varié de séries de mesures effectuées en France, dans le Bassin de Mons, dans le Condroz, les Ardennes belges et

luxembourgeoises ainsi qu'occasionnellement en Irlande et en République Démocratique du Congo.

La loi nous semble validée définitivement par 2 ensembles de mesures provenant d'une part de la galerie dite « des Comtes de Salm » à Salmchâteau et d'autre part de 2 galeries taillées à des niveaux différents (-25 et -45m) dans les phyllades de Bertrix (Carrière de la « Morépire »).

Ces 2 ensembles sont traités en détails ultérieurement en ne perdant pas de vue la remarque importante concernant les 2 protocoles différents ayant présidé à ces diverses études.

Nous avons voulu pousser l'expérience dans ses derniers retranchements en analysant 2 affleurements de calcaire dont on sait a priori qu'il exhale en général très peu de radon : un calcaire de Lourdes (Hautes Pyrénées) et un calcaire de l'Ourthe (Hony).

On verra que la loi est encore « retrouvée » bien que les conditions de mesures aient été particulièrement défavorables : faible activité des échantillons et bruit de fond ambiant d'un ordre de grandeur comparable (et, selon les spécifications du constructeur, proches de la limite de validité de l'appareil de mesure, voire même en dessous de celle-ci).

5.2. Expression de la loi de distribution → 2^{ème} thèse de ce mémoire

Nous postulons que :

la répartition par ordre croissant des résultats de mesure d'activité volumique unitaire est logarithmique

c'est-à-dire que les résultats de mesure, reportés par ordre croissant en un diagramme semi-logarithmique se répartissent – en très grande majorité – linéairement entre 2 valeurs limites qui caractérisent le site et selon une pente également caractéristique du site.

De part et d'autre de cet ensemble linéaire, on trouve fréquemment quelques valeurs nettement décalées, réparties le plus souvent selon une pente nettement supérieure traduisant donc statistiquement une *fréquence* (ou une *densité*) inférieure (Fig. 5.1).

Sur la figure 5.1 est tracé, à titre illustratif, un exemple d'histogramme idéalisé correspondant à

la loi postulée afin d'expliciter sans ambiguïté nos divers propos ultérieurs.

On conçoit immédiatement à partir de cet exemple que, quel que soit l'*intervalle* de classement – ou *rang* – choisi (en valeurs logarithmiques), on aboutit toujours (dans la zone linéaire centrale de la figure 5.1.a) à un histogramme uniforme ce qui, en d'autres termes, traduit une

équiprobabilité des valeurs logarithmiques d'activité (volumique unitaire par exemple)

Analytiquement, la loi s'exprime simplement :

$$\log A_{th} = a + b \cdot n \quad (1)$$

avec :

n ($\in [0, N]$) = numéro d'ordre de l'échantillon classé appartenant au domaine linéaire

A_{th} = valeur « théorique » de l'activité correspondant à l'ordonnée de la **meilleure droite** obtenue par régression linéaire à partir des logarithmes des $N+1$ valeurs mesurées retenues.

On notera que la discrimination entre les échantillons appartenant ou non au domaine linéaire principal résulte évidemment de l'observation de l'ensemble total classé et reporté en un diagramme semi-logarithmique préliminaire.

Une loi aussi simple permet de caractériser très commodément les sites du point de vue exhalation du radon, et donc indirectement du point de vue distribution du radium, par un couple de valeurs numériques : soit les valeurs d'activité correspondant aux 2 extrémités du domaine linéaire soit la valeur centrale et le facteur multiplicatif (et réductif) permettant d'en déduire les valeurs extrêmes :

Caractérisation : $A_{th \min} < A_{th} < A_{th \max}$

ou $A_{th \text{ centr. } x/f}$ [Bq/(m³.kg)]

C'est effectivement de cette manière que nous concluons chaque étude de site, les valeurs figurant à ce niveau étant arrondies conformément à une précision de mesure raisonnablement

estimée : au maximum 2 (ou 3) chiffres significatifs.

Le symbole conventionnel x/f signifie que la valeur centrale est à multiplier ou à diviser par f pour obtenir les valeurs maximale ou minimale respectivement ($A_{th \text{ centr.}}$ est évidemment égale à la moyenne géométrique des valeurs extrêmes).

Remarques générales

1. Nous donnons aux chapitres suivants les graphes (droite de régression et points expérimentaux) concluant nos études de sites.
2. Par souci de complétude et afin que le lecteur puisse lui-même utiliser notre *modus operandi* voire vérifier l'exactitude de nos résultats finaux, nous y fournissons - en plus des formules (1) et (2) explicitées accompagnées du coefficient de corrélation qualifiant l'adéquation de la régression - la totalité des valeurs d'exhalation de radon mesurées sous forme d'un tableau comprenant les renseignements suivants :

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)
A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]
N = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1) du chapitre 5
A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression.

Nous donnons enfin les valeurs extrêmes calculées de la zone linéaire théorique ainsi que leur valeur moyenne.

Ces renseignements sont évidemment présentés sous une forme standard dont nous fournissons ici un exemple:

R	A	n	A_{th}
GLC7	247,4	14	235,6
GLC4	239,4	13	222,4
GLC10	198,2	12	210,0
GLC11	114	1	111,3
GLC14	101,6	0	105,1

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 2,02140 + 0,02506.n$$

coefficient de corrélation : 0,9860

log A_{th} min.	log A_{th} max.	Moy. arithm.	A_{th} min.	A_{th} max.	Moy. géom.
2,0214	2,3722	2,1968	105,05	235,61	157,33

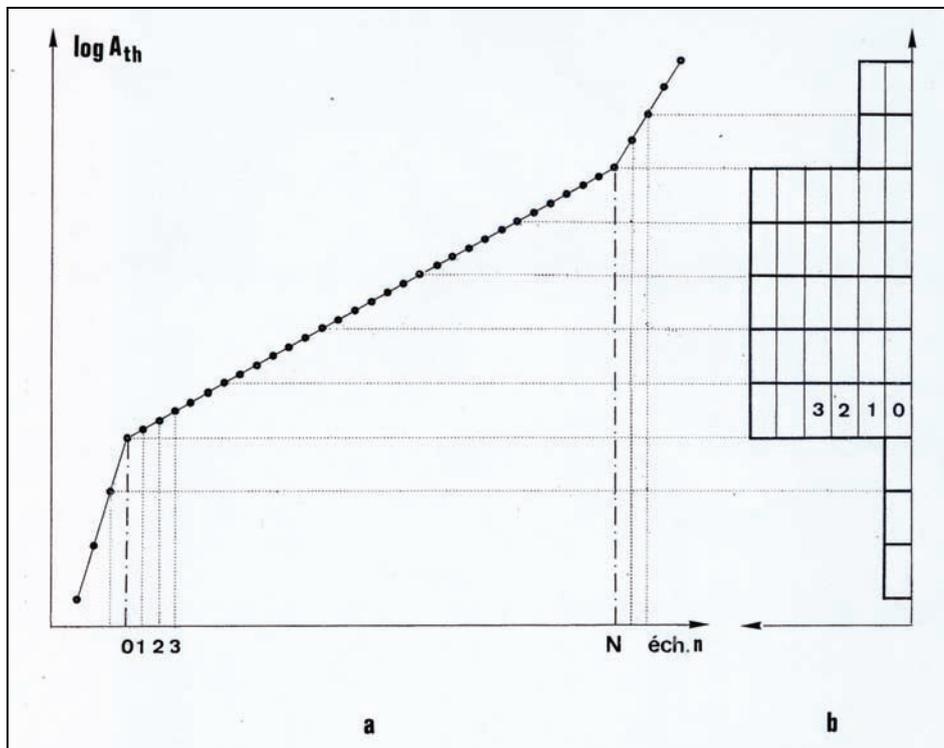
 Caractérisation : $105 < A_{th} < 236$ ou $157 \times / 1,5$ [Bq/(m³.kg)]


Figure 5.1. Répartition théorique (ou idéalisée) des mesures classées par ordre croissant (a) et un histogramme correspondant (b).

- Attention :** seuls les résultats d'exhalation de radon par les solides donnés au **chapitre 6** respectent le **protocole standard** retenu comme définitif par nous au chapitre 2 (Métrologie du radon). La justification du maintien des autres résultats est explicitée au chapitre 2.
- Afin de permettre au lecteur un contrôle ou toute manipulation mathématique qu'il jugerait opportune, nous fournissons les résultats complets des traitements numériques (calcul de régression et valeurs théoriques en regard des valeurs mesurées) avec 4 décimales ce qui évidemment n'est absolument pas réaliste physiquement parlant mais ce qui assure une compatibilité complète de toutes les opérations mathématiques souhaitables : calcul séquentiel des valeurs « théoriques » des points de la droite de régression, correspondance des valeurs moyennes géométrique et arithmétique de l'activité et de son logarithme.
- On pourra constater sur les différents graphes - et la valeur du coefficient de corrélation associé à chaque régression le confirme - que le nombre d'échantillons choisis (de l'ordre de 15) suffit à « convaincre » de la validité de la loi et donc d'accepter l'équiprobabilité par site des « valeurs logarithmiques d'exhalation ».
- On peut facilement se rendre compte qu'aborder le problème par la considération d'un histogramme expérimental (donc obtention d'un histogramme raisonnablement « plat ») exigerait un beaucoup plus grand nombre de mesures vu la dispersion due aux erreurs expérimentales et évidemment à la simple dispersion effective, la « loi » étant en tout état de cause une idéalisation de la réalité.

6. Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site simple. Application du protocole standard

Nous rapportons dans ce chapitre les résultats obtenus à partir de 8 séries d'échantillons de roches diverses (nature, âge et origine) en application du protocole standard décrit au chapitre 5.

Les graphes correspondants sont regroupés en une seule figure (Fig. 6.1) : points expérimentaux et « meilleures droites » (régression linéaire, méthode des moindres carrés) à l'exception de l'échantillon n°6 (ancien minerai de fer de Chatillon, Arlon) dont seule la meilleure droite est reproduite vu la plus grande divergence entre points et droite. Ce cas particulier est repris séparément au paragraphe 6.3 (Fig. 6.2).

6.1. Localisation des prélèvements et brève description des sites

6.1.1. Granite rose de « La Clarté » (Ar Sklerder) – Bretagne du Nord

Le granite rose de Bretagne du Nord, en plus de sa réputation au point de vue touristique (cf « Côtes de granit rose » : Perros-Guirec, Trégastel...) est particulièrement apprécié pour son esthétique en tant que pierre dure polissable (revêtement mural ou plan de travail en cuisine par exemple) en provenance notamment de la carrière de « La Clarté ».

Les premières mesures radon à propos de ce granite remontent pour nous à de nombreuses années. Grâce à une très efficace collaboration industrielle entamée avec le Directeur Joseph Gillet des « GRANITS INDUSTRIELS de Rochefort » [D.11], nous avons pu très tôt nous procurer un échantillonnage pratiquement mondial de ce type de roche, connue depuis longtemps et à juste titre, comme la plus émissive en radon, en ce qui concerne le vrai granite du moins car sous l'intitulé industriel ci-dessus, sont inclus aussi bien les vrais granites que les gabbros et autres « pierres dures polissables » à vocation décorative (mais à l'exclusion des marbres toutefois).

Pour la présente caractérisation d'un granite, nous avons effectivement choisi un échantillonnage (15 prélèvements) provenant de la célèbre carrière de « La Clarté ». Les échantillons n'ont pas pu – pour une question de sécurité, la carrière étant en activité – être collectés au front de taille mais, grâce à la

complaisance d'un responsable, il nous a été possible de les prélever in situ en surface.

6.1.2. Phyllade noir de Petit-Thier (Vielsalm)

L'affleurement étudié se situe le long de la route de Vielsalm à Saint-Vith, entre Ville-du-Bois et Petit-Thier. Il s'agit d'un phyllade détritique bordant ce qui a été renseigné comme étant une ancienne carrière.

Ce schiste noir, « tachant les mains », est particulièrement riche en matière organique évidemment accumulée en milieu anoxique (il a dû se former en bassin très profond) et est bien connu pour sa radioactivité.

La paroi se délite naturellement en très petites plaquettes décimétriques de sorte que la « falaise » se présente sous forme d'un long éboulis incliné selon la pente d'équilibre du matériau (environ 40°) d'accès quelque peu malaisé.

17 échantillons de plaquettes de ce phyllade ont été prélevés le long de la paroi vers le sommet de celle-ci. Ils sont par prudence « étiquetés » de A à R (D faisant défaut) et leur position relative, vu l'état de désagrégation de l'éboulis, n'est pas garantie.

6.1.3. Schiste noir de Malmédy

Un bel affleurement pratiquement continu sur une longueur de quelque 200 m borde la route ascendante qui longe la rivière derrière le petit centre commercial se situant en sortie de Malmédy sur la route vers Waimes.

Des mesures antérieures effectuées au même endroit, mais dans un autre contexte [D.15] et donc en quantité insuffisante pour le présent objectif, s'étant révélées particulièrement intéressantes, nous avons revisité systématiquement le site et y avons prélevé une quinzaine d'échantillons régulièrement espacés de 10 pas.

La plupart des échantillons sont effectivement noirs et ont un aspect que l'on peut qualifier de « quasi-phylladeux ». D'autres sont plus argileux mais de bonne compétence, quelques-uns enfin plutôt détritiques. Vers le haut de la petite route, l'affleurement se compose de pierres éparses dans le talus.

Le prélèvement des échantillons a débuté par le haut de l'affleurement dès que celui-ci peut-être considéré comme « continu ».

On fera remarquer que des prélèvements relativement importants, ont été effectués (par des

amateurs avertis ?) dans la partie médiane de l'affleurement qui se révèle justement la plus émissive.

6.1.4. Schiste à ampélite d'Engis (carrière Carneuse)

Le schiste étudié consiste en quelques veines de contact de schiste à ampélite dans la carrière de calcaire exploitée par la société Carneuse à Engis en bord de Meuse et à proximité du préhistosite et de la grotte de Ramioul.

Ce schiste a jadis été exploité en tant que schiste alunifère et des restes d'exploitation sont visibles sur le pourtour du site.

Des échantillons (repérés SAEb ci-après) ont été prélevés « en place » sur l'affleurement en bordure de la voie réservée au charroi vers la carrière (chemin enjambé par la passerelle permettant l'accès à la grotte de Ramioul); l'affleurement, court (quelques dizaines de mètres) s'étend depuis cette passerelle jusqu'au bord de la carrière.

Le schiste est par endroits rouge (présence de fer). D'autres échantillons (repérés SAE ci-après) ont été prélevés le long du talus de remblai en bordure intérieure de la carrière et l'on ne peut garantir exactement la localisation des prélèvements, le talus ayant été remodelé après l'éboulement très important qui a d'ailleurs affecté le périmètre en principe protégé autour de la grotte.

Du fait de l'extension assez réduite de ce schiste, nous nous sommes ici limités à l'étude de 11 échantillons (4 de l'affleurement et 7 du remblai) qui ont été groupés pour l'étude.

6.1.5. Argile rouge des termitières de Lubumbashi (Katanga, RDC)

Le Katanga (RDC) est connu pour son sol argileux où abondent les termitières hautes de plusieurs mètres qui fournissent un matériau de qualité pour la confection de briques.

Découpées dans la masse du monticule, ces briques sont cuites, ou le plus fréquemment simplement durcies au soleil, avant d'être mises en œuvre.

La couleur de l'argile varie de l'ocre (dans la zone du campus universitaire notamment) au rouge (dans la zone comprise entre la ville et l'aéroport notamment).

Un échantillon d'argile ocre a été prélevé dans le campus (arboretum du jardin de la faculté

d'agronomie) et soumis à l'étude complète comparative présentée au chapitre 2.

Quinze échantillons rouges ont été prélevés en bordure immédiate de la route vers l'aéroport (au delà de la zone militaire, côté gauche de la route) parmi les dizaines de termitières parsemant le terrain.

Ces échantillons sont repérés ATRLR 1 à 15, leur situation sur le terrain n'a pas pu être précisée lors du prélèvement.

6.1.6. Ancien minerai de fer d'Arlon

Une couche horizontale décimétrique d'hydroxyde de fer affleure dans la carrière de sable de Châtillon près d'Arlon (carrière Lannoy) à faible profondeur (de l'ordre du mètre) sous la surface du sol en bordure du chemin d'accès longeant la limite de l'exploitation.

Cet hydroxyde de fer, dont l'origine et la formation sont controversées et qui est spécialement étudiée à l'Université de Liège par le Professeur Frédéric Boulvain, était jadis utilisé comme minerai de fer avant l'exploitation de la minette (phosphoreuse) de Lorraine, elle aussi relativement pauvre (de l'ordre de 30% de fer) mais convenant bien, elle, au traitement en haut-fourneau.

Les quinze échantillons (parmi 20 collectés le long du chemin ascendant bordant la carrière) les plus proches de l'entrée de la carrière (et pour cela portant les numéros d'archivage 20 à 6 ainsi comptés à partir de l'entrée de la carrière) font l'objet de la présente étude.

6.1.7. Schiste bigarré du Kerry (Irlande)

Une petite série d'échantillons (11) ont été prélevés, de 10 en 10 mètres, le long d'un bel affleurement routier en bordure de mer au point de vue de Coomakesta Pass dans l'« Anneau du Kerry » (presqu'île au sud-ouest de l'Irlande au sud de la baie de Dingle).

6.1.8. Calcaire de la mine de Kipushi (Katanga, RDC)

Une quinzaine d'échantillons de calcaire ont été prélevés systématiquement dans la mine cupronickélicifère de Kipushi au Katanga, grâce à la complaisance du Doyen Kalenga et du Professeur de géologie Makabu de l'Université de Lubumbashi (« Unilu ») et à l'aide enthousiaste et efficace des

responsables congolais de la mine que nous remercions ici vivement.

Les échantillons ont été récoltés à la profondeur de 1200 mètres dans la galerie principale pratiquement à partir du puits d'accès.

On notera que cette roche a été étudiée et soigneusement caractérisée antérieurement du point de vue géologique et les résultats de l'étude sont disponibles au Service de géologie de l'Unilu.

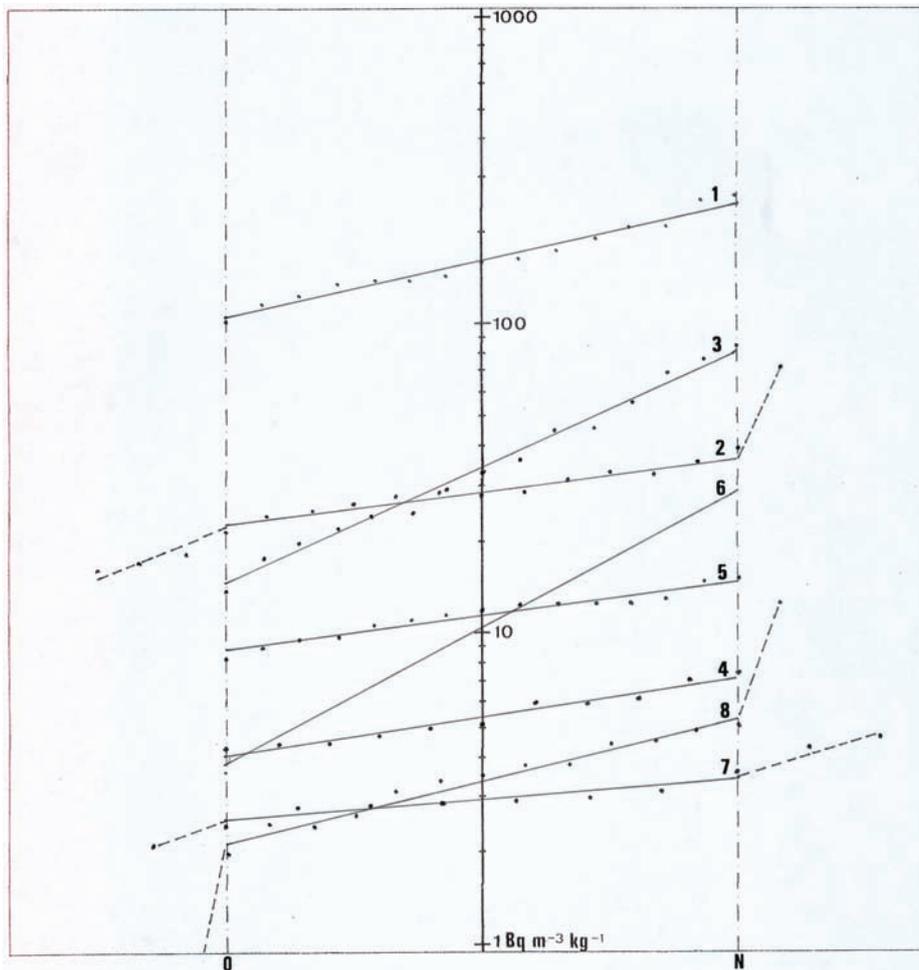


Figure 6.1. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire sur les 8 séries d'échantillons présentées au paragraphe 6.1 : 1 : granite rose de la carrière de « La Clarté » (Bretagne France) ; 2 : phyllade noir de Petit-Thier ; 3 : schiste noir de Malmédy ; 4 : schiste à ampélite d'Engis ; 5 : argile rouge de Lubumbashi (RDC) ; 6 : minerai de fer d'Arlon ; 7 : schiste bigarré du Kerry (Irlande) ; 8 : calcaire de Kipushi (RDC).

6.2. Présentation des résultats numériques

6.2.1. Granite rose de « La Clarté »

R	A	n	A _{th}
GLC7	247,4	14	235,6
GLC4	239,4	13	222,4
GLC10	198,2	12	210,0
GLC5	198	11	198,2

GLC3	185,2	10	187,1
GLC1	165,4	9	176,6
GLC6	162,7	8	166,7
GLC8	155,8	7	157,3
GLC13	141,3	6	148,5
GLC15	138	5	140,2

GLC9	136,6	4	132,3
GLC12	133	3	124,9
GLC2	121	2	117,9
GLC11	114	1	111,3
GLC14	101,6	0	105,1

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 2,02140 + 0,02506.n$$

coefficient de corrélation : 0,9860

log A_{th} min.	log A_{th} max.	Moy. arithm.	A_{th} min.	A_{th} max.	Moy. géom.
2,0214	2,3722	2,1968	105,05	235,61	157,33

Caractérisation : $105 < A_{th} < 236$ ou $157 \times / 1,5$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.2. Phyllade noir de Petit-Thier

R	A	n	A_{th}
J	69,7		
R	37,9	12	35,9
F	34,3	11	34,4
A	31,7	10	33,0
H	31,7	9	31,6

M	30,1	8	30,3
O	27,3	7	29,1
Q	27,2	6	27,9
K	27,0	5	26,7
C	26,7	4	25,6
N	25,2	3	24,6

I	24,4	2	23,6
L	22,9	1	22,6
B	20,7	0	21,7
G	17,0		
P	16,3		
E	15,5		

Formule de régression et caractérisation du site

$\log A_{th} = 1,3359 + 0,01822.n$ coefficient de corrélation : 0,9770

log A_{th} min.	log A_{th} max.	Moy. arithm.	A_{th} min.	A_{th} max.	Moy. géom.
1,3359	1,5543	1,4451	21,672	35,854	27,875

Caractérisation : $21,7 < A_{th} < 35,9$ ou $28 \times / 1,3$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.3. Schiste noir de Malmédy

R	A	n	A_{th}
M9	81,6	14	76,03
M11	72	13	67,30
M1	65,4	12	59,57
M10	48,7	11	52,72
M7	44,4	10	46,67

M8	41,6	9	41,30
M2	32,5	8	36,56
M6	31,1	7	32,36
M12	27,3	6	28,64
M4	22,8	5	25,35
M13	22,4	4	22,44

M5	21,2	3	19,86
M15	19,3	2	17,58
M14	16,9	1	15,56
M3	13,4	0	13,77

Formule de régression et caractérisation du site

$\log A_{th} = 1,1390 + 0,0530.n$ coefficient de corrélation : 0,9910

log A_{th} min.	log A_{th} max.	Moy. arithm.	A_{th} min.	A_{th} max.	Moy. géom.
1,1390	1,8810	1,5100	13,772	76,033	32,360

Caractérisation : $13,8 < A_{th} < 76,0$ ou $32,4 \times / 2,35$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.4. Schiste à ampélite d'Engis

R	A	n	A_{th}
SAE 1	7,44	10	7,08
SAEb 2	6,88	9	6,70
SAE 2	6,03	8	6,33

SAE 8	5,96	7	5,99
SAEb 4	5,84	6	5,66
SAE 4	5,03	5	5,36
SAEb 1	5,00	4	5,06

SAE 6	4,69	3	4,79
SAE 3	4,41	2	4,53
SAE 5	4,36	1	4,28
SAEb 6	4,28	0	4,05

Formule de régression et caractérisation du site

$\log A_{th} = 0,6073 + 0,0243.n$ coefficient de corrélation : 0,9788

log A_{th} min.	log A_{th} max.	Moy. arithm.	A_{th} min.	A_{th} max.	Moy. géom.
0,6073	0,8503	0,7288	4,0486	7,0843	5,3555

Caractérisation : $4,05 < A_{th} < 7,08$ ou $5,36 \times / 1,32$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.5. Argile rouge de Lubumbashi

R	A	n	A _{th}
ATLR 3	14,7	14	14,5
ATLR1	14,2	13	14,0
ATLR4	12,5	12	13,5
ATLR2	12,4	11	13,0
ATLR10	12,4	10	12,55

ATLR11	12,2	9	12,1
ATLR9	12,1	8	11,65
ATLR12	11,5	7	11,25
ATLR6	11,4	6	10,85
ATLR5	10,9	5	10,45
ATLR14	10,4	4	10,1

ATLR7	9,55	3	9,7
ATLR8	9,4	2	9,4
ATLR13	8,9	1	9,05
ATLR15	8,18	0	8,72

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,9404 + 0,0158.n$$

coefficient de corrélation : 0,9737

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,9404	1,1616	1,0510	8,7177	14,5077	11,2460

Caractérisation : $8,7 < A_{th} < 14,5$ ou $11,2 \times / 1,3$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.6. Minerai de fer de Châtillon (Arlon)

R	A	n	A _{th}
FL20	32,7	14	27,51
FL13	22,2	13	23,87
FL18	18,0	12	20,71
FL11	15,5	11	17,96
FL16	14,7	10	15,58

FL17	113,6	9	13,52
FL8	11,0	8	11,73
FL12	10,8	7	10,18
FL15	10,1	6	8,83
FL19	9,74	5	7,66
FL7	7,8	4	6,65

FL14	6,5	3	5,76
FL6	4,5	2	5,00
FL9	3,6	1	4,34
FL10	3,4	0	3,76

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,5757 + 0,0617.n$$

coefficient de corrélation : 0,9768

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,5757	1,4395	1,0076	3,7644	27,511	10,1765

Caractérisation : $3,8 < A_{th} < 27,5$ ou $10,2 \times / 2,70$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.7. Schiste bigarré d'Irlande

R	A	n	A _{th}
SCIR 3	4,56		
SCIR 10	4,27		
SCIR 8	3,56	7	3,38

SCIR 11	3,13	6	3,23
SCIR 5	2,98	5	3,09
SCIR 9	2,91	4	2,96
SCIR 4	2,83	3	2,83

SCIR 1	2,75	2	2,70
SCIR 6	2,70	1	2,58
SCIR 7	2,40	0	2,47
SCIR 2	2,07		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,3928 + 0,0195.n$$

coefficient de corrélation : 0,9539

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,3928	0,5293	0,4611	2,4706	3,3830	2,8910

Caractérisation : $2,5 < A_{th} < 3,4$ ou $2,9 \times / 1,2$ [Bq/(m³.kg)]

6.2.8. Calcaire de la mine de Kipushi (RDC)

R	A	n	A _{th}
K 10	12,3		
K 14	4,88	12	5,18
K 3	4,71	11	4,81
K 4	4,43	10	4,46
K 12	4,25	9	4,13

K 11	3,72	8	3,83
K 5	3,64	7	3,55
K 7	3,42	6	3,30
K 9	3,34	5	3,06
K 15	3,05	4	2,83
K 13	2,58	3	2,63

K 2	2,39	2	2,44
K 1	2,34	1	2,26
K 6	1,85	0	2,09
K 8	0,52		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,3211 + 0,0328.n$$

coefficient de corrélation : 0,9820

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,3211	0,7147	0,5179	2,0946	5,1844	3,2953

Caractérisation : $2,1 < A_{th} < 5,2$ ou $3,3 \times / 1,6$ [Bq/(m³.kg)]

6.3. *Présentation isolée du graphe relatif au minéral de fer d'Arlon*

La figure 6.2 reproduit le cas en question pour lequel la divergence entre la droite de régression et les points expérimentaux est nettement plus grande que dans tous les autres cas traités tout en restant acceptable.

L'allure sigmoïdale de la distribution des points autour de la droite suggère – c'est le seul cas trouvé dans l'ensemble de nos résultats de mesure – que la distribution pourrait être considérée comme se rapprochant d'une distribution log-normale (distribution gaussienne des valeurs logarithmiques) mais le nombre de points est assurément trop faible pour conforter valablement cette assertion.

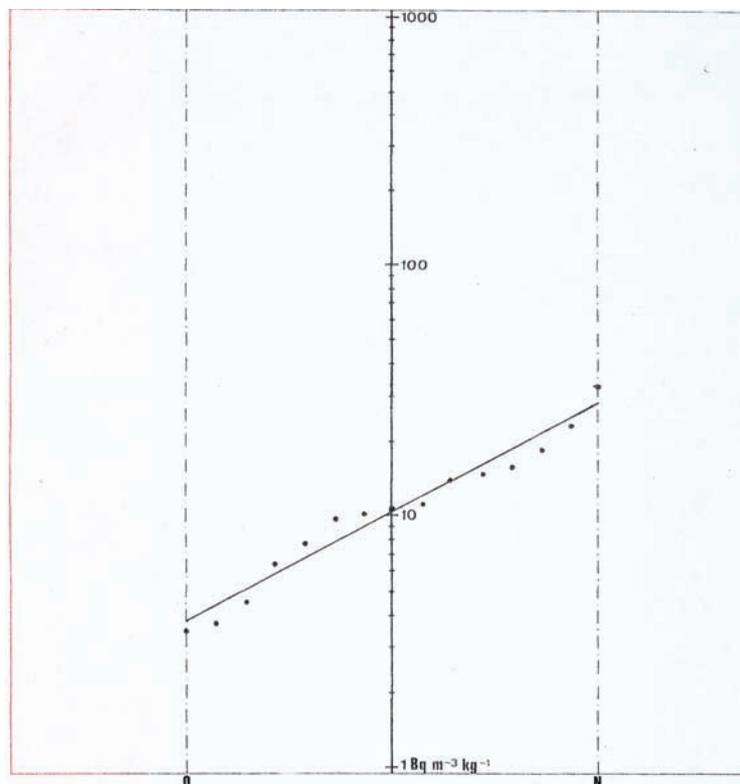


Figure 6.2. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire sur les échantillons de minéral de fer de Châtillon (Arlon).

7. Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site simple. Protocole court

Comme annoncé nous présentons dans ce chapitre une série de résultats de mesure effectuées en application du protocole court. Nous les avons regroupés en 3 sous-ensembles afin de ne pas surcharger les figures de distribution et parce qu'ils obéissent à une logique cohérente.

Le premier sous-ensemble (paragraphe 7.1 à 7.3) présente 4 résultats d'étude de sites relativement courts – du même type que ceux du chapitre 6 quoique de matériaux de natures différentes – et que nous aurions volontiers passés sous silence dans le présent travail, estimant suffisant pour l'objectif poursuivi le nombre de cas étudiés en 6, s'ils n'étaient justement accompagnés de résultats plus probants encore en quantité supérieure.

Les 2 autres groupes se réfèrent en effet à des mesures, nombreuses et groupées, sur sites de grande extension géographique (paragraphe 7.4 à 7.6) ou individualisées par sites différents (localement et par nature) mais appartenant à une même région géographique au sens large, en l'occurrence Vielsalm et ses environs (paragraphe 7.7 à 7.9).

7.1. Localisation des prélèvements du 1^{er} groupe et brève description des sites

7.1.1. Roches schisto-gréseuses de Kinshasa (RDC) : Carrière Safricas du Mont Ngaliema

La ville de Kinshasa et ses faubourgs (notamment toute la zone du campus universitaire) sont situés dans une région de collines essentiellement sableuse. Une épaisseur de **sable ocre** cénozoïque pouvant atteindre 30m rend toute cette région éminemment instable et a nécessité en certains endroits des installations de soutènement importantes pour stabiliser des routes, des infrastructures et même un quartier résidentiel. Cette couche cénozoïque recouvre le soubassement, comportant 7 systèmes, du **Bas-Congo**. Ce soubassement est caractérisé par des formations d'âge et de métamorphisme croissant d'est en ouest de Kinshasa à Matadi.

Les roches **schisto-gréseuses** du système le plus récent affleurent dans la région voisine du fleuve Congo en direction de Matadi, entre Kinshasa (sur la rive gauche) et Brazzaville (sur la rive droite). Dans le fleuve, elles donnent lieu à une succession

de rapides qui y rendent la navigation impossible, sur les rives elles forment des collines où certaines carrières sont actuellement en exploitation : on en extrait notamment des pierres de construction pour habitations et du concassé pour revêtement routier.

La photo de la figure 7.1 (2006) montre l'aspect du front de taille de la carrière du Mont Ngaliema, front au long duquel il nous a été possible de prélever systématiquement des échantillons distants de 10m. 21 échantillons, numérotés pour repérage et archivage de la droite vers la gauche, d'une roche particulièrement compétente ont ainsi été collectés régulièrement, avec un hiatus de 30m toutefois entre l'échantillon n°16 et l'échantillon n°17 par suite de la présence d'un engin au travail et de la butte d'effondrement qu'il était occupé à déplacer (photo 7.1).

Le matériau présente partout une teinte rose à rougeâtre caractéristique

Quelques particularités ont été repérées lors du prélèvement et lors du concassage des échantillons, elles sont répertoriées ci-dessous, par les numéros d'archivage des prélèvements:

Aspect général : grès à cristaux nettement sub-millimétriques

9 et 10: granulométrie particulièrement fine

13: présence de cristaux millimétriques

15: traces ponctuelles verdâtres

18: couches fines verdâtres.

7.1.2. Craie phosphatée du Bassin de Mons : Carrière souterraine de la « Malogne » (Cuesmes)

Considéré jusqu'il y a peu comme simple appendice du Bassin de Paris, le « petit » Bassin de Mons comporte une zone de dépôt de craie phosphatée qui a été très largement exploitée (pour l'amendement des terres cultivables) pendant près d'un siècle à partir de 1876. L'extraction se faisait selon le mode dit « en cathédrale romane » pour éviter la construction de murs et toits de soutènement en matériaux rapportés (comme dans les mines de charbon typiquement): au fur et à mesure de l'extraction, des piliers de craie étaient régulièrement maintenus intacts et la voûte naturelle entre eux était conformée à la manière des voûtes de cathédrale.

Cette carrière souterraine s'étendait en fin d'activité sur environ 900 hectares et était donc la deuxième plus vaste exploitation souterraine de ce type en Wallonie après celle du Thier Caster à Lanaye (Fig. 7.2).

Après divers avatars et dégradations naturels (noyage de la fraction N-E) ou consécutifs à des travaux de génie civil (soutènement pour la ligne de chemin de fer Mons-Maubeuge et pour le ring de Mons), la partie restante est actuellement sous la surveillance du département de géologie de l'Université de Mons qui en poursuit l'étude systématique et assure pour le public la visite d'une partie du site. Présentement une dégradation lente de certains piliers suite aux fluctuations de niveau de la nappe aquifère (existant dans une zone de la carrière sous forme de lac) pose un grave problème pour la pérennité de ce site remarquable.

Sous la conduite bienveillante et magistrale de M. Thierry Mortier de l'ASBL « La Malogne », nous avons effectué 20 prélèvements systématiques de craie phosphatée, distants de quelque 10 mètres, ainsi que 4 échantillons de phosphate enrichi provenant de poches de dissolution du phosphate accessibles dans la carrière.

La craie phosphatée est connue pour sa faculté de concentrer l'uranium et le phosphate plus encore : on verra que la valeur caractéristique de la partie de site où ont été effectués les prélèvements est de **20 Bq/(m³.kg)** [de 15,7 à 24,8 Bq/(m³.kg)] tandis que les valeurs d'activité unitaire pour les échantillons de phosphate (n° 5 – 6 – 22 et 22' de la séquence totale des prélèvements) sont les suivantes: **6 9,3 - 83,3 - 70,9 - 62,2 Bq/(m³.kg)**.

7.1.3. Calcaire de Hony

La falaise calcaire de la sortie de Hony (route ascendante surplombant la rive gauche de l'Ourthe), au niveau de la passerelle donnant accès au « ravel » vers Esneux, est célèbre pour sa conformation (plissements, succession de couches) et ses fossiles de dysphyllum notamment.

16 échantillons ont été prélevés de 10 en 10 m en suivant la falaise vers Hony.

Comme on devait s'y attendre évidemment l'exhalation est très faible mais vérifie encore la répartition « linéaire » de la valeur logarithmique de l'activité volumique unitaire.

On notera que d'autres prélèvements d'échantillons calcaires ont été effectués et mesurés en Belgique, mais sur quelques échantillons seulement, à seule fin de vérifier la pauvreté de leur teneur en radium : Engis, Tilff (grotte Ste-Anne, « Chaweresse »), Forrières (tranchée du chemin de fer Jemelle-Forrières et anciennes carrières...).

7.1.4. Calcaire de Lourdes (Hautes-Pyrénées – France)

Les échantillons au nombre de 16, espacés de 10 pas, ont été prélevés le long de la première falaise abrupte rencontrée à la sortie de Lourdes dans la direction de Pau sur le chemin latéral, ascendant, conduisant à la « Grotte du Loup » (très bien signalée).

Les échantillons sont repérés de 1 à 16, le premier étant pris, en haut, au début de l'affleurement accessible, pratiquement à l'aplomb de l'entrée de la grotte que l'on aperçoit à quelque 30m au-dessus et accessible après un lacet du chemin. Le dernier échantillon est pris à la limite accessible de l'affleurement, très près du carrefour de la route de Pau, du chemin de la grotte et de la route conduisant au centre ville (Lourdes).

La roche est très compétente et la falaise, qui apparaît « d'un seul tenant », comporte peu de fissures. Plusieurs cavités exigües existent le long de la falaise.

Le calcaire, blanchâtre en surface se révèle gris à la cassure et redevient très blanchâtre au broyage (fraction submillimétrique).

Remarque. Il est connu qu'en pratique le calcaire est d'autant moins radioactif (et en fait toujours très peu d'ailleurs) qu'il apparaît de teinte plus claire [D.2'] et c'est bien ce qui ressort ici de la comparaison des valeurs d'exhalation de radon car la falaise de Lourdes est pratiquement blanche alors que celle de Hony est très nettement grise (la même différence se retrouve au niveau des échantillons après broyage).

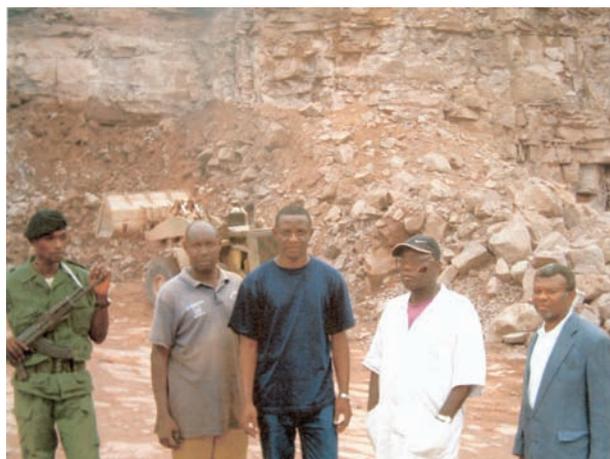


Figure 7.1. Front de taille de la carrière de grès rose du Mont Ngaliema (voisinage de Kinshasa – R.D.C.). Au centre de la photo, Assistant Jean-Pierre Nzuru (Unikin).

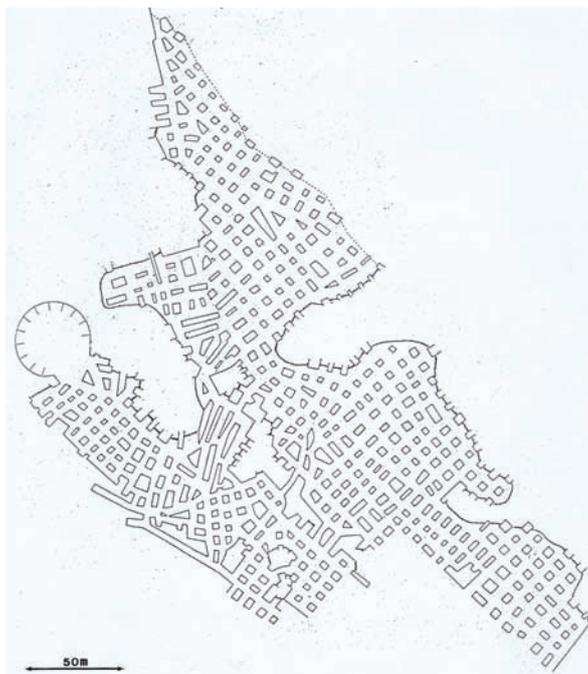


Figure 7.2. Relevé topographique de la carrière souterraine de la Malogne effectué par la Faculté polytechnique de Mons [A.2].

7.2. Résultats numériques du 1^{er} groupe de prélèvements

La figure 7.3 reproduit les graphes de ces 4 séries d'échantillons.

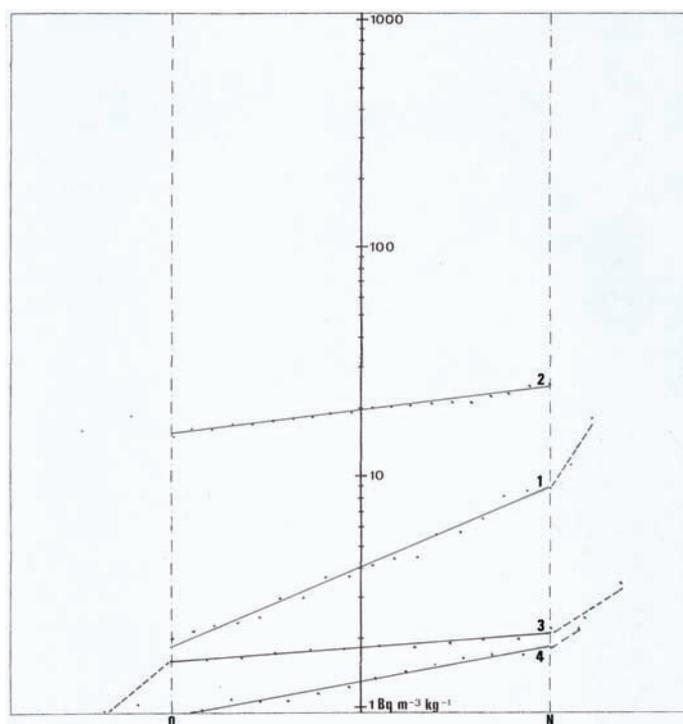


Figure 7.3. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire
 1 : grès de la carrière du Mont Ngaliema, voisinage de Kinshasa (RDC) ;
 2 : craie phosphatée de la carrière souterraine de la « Malogne » - Bassin de Mons ;
 3 : calcaire de Hony ;
 4 : calcaire de Lourdes.

7.2.1. Roches schisto-gréseuses de Kinshasa (RDC) : Carrière Safricas du Mont Ngaliema

R	A	n	A _{th}
1	18,0		
20	11,4		
17	8,89	17	8,90
19	8,78	16	8,10
10	8,44	15	7,38
14	6,57	14	6,72

12	5,86	13	6,12
18	5,70	12	5,57
16	4,47	11	5,07
2	4,44	10	4,62
9	4,11	9	4,20
7	3,71	8	3,83
15	3,63	7	3,49

3	2,95	6	3,17
11	2,93	5	2,89
8	2,42	4	2,63
5	2,31	3	2,40
13	2,24	2	2,18
6	2,13	1	1,99
4	1,99	0	1,81

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,2574 + 0,0407.n$$

coefficient de corrélation : 0,9911

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,2574	0,9493	0,6034	1,8088	8,8982	4,0119

Caractérisation : $1,8 < A_{th} < 9$ ou $4 \times / 2,2$ [Bq/(m³.kg)]

7.2.2. Craie phosphatée du Bassin de Mons : Carrière souterraine de la « Malogne » (Cuesmes)

R	A	n	A _{th}
26	25,20	19	24,76
28	25,10	18	24,17
7	23,58	17	23,60
8	22,78	16	23,04
10	21,54	15	22,50
9	21,51	14	21,96

23	21,14	13	21,44
25	20,84	12	20,94
20	20,66	11	20,44
27	20,34	10	19,96
16	19,48	9	19,49
19	19,30	8	19,02
24	18,24	7	18,57

15	18,18	6	18,13
13	17,78	5	17,71
18	17,31	4	17,29
11	17,04	3	16,88
12	16,47	2	16,48
21	16,41	1	16,09
14	15,37	0	15,71

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 1,1961 + 0,0104.n$$

coefficient de corrélation : 0,9917

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
1,1961	1,3937	1,2949	15,7072	24,7571	19,7197

Caractérisation : $15,7 < A_{th} < 24,8$ ou $20 \times / 1,25$ [Bq/(m³.kg)]

7.2.3. Calcaire de Hony

R	A	n	A _{th}
6	3,54		
2	2,46		
8	2,25	10	2,16
15	2,04	9	2,10
16	2,03	8	2,04

14	1,92	7	1,98
11	1,88	6	1,92
1	1,88	5	1,86
10	1,87	4	1,81
9	1,79	3	1,76
12	1,66	2	1,71

4	1,65	1	1,66
7	1,63	0	1,61
13	1,02		
5	0,96		
3	0,80		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,2071 + 0,0127.n$$

coefficient de corrélation : 0,9686

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,2071	0,3341	0,2706	1,6110	2,1582	1,8647

Caractérisation : $1,6 < A_{th} < 2,2$ ou $1,9 \times / 1,15$ [Bq/(m³.kg)]

7.2.4. Calcaire de Lourdes (Hautes-Pyrénées – France)

R	A	n	A_{th}
4	2,16		
10	1,79	13	1,82
3	1,70	12	1,73
2	1,66	11	1,64
12	1,61	10	1,56

7	1,52	9	1,49
11	1,44	8	1,41
5	1,35	7	1,34
14	1,25	6	1,28
13	1,15	5	1,21
15	1,11	4	1,15

16	1,11	3	1,10
1	1,09	2	1,04
9	0,98	1	0,99
8	0,95	0	0,94
6	0,66		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = -0,0259 + 0,0220.n$$

coefficient de corrélation : 0,9919

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
- 0,0259	0,2601	0,1171	0,9421	1,8201	1,3095

Caractérisation : $0,94 < A_{th} < 1,82$ ou $1,3 \times / 1,4$ [Bq/(m³.kg)]

7.3. Localisation des prélèvements du 2^{ème} groupe et brève description des sites

7.3.1. Granite et arène granitique de la Revellata (Calvi, Corse)

La presqu'île granitique de la Revellata (ou Revellata) située au nord-ouest de la Corse (Fig. 7.4) est un endroit privilégié pour une étude systématique de site car la roche y est en affleurement pratiquement généralisé à l'exception d'une faible proportion colonisée par le maquis; encore celui-ci n'empêche-t-il pas vraiment d'avoir accès au soubassement pour un prélèvement localisé (Fig. 7.5).

L'établissement de la Station de Recherches Sous-marines et Océanographiques (Stareso) de l'ULg à l'initiative du Recteur Marcel Dubuisson en ce lieu a constitué pour nous un atout privilégié pour une recherche de longue durée.

Le granite est connu pour sa forte exhalation en radon et est d'ailleurs le plus souvent, même dans la littérature scientifique, réputé comme étant la roche la plus émissive.

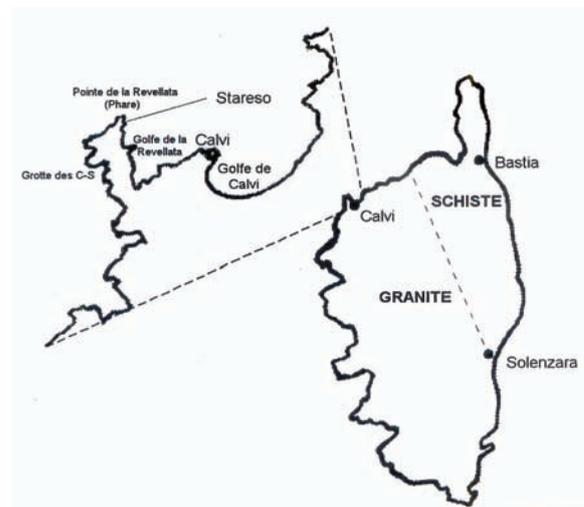


Figure 7.4. Situation de la Revellata.



Figure 7.5. La Station et le phare.

Le granite est connu aussi pour sa dureté globale (c'est une « roche dure polissable », selon le vocable technique, de plus en plus utilisée comme pierre de parement) mais en même temps pour sa propension (très lente à notre échelle de temps) au fractionnement en ses cristaux constitutifs que l'on retrouve fréquemment, parfois en couches importantes, au pied des falaises ou des rochers (ou à l'intérieur), ces amoncellements détritiques constituant « l'arène (granitique) ».

Ce fractionnement est la conséquence d'une part des différences de valeur des coefficients d'expansion thermique des constituants fondamentaux de la roche (donnant lieu à la dislocation de l'agrégat sous l'action des variations de température nycthémérales et saisonnières) et d'autre part de la différence d'« érodabilité » (différence de dureté et de réactivité chimique) de ces mêmes constituants .

C'est de là que résultent aussi le « doucissement » avec dépôts d'arène, des blocs empilés ou dispersés dans les célèbres « chaos », véritables champs de « boules » de granite¹⁰, et le creusement de ces boules et autres rochers ou falaises suite aux intempéries et particulièrement suite à l'abrasion éolienne et à l'action physicochimique des embruns (Fig. 7.6 à 7.12).

Cet effet de creusement – tellement caractéristique des paysages granitiques tel le plus célèbre d'entre eux certainement, celui des « Calanches » de Piana (Fig. 7.8) – a parsemé la Revellata de rochers creux (Fig. 7.6), de cavernes (Fig. 7.11) et de grottes, dont la célèbre « Grotte des Veaux-marins », située sur la cote occidentale et accessible en bateau, et la plus discrète « Grotte des Chauves-souris montrée sur la photo de la figure 7.9.



Figure 7.6. Rochers creux.



Figure 7.7. Rochers creux.

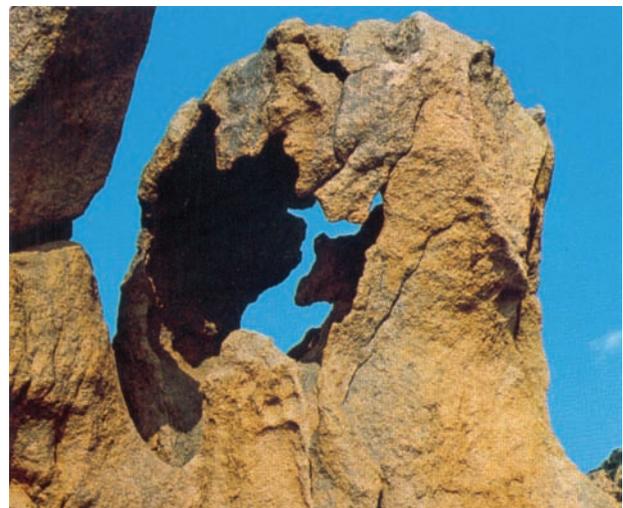


Figure 7.8. Les Calanches (Piana).

La figure 7.9 montre une vue plongeante dans la « Grotte des Chauves-souris », vue prise depuis l'entrée « soupirail ». On y distingue l'appareil type Radim alimenté par batterie qui nous a permis l'enregistrement d'exhalation dans l'air reproduit au chapitre 3.

La photo de la figure 7.10 montre les stalactites siliceuses, notamment en draperies, de cette grotte. La figure 7.11.a montre la caverne située sur la falaise ouest à l'aplomb du studio du phare telle que nous la découvrièmes et qui se révéla l'une des cavités les plus émissives et que nous baptisâmes pour référence « Grotte Stareso-Montefiore ».

La photo de la figure 7.11.b montre cette même caverne après que nous l'eûmes « fermée » d'un mur (mortier léger pour remise en état aisée ultérieurement) afin d'y enregistrer sur longue durée l'exhalation in situ du radon. Une petite cavité latérale, visible sur la photo, nous a fourni l'échantillon d'arène le plus émissif [répertorié H

¹⁰ Le fractionnement en blocs primaires est, on le sait, lui-même imputable à l'apparition de joints de décompression du massif granitique lors de sa remontée par isostasie.

ci-après et présentant une activité unitaire de 211 Bq/(m³.kg)].

Une cavité semblable se trouve à la gauche de la grotte et a fourni l'échantillon d'arène G classé en deuxième position par ordre d'activité décroissante : 196 Bq/(m³.kg).

Comme il a été dit, ces cavités diverses contiennent toutes une quantité plus ou moins grande d'arène conservée pratiquement intacte après dépôt ce qui nous a permis une collecte d'échantillons bien disséminés sur la presqu'île au même titre que les échantillons de roches que nous avons eues évidemment cassés des rochers et du socle. Ceci nous a permis comme on le verra 2 classements remarquables **séparés**.

On ne s'étonnera guère de la nette différence d'émissivité trouvée entre les échantillons de roches tamisés après concassage complet (de manière à ne perdre aucune composante de l'échantillon comme préconisé dans notre méthode de conditionnement standard précédemment décrite) et les échantillons d'arène simplement tamisés pour n'en retenir que la partie fine.

Comme les composés uranifères - et donc le radium qui en est issu - se trouvent préférentiellement dans les intergrains et les micas, composés les plus friables du granite, (cf étude ultérieure), les échantillons d'arène « doivent » a priori être plus émissifs et c'est bien ce que confirment les 2 courbes correspondantes (Fig. 7.17).

La figure 7.12 situe (relevé au G.P.S.) les endroits de prélèvement des échantillons de roche (numéros) et d'arène (lettres).



Figure 7.9. Radim dans la grotte des chauves-souris.



Figure 7.10. Stalactites siliceuses en draperies.



Figure 7.11.a. Grotte Stareso-Montefiore.



Figure 7.11.b. Grotte Stareso-Montefiore « fermée ».

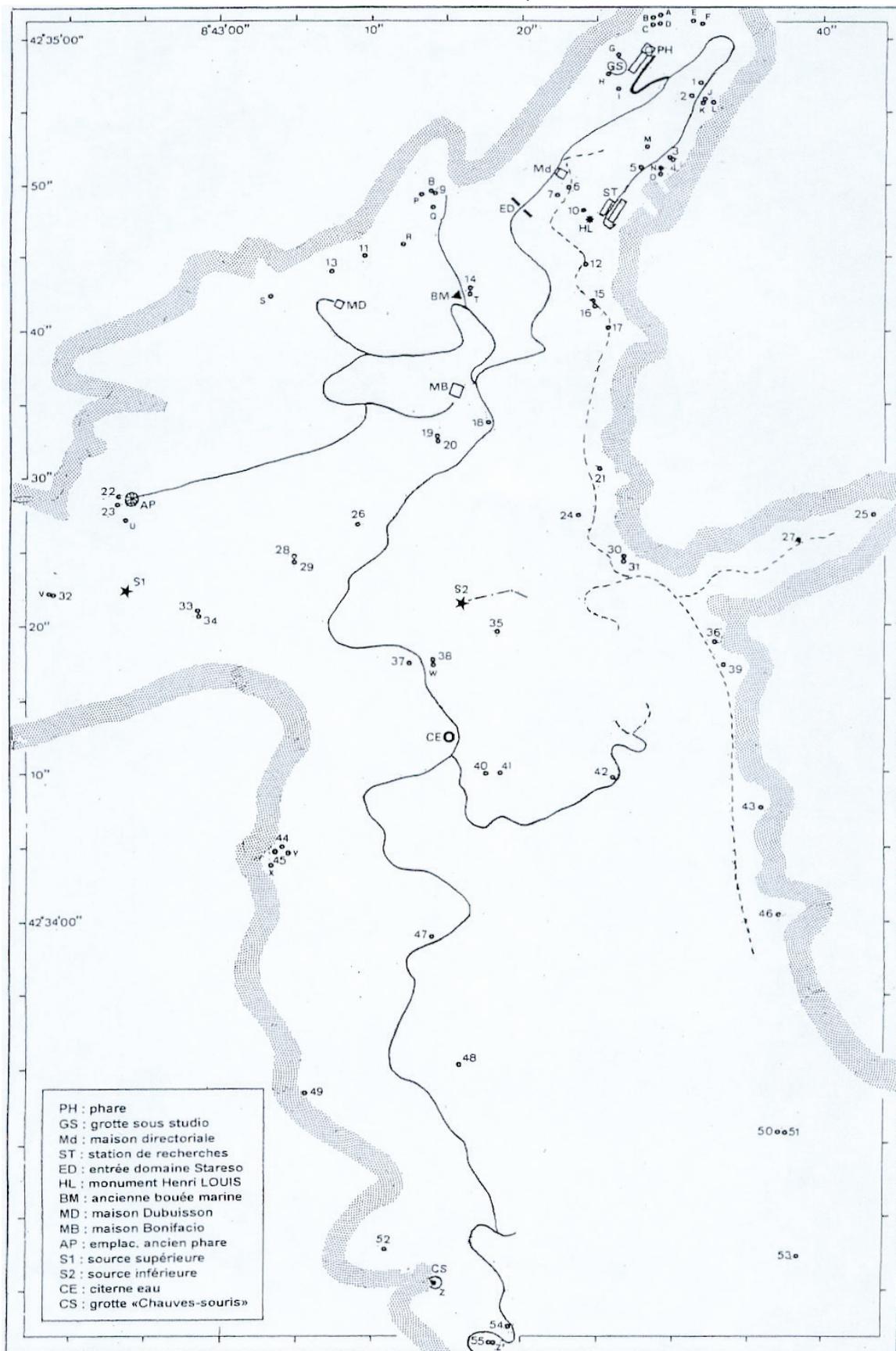


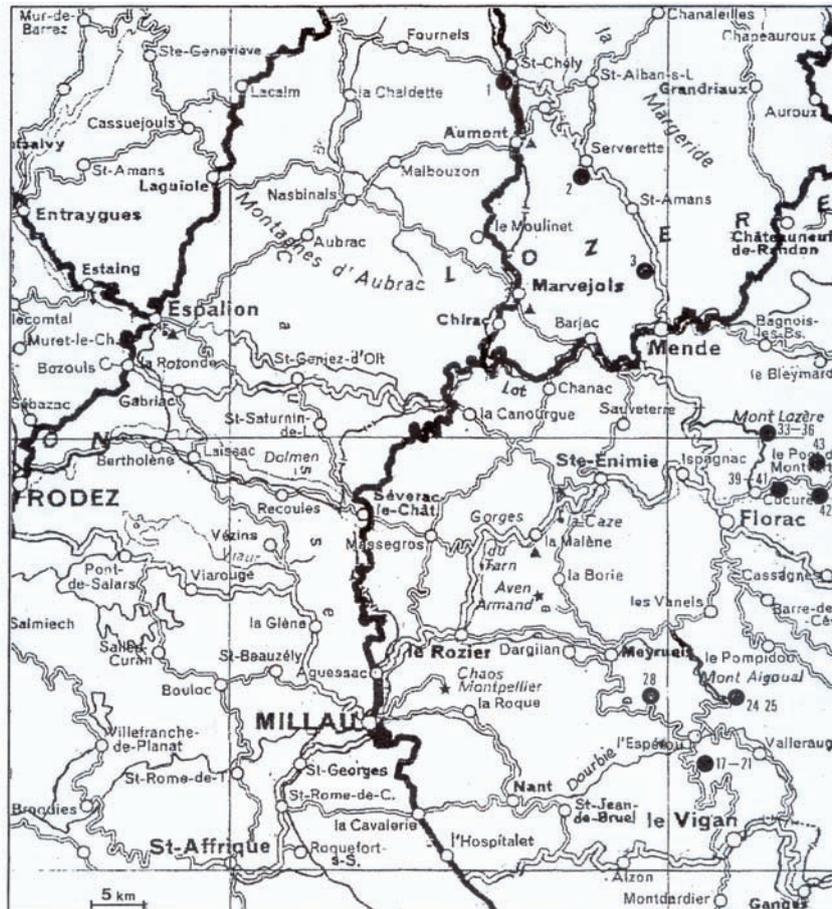
Figure 7.12. Localisation des prélèvements de granite massif et d'arène de la Revellate.

7.3.2. Granite (et arène granitique) des Cévennes (France)

La figure 7.13 situe les endroits de prélèvement des échantillons et quelques précisions y sont adjointes. Bien que la zone de collecte des échantillons soit très vaste, on peut constater sur la figure donnant le graphe que la loi est très bien respectée – en une

droite unique! – et que la distribution est cette fois exceptionnellement large [pas loin de 2 ordres de grandeur: de 2,7 à 139 Bq/(m³.kg)] et ce avec un excellent coefficient de corrélation: 0,9964 !

Les prélèvements d'arène étant ici très peu nombreux, nous les avons simplement associés aux échantillons normalement concassés.



1. Sortie Autoroute du Sud n° 34, N106 vers Mende, 32 km avant Mende, bloc granite dans campagne
- A2. Sortie de Serverette, Arène chaotique dans toute la zone
3. Carrière, borne 88, altitude >1000m, peu avant Baraque-de-Chastel
- A17-21 Début ascension Col-du-Minier, granite porphyroïde de St-Guiral (Aigoual), pratiquement au même endroit : A17 : Arène, 18 : Aplite, 19 : Aplite rose, 21 : Orthose «dents de Cheval»
24. Parking du Col-de-la-Broue
25. Col-du-Minier, 1350m
28. Granite de Bramabiau, le Bonheur coule dans le calcaire (Abîme) mais flancs composés de granite peu compétent
33. Sortie de «Les Bondons» (Mont Lozère), 1^{er} affleurement : granite très compétent
34. Même endroit, échantillon peu compétent
- A35. Même endroit, arène
36. Petit dyke, rouge-vert
39. D998, après Cocurès, vallée du Tarn, flanc gauche contrebas route : granite gris-noir (en surface), lit Tarn : granite blanc nettoyé en « hautes eaux ». Echantillon: flanc rive droite niveau route
40. Même endroit, aplite
41. Même endroit, avec filons de quartz centimétriques
42. Borne 37, 8 km avant bifurcation vers Freissinet-de-Lozère, granite frais, falaise arasée: élargissement de la route
43. D35, peu avant point de vue Cascade de Runes

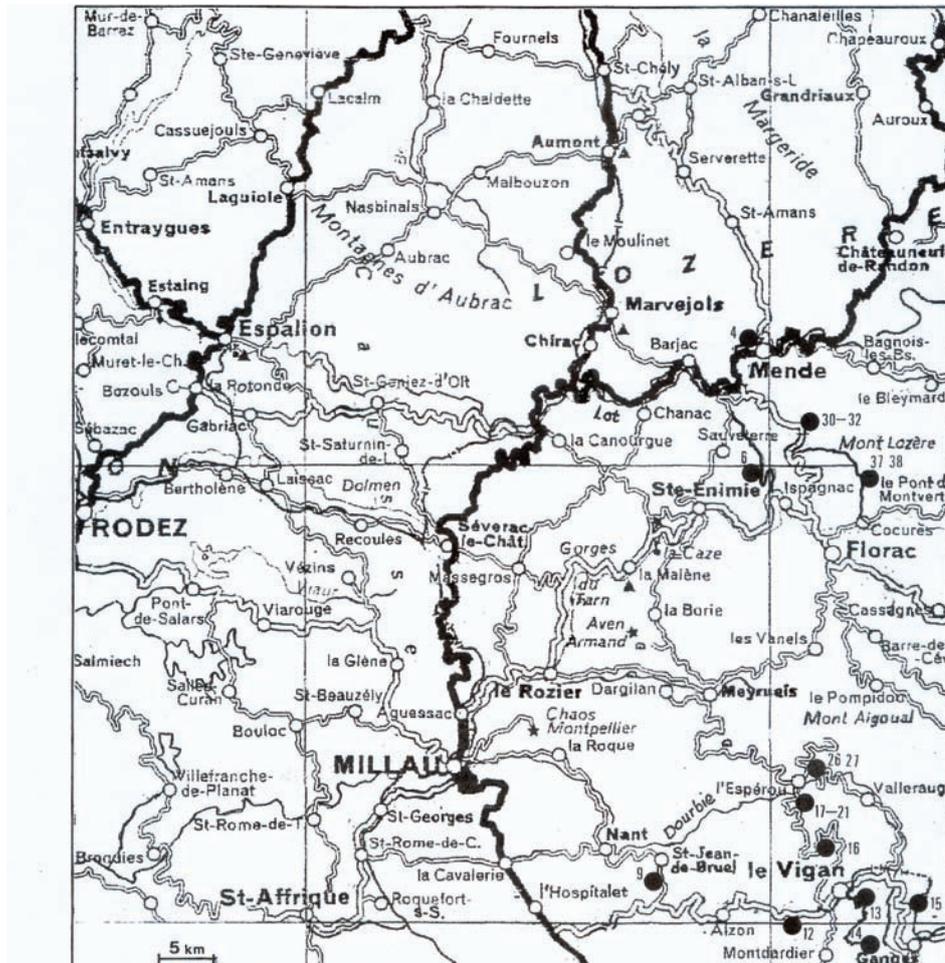
Figure 7.13. Localisation des prélèvements de granite (et arène granitique) des Cévennes (France).

7.3.3. Schiste des Cévennes

La figure 7.14 situe les endroits de prélèvement des échantillons et quelques précisions y sont adjointes.

Remarque. Une valeur (reprise dans le tableau de résultats) n'est pas reportée sur le graphe parce que tombant en dehors (en-dessous) du domaine

standard utilisé pour tous les diagrammes homologues [valeur 0,6 Bq/(m³.kg)]. Mais ce point s'alignerait correctement sur le graphe, ce qui confirme ou au moins conforte une fois de plus l'excellente qualité de l'appareil capable de fournir un résultat acceptable même dans une gamme de valeurs particulièrement basses (que le constructeur lui-même « rejette »).



4. Falaise entrée de Mende, borne 82, altitude 830m
- 6', 6'' D31, 2 virages avant borne 35, descente vers Gorges du Tarn, 6' : tamisage direct, 6'' : concassage standard
9. St-Jean-du-Bruel, sortie Dourbie, schiste micacé après série calcaire
12. 2 km avant village de Arre, falaise nouvellement raclée, schiste noir avec gros cristaux de quartz
13. Départ itinéraire 4 (Guide Masson), Le Vigan, schistes foncés
14. Bas route de St-Bresson vers St-Laurent-du-Minier, schiste gréseux
15. Après St-Julien-de-la-Nef, schiste noir avec gros cristaux de quartz
16. D48, début ascension col du Minier, schistes noirs
26. Col de Serreyrède, schiste noir
27. Vers Mont Aigoual, schiste à séricite
30. Sortie de St-Etienne-de-Valdonnez, nouvelle falaise route en contrehaut, ancienne usine de traitement de ZnS et PbS, micaschistes et cornéennes
31. Même endroit, schiste «rouge» remarquable
32. Même endroit, schiste «couleur zinc» remarquable
37. Fond vallée du Briançon, «schistes cévenols», très «rouillés»
38. Même endroit, schiste gris-noir

Figure 7.14. Localisation des prélèvements de schiste des Cévennes (France).

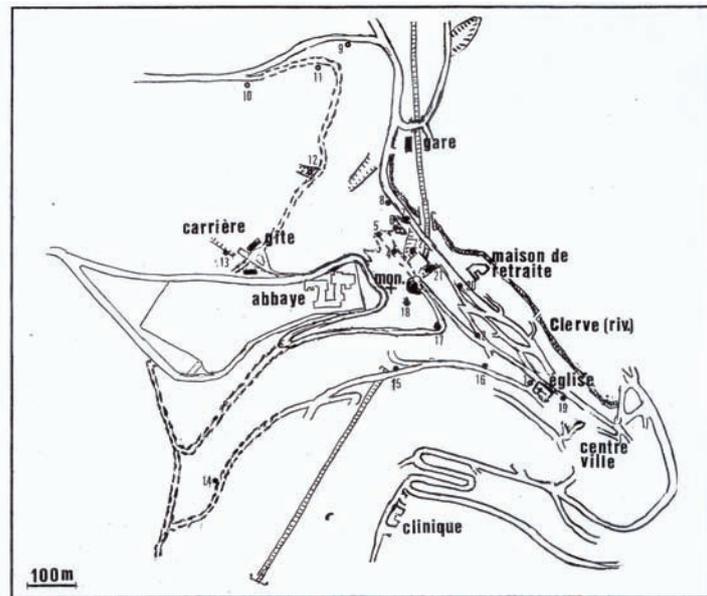
7.3.4. Schiste bigarré emsien de Clervaux (Grand-Duché de Luxembourg)

La figure 7.15 situe les endroits de prélèvement des échantillons et quelques précisions y sont adjointes. La montagne de Clervaux au sommet de laquelle est érigée la célèbre Abbaye bénédictine (ainsi que le « Monument aux Paysans ») est parsemée de très beaux affleurements d'un schiste le plus souvent compétent (en de rares endroits détritique) et parfois à tendance gréseuse : une carrière, dans le

vallon qui fait face à l'Abbaye a d'ailleurs fourni les pierres de construction de celle-ci.

Plusieurs failles sont bien visibles de la route dans la haute falaise qui la borde, d'autres (ou leurs prolongements) sont accessibles par le « chemin du gîte de l'Abbaye ».

La photo de la figure 7.16, qui montre un assortiment d'échantillons concassés et tamisés, justifie le vocable de schiste bigarré sous lequel est connu le schiste de l'endroit mieux encore que les bigarrures rougeâtres et verdâtres qui le valorisent en tant que pierre décorative.



1. Falaise directement à l'arrière de l'église de la ville
2. Falaise à l'angle de l'accès à la première maison
3. Falaise importante dans virage de la route (et départ du sentier vers l'Abbaye)
4. Première barre dans la montée, échantillon en bordure du sentier
5. Grande barre, avant deuxième volée d'escaliers
6. Affleurement dans la montée «de la gare vers l'abbaye», environ à mi-chemin entre la route et les escaliers ci-dessus
7. Affleurement au pied du sentier montant de la gare à l'Abbaye
8. Importante falaise en bordure de route, jouxtant le premier magasin
9. Importante falaise, nouvellement retaillée, en fond de parking, au début de la route vers l'Abbaye
10. Petit affleurement au début du sentier montant vers le gîte de l'Abbaye à partir de la route ci-dessus
11. Affleurement dans la montée vers le gîte (~150m depuis la route vers l' Abbaye)
12. Grande faille dans la montée vers le gîte, faisant face au parking de la gare
13. Ancienne carrière d'où ont été extraites les pierres de l'Abbaye (derrière le gîte)
14. Petit affleurement dans la descente du contournement de la ferme de l'Abbaye
15. Long affleurement le long de la route conduisant à l'église
16. Affleurement au début de la «Montée vers l'Abbaye », à gauche de l'église
17. Falaise interne du virage de la route en lacets au bas du « Monument aux Paysans»
18. Affleurement directement en contrebas du « Monument aux Paysans»
19. Affleurement au pied de l'escalier en contrebas de l'église, en direction du Centre de Clervaux (pratiquement en face du magasin d'Electricité Zahnen)
20. Petit affleurement à rue en face de la « Résidence des Ardennes»
21. Très grande faille au fond du parking, à gauche du tunnel chemin de fer (peu après le n° 20)
22. Très grande faille (et ancienne carrière ?) directement après le tunnel (quelques m avant montée «de la gare vers l'Abbaye »)

Figure 7.15. Localisation des prélèvements de schiste bigarré emsien de Clervaux (Grand-Duché de Luxembourg).



Figure 7.16. Colorations diverses du schiste (après concassage et tamisage)

7.4. Résultats numériques du 2^{ème} groupe de prélèvements

La figure 7.17 reproduit les graphes de ces séries d'échantillons.

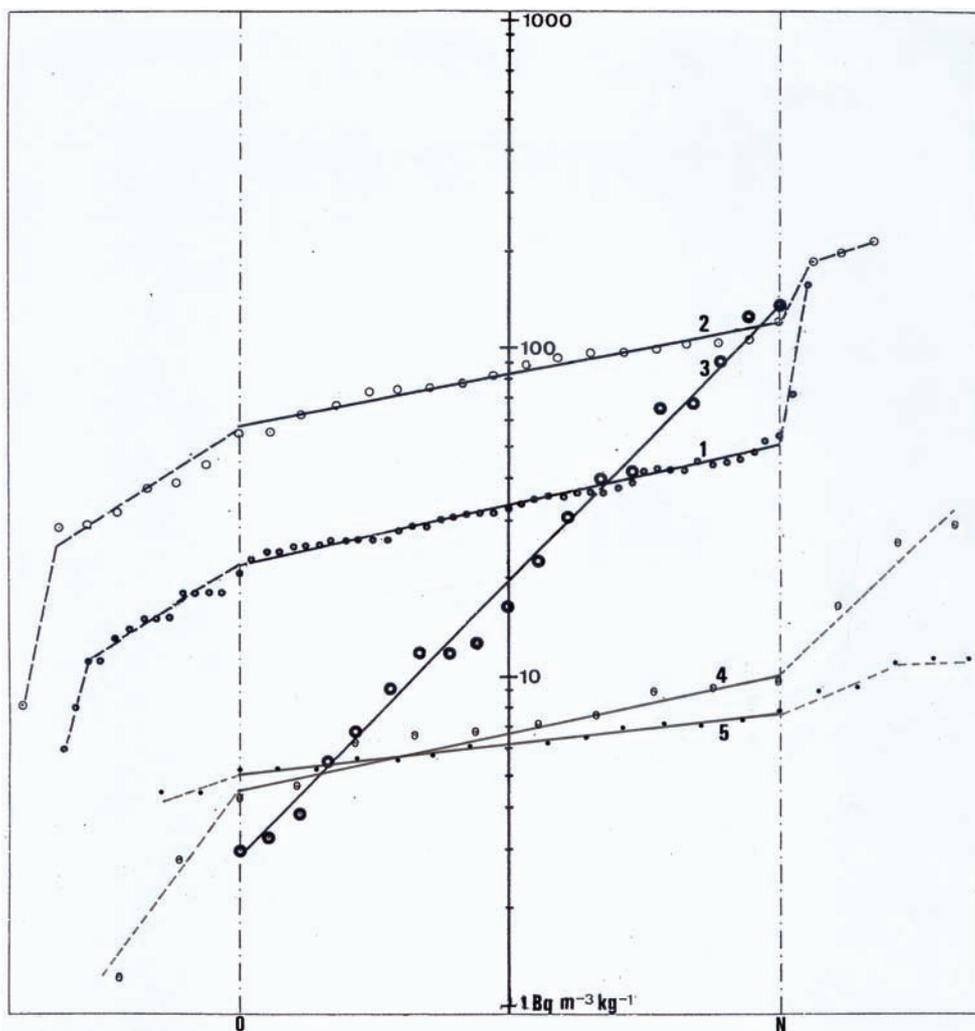


Figure 7.17. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire
 1 : granite massif et 2 : arène naturelle tamisée de la Revellate (Calvi – Corse) ; 3 : granite massif et arène des Cévennes ; 4 : schiste des Cévennes ; 5 : schiste de Clervaux.

7.4.1. Granite et arène granitique de la Revellate (Calvi, Corse)

GRANITE

R	A	n	A _{th}
15	159		
14	74		
4	55	40	51,1
37	53	39	50,1
16	48	38	49,0
53	47	37	48,0
27	46	36	47,0
29	45	35	46,0
40	45	34	45,0
50	45	33	44,1
19	44	32	43,2
25	43	31	42,3
41	43	30	41,4
38	39	29	40,5
34	38	28	39,7
5	37	27	38,8
17	37	26	38,0
46	37	25	37,2
18	36	24	36,4
36	36	23	35,7
10	35	22	34,9
45	34	21	34,2
13	33	20	33,5
3	32	19	32,8
44	32	18	32,1
55	32	17	31,4
20	31	16	30,8
28	30	15	30,1

R	A	n	A _{th}
22	29	14	29,5
23	29	13	28,9
49	28	12	28,3
9	26	11	27,7
11	26	10	27,1
12	26	9	26,5
24	26	8	26,0
39	26	7	25,4
2	25	6	24,9
7	25	5	24,4
47	25	4	23,9
32	24	3	23,4
35	24	2	22,9
31	23	1	22,4
8	21	0	21,9
26	18		
30	18		
43	18		
52	18		
33	15		
51	15		
1	15		
54	14		
6	13		
21	11		
48	11		
19	6		

ARENE

R	A	n	A _{th}
H	211		
G	196		
D	187		
A	125	17	121,8
Z ₂	109	16	116,6
X	106	15	111,6
E	104	14	106,8
Z ₁	100	13	102,3
V	99	12	97,9
Y	97	11	93,7
F	95	10	89,7
J	86	9	85,8
Z'	84	8	82,2
C	80	7	78,7
I	77	6	75,3
B	75	5	72,1
U	75	4	69,0
R	67	3	66,0
S	63	2	63,2
O	55	1	60,5
T	54	0	57,9
K	44		
M	39		
P	38		
W	31		
Q	29		
L	27		
N	8		

Formule de régression et caractérisation du site

GRANITE

$$\log A_{th} = 1,3408 + 0,0092.n$$

coefficient de corrélation : 0,9930

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
1,3408	1,7088	1,5248	21,92	51,14	33,48

Caractérisation : $22 < A_{th} < 51$ ou $33,5 \times / 1,5$ [Bq/(m³.kg)]

ARENE

$$\log A_{th} = 1,7627 + 0,0190.n$$

coefficient de corrélation : 0,9802

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
1,7627	2,0857	1,9242	57,90	121,81	83,98

Caractérisation : $58 < A_{th} < 122$ ou $84 \times / 1,45$ [Bq/(m³.kg)]

7.4.2. Granite (et arène granitique) des Cévennes (France)

R	A	n	A _{th}
A17	134	18	139,2
3	128	17	111,9
18	92	16	90,0
A2	71	15	72,4
24	66	14	58,2
39	41,4	13	46,8

43	40	12	37,6
28	31,2	11	30,2
25	22,3	10	24,3
21	16,5	9	19,6
36	12,8	8	15,7
19	12	7	12,6
A35	12	6	10,2

42	9,1	5	8,2
1	6,8	4	6,6
33	5,6	3	5,3
41	3,9	2	4,3
34	3,3	1	3,4
40	3	0	2,7

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,4390 + 0,0947.n$$

coefficient de corrélation : 0,9964

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,4390	2,1436	1,2913	2,7479	139,187	19,557

Caractérisation : $2,7 < A_{th} < 139$ ou $19,5 \text{ x/ } 7$ [Bq/(m³.kg)]

7.4.3. Schiste des Cévennes

R	A	n	A _{th}
26	27,5		
30	24,8		
12	16,0		
14	9,5	9	10,0
6'	9,0	8	9,2

37	8,9	7	8,4
15	7,4	6	7,7
9	6,8	5	7,0
27	6,6	4	6,4
32	6,5	3	5,9
38	6,1	2	5,4

31	4,5	1	4,9
13	4,2	0	4,5
16	2,8		
6''	1,2		
4	0,6		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,6559 + 0,0382.n$$

coefficient de corrélation : 0,9640

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,6559	0,9997	0,8278	4,5279	9,9931	6,7267

Caractérisation : $4,5 < A_{th} < 10$ ou $6,7 \text{ x/ } 1,5$ [Bq/(m³.kg)]

7.4.4. Schiste bigarré emsien de Clervaux (Grand-Duché de Luxembourg)

R	A	n	A _{th}
11	11,4		
10	11,3		
12	11,1		
14	9,3		
22	9,2		
7	7,7	14	7,7
20	7,4	13	7,5

17	7,3	12	7,2
1	7,1	11	7,0
4	7,0	10	6,8
18	6,7	9	6,6
5	6,3	8	6,4
13	6,0	7	6,2
2	5,9	6	6,0
19	5,9	5	5,8

15	5,6	4	5,7
16	5,6	3	5,5
3	5,3	2	5,3
8	5,2	1	5,2
21	5,1	0	5,0
6	4,3		
9	4,3		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,6559 + 0,0382.n$$

coefficient de corrélation : 0,9923

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,7009	0,8857	0,7933	5,0223	7,6860	6,2130

Caractérisation : $5 < A_{th} < 7,7$ ou $6,2 \text{ x/ } 1,3$ [Bq/(m³.kg)]

7.5. Localisation des prélèvements du 3^{ème} groupe (Vielsalm et environs) et brève description des sites

Nous regroupons ici les résultats des mesures effectuées dans la région de Vielsalm.

Ils concernent une majorité d'échantillons de schiste ordovicien du Val de Salm ainsi que du grès (Cierreux) et du quartzite (Hourt) cambriens. Remarquons que 2 cas de cette région ont été traités séparément : l'un au chapitre 6 (schiste noir de Petit-Thier) l'autre au chapitre 7 (galerie des Comtes de Salm à Salmchâteau).

7.5.1. Schiste et schiste gréseux de Vielsalm (affleurement voisin de l'église)

Un affleurement de schiste gréseux noir se situe en ville, en contrebas de l'église de Vielsalm au delà du parking du super-marché de la route vers Trois-Ponts.

Cet affleurement est court de sorte que nous avons dû espacer nos 15 prélèvements de 4 en 4 mètres seulement.

On constate que les 4 valeurs « hors-alignement » sur le graphe correspondent systématiquement à une zone centrale de l'affleurement.

On notera qu'en incluant l'échantillon n°8 dans la série retenue pour la caractéristique linéaire, on obtient un coefficient de corrélation un peu supérieur, soit 0,978, mais il ne s'agit là que d'un gain tout académique sans justification physique réelle.

Par contre, on peut constater que la différence de pente entre les points retenus et les points « rejetés » est très faible et donc peu significative en pratique. Pour mieux appréhender le site, il apparaît beaucoup plus raisonnable d'inclure les points supplémentaires, à l'exclusion du premier de la série toutefois, dans la « droite de caractérisation », on trouve en effet dans ce cas (cfr tableau et graphe 1' sur la figure) une corrélation de 0,964 qui reste acceptable avec évidence.

7.5.2. Schiste de la tranchée du chemin de fer de Rencheux (passage à niveau)

Un très bel affleurement de schiste est très facilement accessible le long de la voie du chemin de fer (Liège - Vielsalm) à partir du passage à niveau coupant la route de Vielsalm à Rencheux. De larges couvertures de lichen jaune vif s'échelonnent à quelques mètres de hauteur sur

cet affleurement, long d'environ 200 mètres et haut en sa partie centrale de quelque 10 mètres.

La roche est le plus souvent très compétente et se débite en certains endroits en feuillets très minces de type phyllade d'une teinte grise-noire marquée. Certains échantillons présentent une teinte nettement plus argileuse, d'autres sont d'un brun rouille trahissant la présence de fer.

19 prélèvements d'échantillons successifs, distants de 10m, ont été effectués. Ils sont numérotés de 1 à 19 le dernier étant collecté côté passage à niveau.

7.5.3. Schiste de l'ancienne carrière « montagne en Fosse-Roulette »

Une modeste carrière a été ouverte sur le flanc de la montagne le long de la route de Vielsalm à SalmChateau peu après la galerie en "Fosse-Roulette" dite de la "Trûtchète" (actuellement close par une grille imposante et lieu de refuge de chauves-souris).

16 prélèvements d'échantillons successifs, distants de 2m, ont été effectués en 2 niveaux le long de l'affleurement, sensiblement perpendiculaire à la route, accessible par un sentier ascendant. Cet affleurement de schiste (gris) comporte une très importante couverture de lichen jaune vif dont 100 grammes ont été soigneusement prélevés (par raclage) pour en mesurer l'exhalation. On verra que la distribution "n'est pas aussi mauvaise" qu'on eût pu le craindre a priori au vu de l'exiguïté du site mais elle semble se subdiviser en 2 parties que nous avouons personnellement ne pas retrouver nettement sur le terrain de sorte que nous préférons évidemment conserver la caractérisation en "site unique".

Esquisse du site et localisation approximative des prélèvements (de 2 en 2 mètres dans la mesure de l'accessibilité du site) :

1. Limite gauche de la grande paroi, qui comporte une importante couverture de lichen jaune
8. Premier "bec" de l'affleurement
9. Deuxième "bec"
10. Premier prélèvement du deuxième niveau (6 à 8 mètres au dessus du n°9).

7.5.4. Galerie souterraine de Bêche

De nombreuses galeries ont été creusées dans les « montagnes » de la région pour l'extraction du schiste et du coticule.

La galerie étudiée ici s'ouvre environ à mi-hauteur de la colline de Bêche (voisinage de Salmchâteau).

Elle est en fait double (en Y). La galerie « principale », quasi rectiligne, est longue d'environ 100m et elle comporte, à quelque 15m de l'entrée, un embranchement vers la droite d'environ 75m de profondeur, oblique par rapport à la galerie principale. Cet embranchement comporte (à environ 20m) un élargissement important (« chambre ») qui a été utilisé comme refuge lors de la dernière guerre, ce pourquoi nous avons baptisé cette galerie (complète) : « Galerie refuge » (G.R.), nom qui se trouve être doublement justifié par le fait qu'elle est actuellement lieu de refuge de diverses espèces de chiroptères et est à cet effet protégée depuis peu par une grille imposante.

21 prélèvements d'échantillons successifs, distants de 5m, ont été effectués dans la galerie principale, ils portent les numéros d'archivage 1a à 21a, comptés à partir du fond de la galerie.

17 prélèvements d'échantillons successifs, distants de 5m, ont été effectués dans la galerie secondaire, ils portent les numéros de 1b à 16b, également comptés à partir du fond de la galerie. (dans la « chambre », en plus de l'échantillon 12b, un deuxième échantillon a été prélevé sur la paroi opposée et est repéré 12c).

Le schiste est en général gris, sauf vers l'entrée de la galerie où il est résolument mauve avec par endroits une pelure de coticule. C'est peut-être cet affleurement de coticule qui a motivé le creusement de la galerie à cet endroit quoique sa disparition « rapide » à partir de quelques mètres de profondeur, semble incompatible avec l'évident acharnement des carriers. La présence d'importantes meules (avec imperfections) abandonnées dans le voisinage suggère au moins une autre hypothèse (complémentaire ?) : la compétence de la roche a justifié son exploitation à diverses fins « industrielles », notamment comme pierre de construction (tout comme l'arkose exploitée dans les carrières toutes proches et utilisée dans la construction de l'église de Salmchâteau entre autres). Par endroits, le schiste présente des traces vertes (cuivre), en d'autres, il apparaît nettement gréseux. D'importantes veines de quartz sont apparentes de part et d'autre du « couloir ».

Remarques

1.- Bien que double, cette excavation fournit, comme le montre la figure 7.18, des échantillons obéissant à la loi « unique » évoquée et ce très probablement parce que les 2 branches sont au même niveau et dans une zone « relativement homogène et sans faille (on comparera avec intérêt aux cas évoqués au chapitre 8).

2.- Un échantillon se démarque nettement [> 40 Bq/(m³.kg)]. Il semble que ce soit là une caractéristique de la région, le fait ayant déjà été constaté dans nos prélèvements de la galerie dite « de la Trûchète » en Fosse Roulette et dans l'ancienne « mine de cuivre » située au-delà du cimetière de Salmchâteau. La corrélation avec la présence du cuivre (malachite) semble probable et mérite approfondissement.

7.5.5. Schiste mauve de la carrière du « Thier del Preux »

Un très beau plan miroir s'ennoyant à quelque 40° parallèlement au chemin d'accès est pour le moment très accessible dans la carrière Célis (en exploitation notamment pour le schiste et le coticule).

Ce dernier est travaillé à Sart par M. Célis, géologue et dernier artisan mettant en oeuvre cette célèbre « pierre à rasoir », pratiquement unique en son genre et aux gisements strictement limités à la région de Vielsalm dont elle a contribué à faire jadis la richesse et qui doit ses propriétés au grenat spessartine qu'elle contient sous forme de microcristaux. Le coticule se trouve ici sous forme de veines centimétriques intercalées dans le schiste. Le schiste ferro-manganifère – mauve – contient peu de radium comme nous l'avons déjà montré dans une publication antérieure. Mais nous avons voulu ici en reprendre l'étude systématique pour le situer en comparaison des autres roches de la région. On notera que le coticule lui aussi est très pauvre en radium.

La carrière se situe le long du chemin qui conduit à Verleumont à partir du site du monument érigé en hommage aux soldats américains tombés lors de l'offensive des Ardennes (route de Goronne à Sart).

Les 16 échantillons de schiste ont été prélevés en partant du bout de la carrière (côté Verleumont) et sont distants de 10 en 10 mètres.

On constatera que tous les échantillons sont raisonnablement alignés (coefficient de corrélation : 0,986).

7.5.6. Grès de Cierreux (falaise du chemin de fer)

Un très bel affleurement de grès est facilement accessible le long de la voie du chemin de fer (Vielsalm - Gouvy) longeant la route conduisant de Salm-Château à Gouvy ou Schmiede (au Grand Duché de Luxembourg).

Cet affleurement d'environ 100 mètres, nouvellement « rafraîchi » par la mise à double voie de la ligne de chemin de fer, nous a permis le prélèvement de 17 échantillons distants de 6 mètres d'un grès particulièrement compétent. Les échantillons sont numérotés de 1 à 17 vers Vielsalm.

7.5.7. Quartzite de la carrière de Hourt

La carrière de Hourt est célèbre à la fois pour son « quartzite rose » qui est l'une des plus anciennes roches affleurantes de Belgique (Cambrien inférieur, anciennement Devillien, du Massif de Stavelot) et pour ses riches minéralisations.

Nous avons prélevé 15 échantillons de quartzite régulièrement espacés de 10 mètres. Ils sont numérotés de 1 à 15 à partir du flanc droit de la carrière, le premier prélèvement est effectué dès l'entrée dans la carrière (premier accès normal en venant de Vielsalm).

Un seizième échantillon, répertorié sous le numéro 15', a été récolté dans une poche non complètement lapidifiée. Il s'est avéré être le plus

émisif du lot mais l'écart n'est pas suffisant pour l'exclure de la droite caractéristique, comme on peut le voir sur la figure correspondante.

Remarque. La carrière est connue, comme on l'a dit, pour les minéralisations remarquables (y compris l'or) qui y ont été trouvées comme d'ailleurs en de nombreux sites de la région de Vielsalm. Ce lieu, où se sont heurtés deux anticlinaux sensiblement orthogonaux appartenant à deux plissements tectoniques différents (« ardennais » et « de Stavelot »), a en conséquence subi des contraintes considérables et diverses. Compressions, extensions et torsions ont déformé les roches et créé des fissures et des failles favorables aux cheminements hydrothermaux et donc à la génération de minéraux spéciaux ce qui explique cette richesse minéralogique locale.

7.6. Résultats numériques du 3^{ème} groupe de prélèvements

La figure 7.18 reproduit les graphes de ces séries d'échantillons.

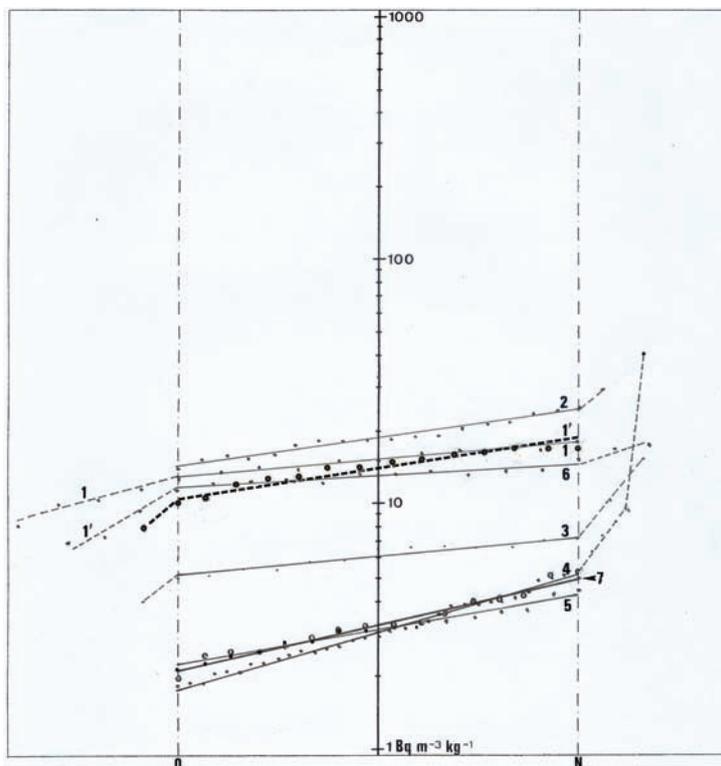


Figure 7.18. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire

1 et 1' : schiste et schiste gréseux de Vielsalm ; 2 : schiste de la tranchée de Rencheux ; 3 : schiste de l'ancienne carrière « en Fosse-Roulette » ; 4 : schiste de la galerie de Bèche ; 5 : schiste mauve de la carrière du « Thier del Preux » ; 6 : grès de la falaise du chemin de fer de Cierreux ; 7 : quartzite de la carrière de Hourt.

7.6.1. Schiste et schiste gréseux de Vielsalm (affleurement voisin de l'église)

R	A	n ₁	A _{th1}	n ₂	A _{th2}
9	16,58	10	17,29	13	17,93
1	16,52	9	16,74	12	17,19
15	16,38	8	16,21	11	16,48
10	16,18	7	15,69	10	15,80
13	15,64	6	15,19	9	15,15
4	14,91	5	14,71	8	14,53
12	14,32	4	14,24	7	13,93

3	13,57	3	13,79	6	13,36
2	13,55	2	13,35	5	12,81
14	12,90	1	12,93	4	12,28
11	12,15	0	12,52	3	11,77
8	11,50			2	11,29
7	10,02			1	10,82
5	9,57			0	10,38
6	7,94				

Formule de régression et caractérisation du site (par n₁)

$$\log A_{th1} = 1,0975 + 0,0140.n_1$$

coefficient de corrélation : 0,977

log A _{th1} min.	log A _{th1} max.	Moy. arithm.	A _{th1} min.	A _{th1} max.	Moy. géom.
1,0975	1,2378	1,1677	12,5170	17,2910	14,7116

Caractérisation : $12,5 < A_{th1} < 17,3$ ou $14,7 \times / 1,15$ [Bq/(m³.kg)]Formule de régression et caractérisation du site (par n₂)

$$\log A_{th2} = 1,0160 + 0,01827.n_2$$

coefficient de corrélation : 0,964

log A _{th2} min.	log A _{th2} max.	Moy. arithm.	A _{th2} min.	A _{th2} max.	Moy. géom.
1,0160	1,2536	1,1348	10,3753	17,9308	13,6395

Caractérisation : $10,4 < A_{th2} < 17,9$ ou $13,6 \times / 1,3$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.2. Schiste de la tranchée du chemin de fer de Rencheux (passage à niveau)

R	A	n	A _{th}
4	28,53		
14	24,36	17	23,92
13	23,70	16	23,17
8	23,08	15	22,45
10	21,70	14	21,76
11	21,12	13	21,08

2	20,24	12	20,43
18	18,56	11	19,79
16	18,40	10	19,18
3	18,00	9	18,58
9	17,97	8	18,00
12	17,61	7	17,45
15	17,58	6	16,91

7	17,08	5	16,38
17	15,54	4	15,87
19	15,24	3	15,38
5	15,05	2	14,90
1	14,87	1	14,44
6	13,71	0	13,99

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 1,1458 + 0,0137.n$$

coefficient de corrélation : 0,9860

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
1,1458	1,3787	1,2623	13,9894	23,9166	18,2915

Caractérisation : $14 < A_{th} < 24$ ou $18,3 \times / 1,3$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.3. Schiste de l'ancienne carrière « montagne en Fosse-Roulette »

R	A	n	A _{th}
12	15,1		
4	10,1		
2	7,26	12	7,44
10	7,00	11	7,20
1	6,77	10	6,98

14	6,75	9	6,76
7	6,70	8	6,54
3	6,67	7	6,34
6	6,56	6	6,14
15	5,94	5	5,94
16	5,82	4	5,76

13	5,40	3	5,58
8	5,39	2	5,40
11	5,09	1	5,23
9	5,00	0	5,07
5	4,04		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,7046 + 0,0139.n$$

coefficient de corrélation : 0,9693

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,7046	0,8714	0,7880	5,0652	7,4370	6,1376

Caractérisation : $5 < A_{th} < 7,4$ ou $6,1 \times / 1,2$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.4. Galerie souterraine de Bêche

R	A	n	A _{th}
4b	41,04		
7a	9,30		
15a	8,34		
11b	7,48		
2a	6,40		
13b	5,36	31	5,09
1a	5,01	30	4,92
20a	4,93	29	4,75
4a	4,81	28	4,60
9b	4,34	27	4,44
5b	4,03	26	4,29
17a	3,96	25	4,14

2b	3,96	24	4,00
13a	3,86	23	3,87
10b	3,84	22	3,74
14b	3,78	21	3,61
6a	3,49	20	3,49
1b	3,33	19	3,37
12c	3,11	18	3,26
3b	3,01	17	3,15
19a	2,98	16	3,04
3a	2,83	15	2,94
7b	2,79	14	2,84
8b	2,72	13	2,75
8a	2,58	12	2,65

16b	2,48	11	2,56
14a	2,47	10	2,48
21a	2,43	9	2,39
6b	2,38	8	2,31
12a	2,26	7	2,24
12b	2,21	6	2,16
15b	2,07	5	2,09
11a	2,05	4	2,02
9a	2,02	3	1,95
5a	1,84	2	1,88
10a	1,84	1	1,82
18a	1,80	0	1,76

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,2450 + 0,0149.n$$

coefficient de corrélation : 0,9955

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,2450	0,7069	0,4760	1,7579	5,0921	2,9919

Caractérisation : $1,76 < A_{th} < 5,1$ ou $3 \times / 1,7$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.5. Schiste mauve de la carrière du « Thier del Preux »

R	A	n	A _{th}
15	4,46	15	4,30
12	4,31	14	4,11
14	3,72	13	3,93
3	3,61	12	3,75
5	3,51	11	3,59

6	3,35	10	3,43
7	3,21	9	3,28
9	3,08	8	3,14
13	3,06	7	3,00
10	3,01	6	2,87
11	2,79	5	2,74

4	2,77	4	2,62
1	2,56	3	2,51
16	2,38	2	2,40
2	2,24	1	2,29
8	2,11	0	2,19

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,34066 + 0,01949.n$$

coefficient de corrélation : 0,986

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,34066	0,63301	0,48684	2,19109	4,29546	3,06786

Caractérisation : $2,2 < A_{th} < 4,3$ ou $3,07 \times / 1,4$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.6. Grès de Cierreux (falaise du chemin de fer)

R	A	n	A _{th}
8	16,52		
11	16,25		
16	14,39	11	13,93
2	13,32	10	13,68
7	13,10	9	13,44

3	13,02	8	13,20
15	13,02	7	12,97
17	12,98	6	12,74
13	12,81	5	12,52
4	12,21	4	12,30
5	12,12	3	12,08

9	11,92	2	11,86
10	11,81	1	11,65
1	11,16	0	11,44
14	9,27		
6	7,20		
12	6,87		

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 1,0587 + 0,0077.n$$

coefficient de corrélation : 0,9540

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
1,0587	1,1440	1,1013	11,4472	13,9309	12,6282

Caractérisation : $11,4 < A_{th} < 13,9$ ou $12,6 \times / 1,1$ [Bq/(m³.kg)]

7.6.7. Quartzite de la carrière de Hourt

R	A	n	A _{th}
15'	5,28	15	5,04
8	5,20	14	4,76
7	4,21	13	4,49
9	4,10	12	4,24
6	3,98	11	4,00

10	3,65	10	3,78
14	3,38	9	3,56
2	3,23	8	3,36
3	3,19	7	3,17
12	3,11	6	2,99
5	2,84	5	2,83

11	2,73	4	2,67
15	2,49	3	2,52
1	2,47	2	2,37
4	2,39	1	2,24
13	1,97	0	2,11

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,32524 + 0,0252.n$$

coefficient de corrélation : 0,985

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,32524	0,70279	0,51402	2,1147	5,04417	3,26602

Caractérisation : $2,1 < A_{th} < 5,0$ ou $3,3 \times / 1,55$ [Bq/(m³.kg)]

8. Le radon dans les roches et minéraux : distribution du radium sur site « pluriel ». Protocole court

8.1. Introduction

Au chapitre 5, nous avons présenté la loi de distribution statistique logarithmique qui s'est trouvée vérifiée sur tous les cas que nous avons étudiés et développés aux chapitres, 6 et 7.

Nous avons voulu vérifier l'application de cette loi sur des sites « suspects » - parce que « non homogènes¹¹ » voire même nettement différenciés a priori - c'est pourquoi nous nous sommes penché sur le cas d'un **site à 2 niveaux** très différents (l'ancienne carrière souterraine d'ardoise dite de la « Morépître » à Bertrix) et sur un cas de site comportant une **faille** nette et *convenablement* située dans la suite des prélèvements (la galerie souterraine horizontale d'extraction de schiste dite « des Comtes de Salm » sur la montagne du château des Comtes à Salmchâteau).

Mais un cas étudié s'est révélé « double » a posteriori (lors de la construction du diagramme préliminaire donnant la distribution statistique des mesures d'activité), ce qui, par parenthèse ici, peut convaincre de l'utilité de notre approche. Il s'agit d'un long affleurement routier, de 3 km (l'affleurement schisteux de Houffalize) qui nous semble comporter une, voire plusieurs, faille(s) intermédiaire(s) (nous nous référons aux très beaux « miroirs » visibles notamment des deux côtés de la rue de Libramont).

Dans ces 3 cas, il s'est avéré qu'une meilleure corrélation existe si l'on applique 2 fois la loi (paramètres différents donc) aux 2 parties de site que l'on peut voir apparaître sur le diagramme préliminaire « complet ».

Nous présentons ci-après les 3 cas en question selon le même protocole systématique qu'au chapitre précédent tout en comparant les 2 approches : ensemble unique d'une part et séparation en 2 sous-ensembles d'autre part.

8.2. Phyllade de Bertrix - Carrière souterraine de la « Morépître »

L'ancienne carrière d'ardoise de la Morépître à Bertrix, dont l'exploitation a définitivement pris fin dans les années 1970, a été récemment « récupérée » et, après d'importants travaux d'aménagement, ouverte au public.

Grâce au travail acharné de quelques personnes passionnées et à la volonté du Directeur, ce site constitue, avec la mine de charbon de Blégny, la carrière de phosphate de la Malogne à Mons et le Musée du coticule de Salm-Château entre autres, un des haut-lieux de préservation du patrimoine industriel souterrain de Wallonie. Ce sont aussi, en quelque sorte, des sanctuaires dédiés à la mémoire des travailleurs du sous-sol qui furent non seulement victimes d'une exploitation outrancière tant par la durée que par l'aridité du travail imposé mais encore soumis à un environnement particulièrement peu exaltant et très souvent cause d'une mortalité précoce et en tous cas toujours handicapant notamment par la poussière (silicose), l'humidité, l'abus bien compréhensif du tabac comme dérivatif avec en sus...le radon...en prime : nous voulons à notre manière (Fig. 8.1 à 8.3) ici leur rendre hommage.

Grâce à l'extrême complaisance du Directeur de la Morépître, il nous a été possible à plusieurs reprises de visiter les lieux puis à notre guise d'effectuer les prélèvements souhaités et ce aux 2 niveaux accessibles : -25 m (étage accessible au public « normal ») et -45 m (réservé à des visites et activités particulières pour public averti).

Ci-après sont présentées les 2 approches : à la figure 8.4, est tracé le graphe correspondant à la globalisation des mesures provenant des 2 niveaux comme faisant partie d'un « site unique » tandis qu'à la figure 8.5, nous avons considéré séparément les 2 niveaux.

La corrélation est dans tous les cas supérieure à 99% mais, alors que l'on doit exclure 19 mesures de la régression dans la première approche, on n'exclut que 2 fois 5 points dans la deuxième (et seulement du côté de l'exhalation maximale dans les 2 graphes).

Un simple regard sur les 9 derniers résultats (exclus de la régression linéaire unique !) du premier tableau (ils appartiennent tous au même niveau !) suffit à se convaincre qu'il y a là un argument de « taille » en faveur de la partition des résultats. On peut quasi ajouter que la conclusion **va de soi**.

¹¹ Pour une raison qui apparaîtra plus nettement après étude, nous préférons les qualifier de « pluriels ».

Figure 8.1. Carrière d'ardoise.
Guy Gilquin « gens d'Ardennes »
Ed. Remy (Beauraing), 1980.

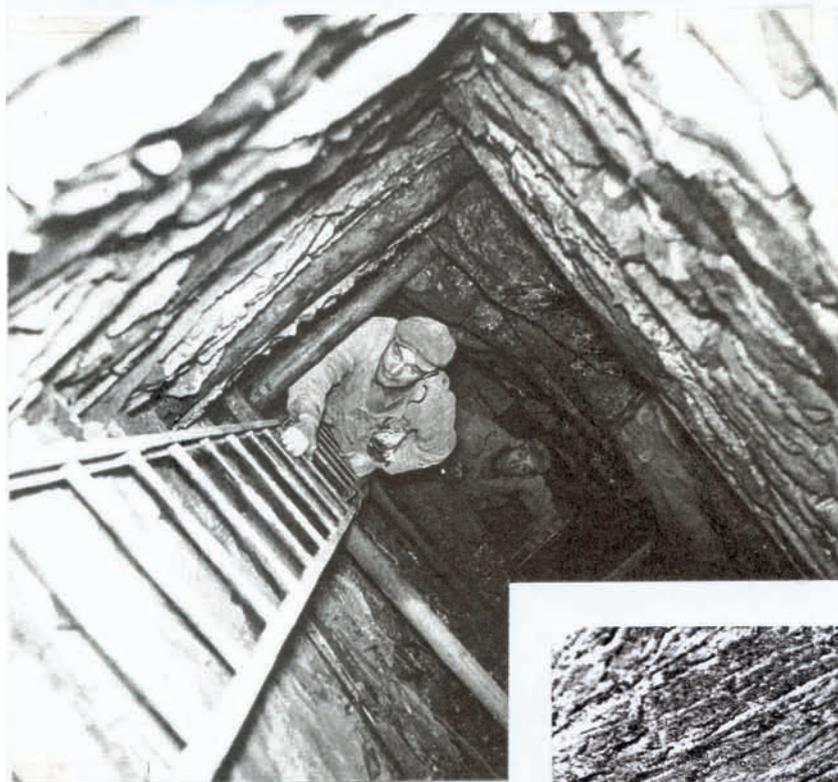


Figure 8.2. Puits d'accès aux
galeries d'extraction du coticule
(Regné – Vielsalm).

Figure 8.3. Mine de charbon
(Blégny) : étançonnage.



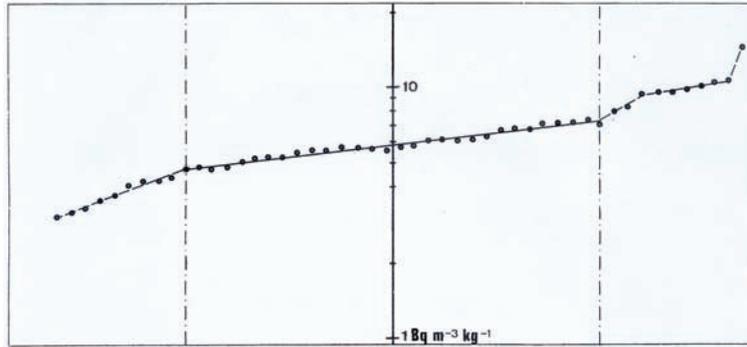


Figure 8.4. Carrière d'ardoise de la Morépître. Traitée comme site unique.

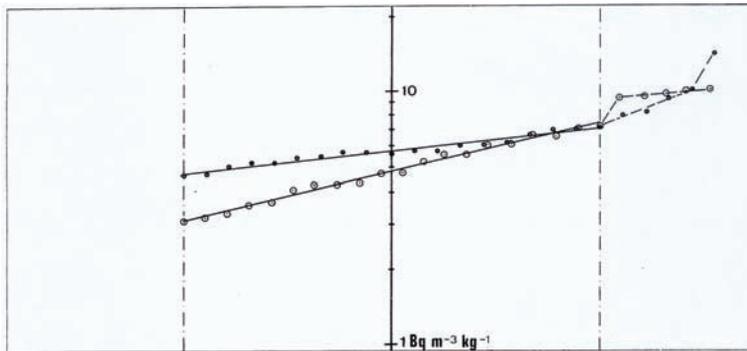


Figure 8.5. Carrière d'ardoise de la Morépître. Traitée comme site double (○ étage -25m; ● étage -45m).

9. Liste des résultats de mesures sur le phyllade de la «Morépître» et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique)

« SITE UNIQUE »

R	A	n	A _{th}
22B	14,13		
23A	10,30		
9A	10,20		
21B	10,10		
10A	9,90		
14A	9,60		
7B	9,57		
21A	9,50		
19B	8,47		
9B	8,12		
11A	7,24	29	7,36
5B	7,18	28	7,25
18B	7,13	27	7,14
6B	7,13	26	7,02
16A	7,10	25	6,92
22A	6,78	24	6,81

1A	6,78	23	6,70
12B	6,70	22	6,60
23B	6,43	21	6,50
17B	6,25	20	6,39
24A	6,20	19	6,30
13B	6,19	18	6,20
25A	6,10	17	6,10
24B	5,86	16	6,01
3B	5,84	15	5,91
8B	5,75	14	5,82
2B	5,71	13	5,73
13A	5,66	12	5,64
18A	5,64	11	5,55
10B	5,50	10	5,47
20B	5,46	9	5,38
16B	5,38	8	5,30
20A	5,23	7	5,22

16B	5,18	6	5,14
11B	5,17	5	5,06
14B	4,98	4	4,98
2A	4,79	3	4,90
15B	4,74	2	4,82
17A	4,74	1	4,75
4B	4,67	0	4,68
12A	4,40		
15A	4,31		
4A	4,28		
8A	4,10		
7A	3,70		
5A	3,60		
19A	3,38		
6A	3,23		
3A	3,10		

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)
 A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]
 n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1), ch. 6
 A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,6698 + 0,0068.n$$

coefficient de corrélation : 0,9950

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,6698	0,8670	0,7684	4,6752	7,3621	5,8668

Caractérisation : $4,7 < A_{th} < 7,4$ ou $5,9 \times / 1,25$ [Bq/(m³.kg)]

« SITE DOUBLE »

Niveau - 25m

R	A	n	A _{th}
23A	10,30		
9A	10,20		
10A	9,90		
14A	9,60		
21A	9,50		
11A	7,24	19	7,50
16A	7,10	18	7,17
22A	6,78	17	6,84
1A	6,78	16	6,54
24A	6,20	15	6,24
25A	6,10	14	5,96
13A	5,66	13	5,69
18A	5,64	12	5,44
20A	5,23	11	5,19
2A	4,79	10	4,96
17A	4,74	9	4,74
12A	4,40	8	4,52
15A	4,31	7	4,32
4A	4,28	6	4,12
8A	4,10	5	3,94
7A	3,70	4	3,76
5A	3,60	3	3,59
19A	3,38	2	3,43
6A	3,23	1	3,28
3A	3,10	0	3,13

Niveau - 45m

R	A	n	A _{th}
22B	14,13		
21B	10,10		
7B	9,57		
19B	8,47		
9B	8,12		
5B	7,18	18	7,17
18B	7,13	17	7,00
6B	7,13	16	6,84
12B	6,70	15	6,68
23B	6,43	14	6,53
17B	6,25	13	6,38
13B	6,19	12	6,23
24B	5,86	11	6,08
3B	5,84	10	5,94
8B	5,75	9	5,80
2B	5,71	8	5,67
10B	5,50	7	5,54
20B	5,46	6	5,40
1B	5,38	5	5,28
16B	5,18	4	5,16
11B	5,17	3	5,04
14B	4,98	2	4,92
15B	4,74	1	4,81
4B	4,67	0	4,70

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)

A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]

n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1), ch. 6

A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

Formule de régression et caractérisation du site

Niveau -25m

$$\log A_{th} = 0,4953 + 0,0200.n$$

coefficient de corrélation : 0,9963

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,4953	0,8753	0,6853	3,1282	7,5041	4,8451

Caractérisation : $3,1 < A_{th} < 7,5$ ou $4,8 \times / 1,55$ [Bq/(m³.kg)]

Niveau -45m

$$\log A_{th} = 0,6719 + 0,0102.n$$

coefficient de corrélation : 0,9906

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,6719	0,8555	0,7637	4,6979	7,1697	5,8036

Caractérisation : $4,7 < A_{th} < 7,2$ ou $5,8 \times / 1,25$ [Bq/(m³.kg)]

9.1. Schiste ordovicien du Val de Salm galerie souterraine des «Comtes de Salm» à Salmchateau

Au chapitre précédent, nous avons étudié la galerie de Bêche qui, en fait, est de conformation double (2 embranchements en Y au même niveau) mais qui se comporte au point de vue de la distribution statistique de l'exhalation radon - et donc au point de vue de la distribution du radium - comme un site unique.

Nous étudions ici une galerie de conformation simple s'il en est : la galerie dite de la « Montagne des Comtes de Salm » à Salmchateau. Elle ne comporte qu'une seule galerie horizontale et pratiquement rectiligne d'une centaine de mètres de long.

Il s'agit d'une ancienne galerie d'extraction du coticule ainsi qu'en témoignent les nombreux fragments dispersés parmi le schiste dans la halde voisine.

Elle s'ouvre, un peu en retrait du sentier qui prolonge la route d'accès au château des Comtes à Salmchâteau à quelques mètres de la fin du terril que le sentier cotoye, par un passage assez réduit du

fait des éboulis de terrain. La galerie est quant à elle en parfait état de conservation et parfaitement « sûre » du fait de la compétence de la roche.

22 échantillons, distants de 7 pas, ont été prélevés à partir du fond de la galerie.

Si la « loi » présentée est valide, la figure 8.6, où ont été classés tous les résultats de mesure, ne laisse planer aucun doute : une anomalie doit expliquer la non linéarité particulièrement manifeste dans ce cas. Or la cause est claire tant par l'observation du tableau des valeurs que par la considération du site. Les 6 premiers points, correspondant donc au fond de la galerie, révèlent une exhalation nettement supérieure à celle des autres échantillons, d'autre part, au niveau du huitième point de prélèvement, une faille importante est visible dans la galerie : elle a nécessité la construction d'un couloir voûté de protection car la voûte naturelle en cet endroit est très élevée et des éboulements étaient certainement à craindre lors des travaux.

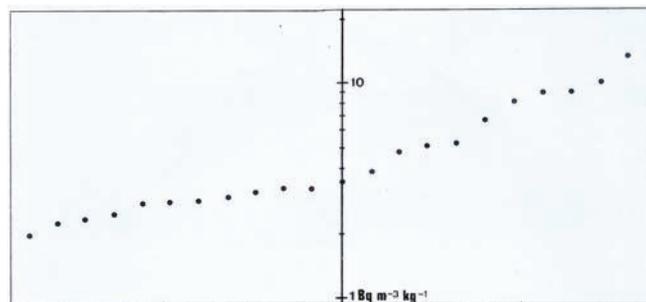


Figure 8.6. Galerie « des Comtes de Salm ». Diagramme unique préliminaire.

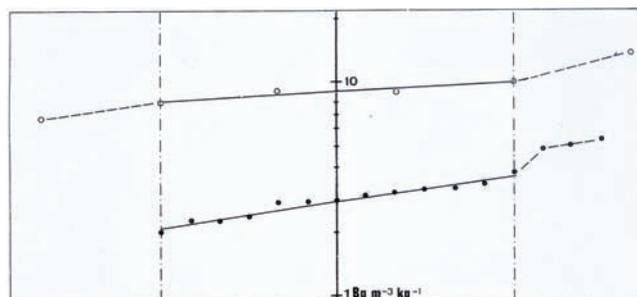


Figure 8.7. Galerie « des Comtes de Salm ». Traitée comme site double (○ fond de galerie; ● premier tronçon).

9.2. Schiste praguien (anciennement « siegenien ») de Houffalize

Un très bel affleurement de quelque 3km s'échelonne sur la route Liège-Bastogne (avec dérivation vers Tavigny) de part et d'autre (et dans la ville même) de Houffalize.

Nous avons procédé à la collecte de 25 échantillons de roche disséminés du N au S le long de cet affleurement aux endroits repérés à la figure 8.8.

Le graphe de la figure 8.9 qui traduit la distribution statistique (unique) des mesures en considérant le site comme « homogène » et le coefficient de corrélation correspondant (0,9667) pourraient être estimés comme vérifiant honorablement « notre loi ».

Toutefois l'observation directe du site laisse entrevoir une autre possibilité. En effet, au niveau de la Place Albert Ier (Panzer allemand et Square « Saint-Pair sur Mer » sic !) s'amorce la Rue de

Libramont enclavée entre 2 très beaux miroirs (de faille ?) sub-verticaux.

Il est donc fortement tentant, même si aucune faille n'est indiquée à cet endroit sur la dernière carte I.G.N. de Belgique (Atlas de Belgique, planche 8), de considérer séparément les 2 sous-ensembles situés de part et d'autre. C'est ainsi que sont établis les 2 graphes de la figure 8.10. Les 2 coefficients de corrélation sont supérieurs au précédent : 0,9709 et 0,9829.

A noter que dans la première version, on ne « perd » que 4 points (hors linéarité) tandis que dans la seconde version, on en exclut 5 et 1 respectivement.

On notera que si de plus, on ignore les 2 prélèvements effectués dans la ville même (numérotés 10 et 11, le premier des deux correspondant à un schiste particulièrement détritique et étant pris au pied du promontoire-belvédère), on améliore la corrélation de la droite correspondant à la partie nord de l'affleurement qui est ainsi limité à la rive droite de l'Ourthe.

Liste des résultats de mesures sur le schiste de Houffalize et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique)

« SITE UNIQUE »

R	A	n	A _{th}
7	16,1		
6	13,2		
13	11,4	21	11,78
15	10,8	20	11,38
22	10,6	19	10,99
1	10,1	18	10,61
12b	10,1	17	10,25
5	10,0	16	9,90

2	9,3	15	9,56
23	9,3	14	9,23
18	9,0	13	8,92
3'	8,9	12	8,61
11	8,7	11	8,32
10	8,5	10	8,04
21	8,5	9	7,76
9	8,4	8	7,50
24	8,2	7	7,24

16	7,4	6	6,99
3	6,6	5	6,75
19	6,1	4	6,52
14	6,0	3	6,30
4	5,9	2	6,08
17	5,5	1	5,88
12a	5,2	0	5,68
20	4,2		
8	3,5		

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)

A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]

n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1), ch. 6

A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,7540 + 0,0151.n$$

coefficient de corrélation : 0,9667

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,7540	1,0711	0,9126	5,6754	11,7788	8,1771

Caractérisation : $5,7 < A_{th} < 12$ ou $8,2 \times / 1,45$ [Bq/(m³.kg)]

**Liste des résultats de mesures sur schiste (moyennes de 3 enregistrements à 4 jours d'intervalles)
et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique)**

« SITE DOUBLE »

Partie nord

R	A	n	A _{th}
7	16,1		
6	13,2		
1	10,1	6	10,1
5	10,0	5	9,75
2	9,3	4	9,4
3'	8,9	3	9,1
11	8,7	2	8,8
10	8,5	1	8,5
9	8,4	0	8,2
3	6,6		
4	5,9		
8	3,5		

Partie sud

R	A	n	A _{th}
13	11,4	12	12,1
15	10,8	11	11,3
22	10,6	10	10,6
12b	10,1	9	9,9
23	9,3	8	9,2
18	9,0	7	8,6
21	8,5	6	8,0
24	8,2	5	7,5
16	7,4	4	7,0
19	6,1	3	6,6
14	6,0	2	6,1
17	5,5	1	5,7
12a	5,2	0	5,3
20	4,2		

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)

A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]

n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1), ch. 6

A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

Formule de régression et caractérisation du site

PARTIE NORD

$$\log A_{th} = 0,9154 + 0,0147.n$$

coefficient de corrélation : 0,9709

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,9154	1,0036	0,9696	8,2300	10,083	9,1099

Caractérisation : $8,2 < A_{th} < 10$ ou $9,1 \times / 1,1$ [Bq/(m³.kg)]

PARTIE SUD

$$\log A_{th} = 0,7279 + 0,0296.n$$

coefficient de corrélation : 0,9829

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,7279	1,0831	0,9055	5,3444	12,1088	8,0445

Caractérisation : $5,3 < A_{th} < 12$ ou $8 \times / 1,5$ [Bq/(m³.kg)]

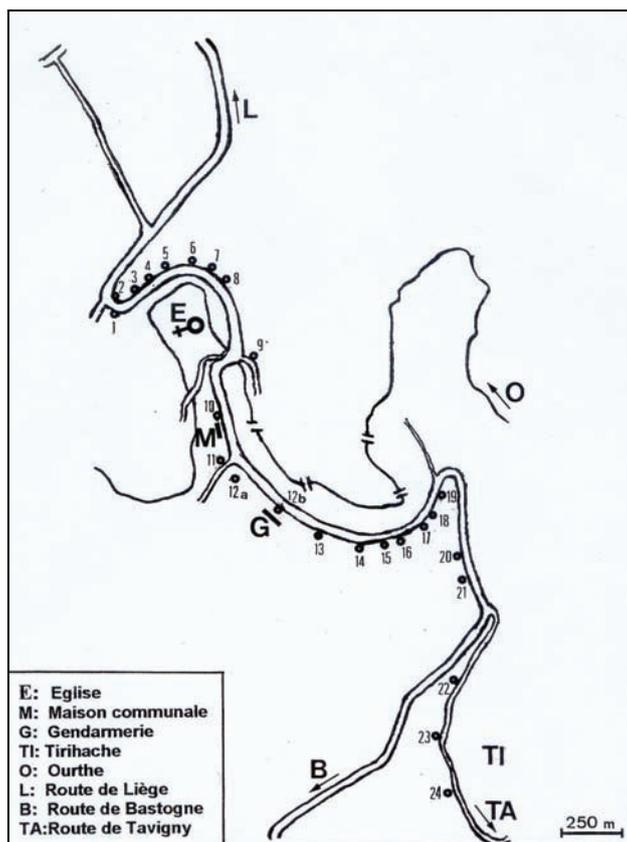


Figure 8.8. Houffalize, Route Liège-Bastogne. Localisation des prélèvements.

Niveau -25 m, «couloir» de droite (pupitres audio n° 3 et 4)

Prélèvements de 13 échantillons successifs dans la salle inaccessible au public (que nous appellerons salle du « front de taille » = grande paroi parallèle au couloir principal), à partir de l'extrémité avec panneaux de protection en plastique puis poursuite par petit couloir en face du pupitre n° 4). Poursuite de la collecte d'échantillons (n° 14A à 16A) dans le couloir (interdit au public) longeant la paroi limite perpendiculaire au « front de taille ». Fin de la collecte (n° 17A à 25A) dans le couloir accessible au public vers le lieu de débarquement - embarquement par funiculaire.

Tous les échantillons sont pris à environ 1 m du sol.

- 1A Fond du « petit couloir » parallèle à la paroi limite gauche de la salle
- 2A Milieu de ce même couloir
- 3A Coin de ce couloir et du « 2^{ème} petit couloir » parallèle au « front de taille »
- 4A, 5A Suite du « 2^{ème} petit couloir » parallèle au « front de taille »
- 6A à 9A « Front de taille » (9A = dernier échantillon accessible par cette partie de salle)
- 10A à 13A « Front de taille » accessible par couloir (interdit au public) face au pupitre n° 4. L'échantillon n° 13 A est pris dans le coin limite droit

14A à 16A Echantillons prélevés dans le dernier couloir (interdit au public) longeant la paroi limite perpendiculaire au « front de taille » et reliant la « salle » au couloir du public

17A à 25A Echantillons régulièrement espacés (environ 5m) dans couloir aux pupitres. L'échantillon n°25 A est pris à côté du pupitre n° 3

Niveau -45 m

Prélèvements de 24 échantillons successifs: 16 dans le couloir principal (à partir du fond), 2 dans « l'appendice » dans la direction perpendiculaire, le long de la rampe du funiculaire, 6 au-delà du funiculaire jusqu'au fond de la galerie prolongeant le couloir principal.

Les échantillons sont pris de 10 en 10 mètres.

Tous les échantillons sont pris à environ 1 m du sol.

- 1B à 4B Fond du couloir (sans éclairage)
- 5B A hauteur du 1^{er} appareil fluorescent
- 7B A hauteur du 2^{ème} appareil fluorescent
- 9B A hauteur du 4^{ème} appareil fluorescent
- 13B A hauteur du couloir perpendiculaire, équipé (éclairage)
- 17B, 18B Appendice parallèle à la rampe
- 19B à 24B Galerie dans le prolongement du « couloir »

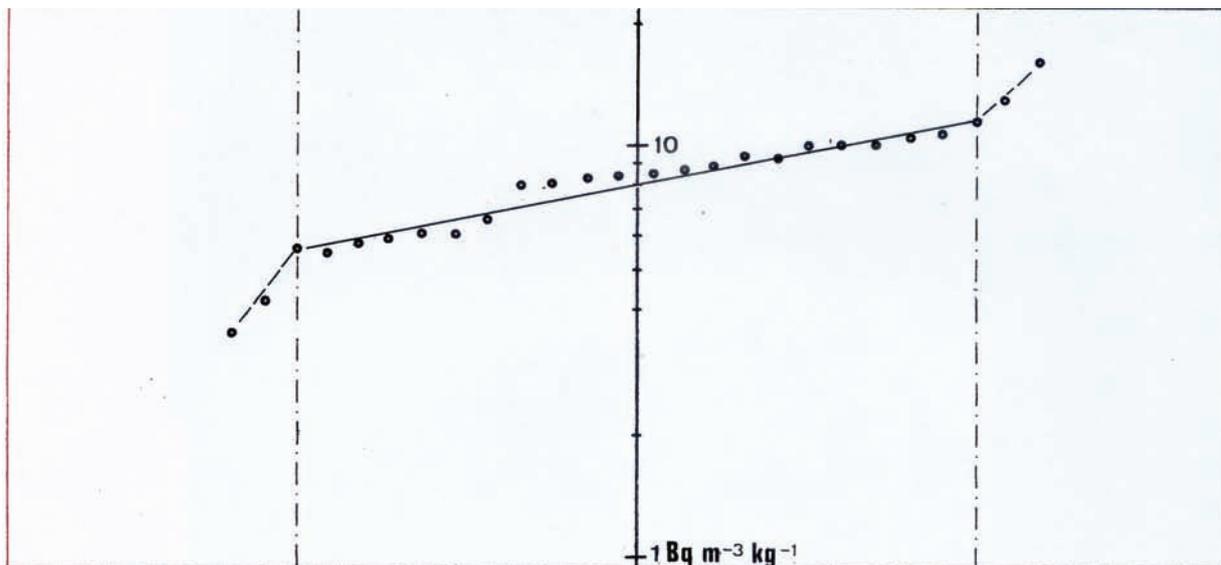


Figure 8.9. Houffalize (route Liège-Bastogne) Traité comme site unique.

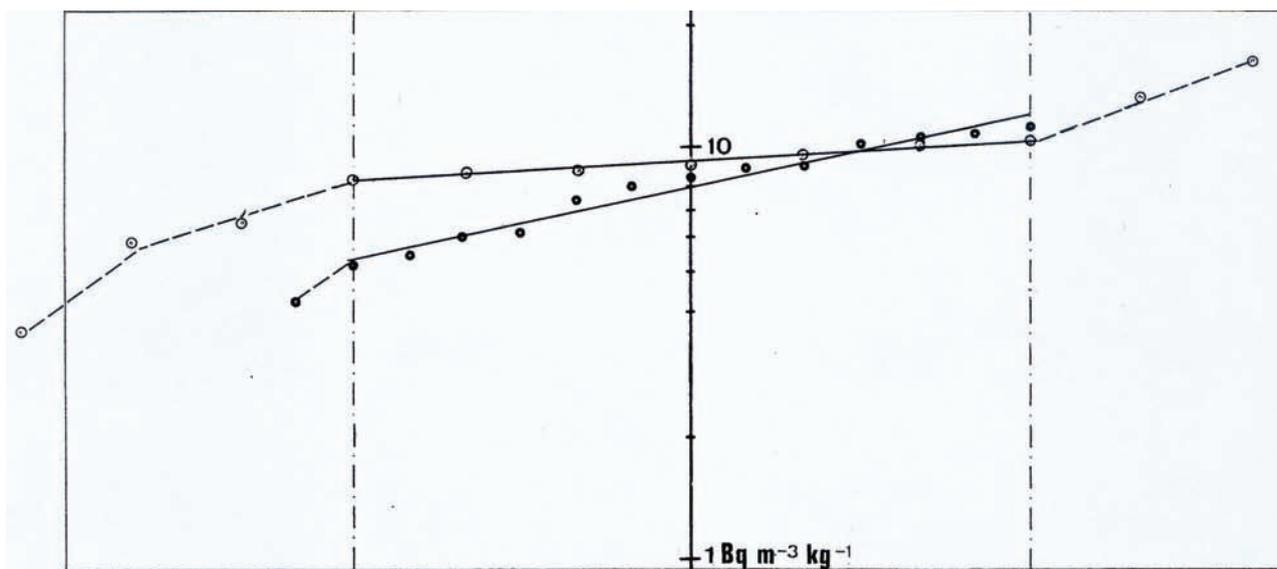


Figure 8.10. Houffalize (route Liège-Bastogne) Traitée comme site double (○ partie nord ; ● partie sud).

9. Le radon dans les dépôts ferrugineux. Protocole court

9.1. Généralités

L'eau de nombreuses sources, du plateau des Hautes-Fagnes notamment, véhicule des complexes contenant entre autres du fer, de l'uranium et du radium. En sous-sol fortement réducteur, le fer se trouve à l'état de valence 2 et le complexe est soluble de sorte que l'eau est parfaitement limpide lorsqu'elle sourd du sol. Au contact de l'air atmosphérique toutefois, le fer s'oxyde très rapidement et, passant à l'état de valence 3, il rend le complexe insoluble. Celui-ci flocule et commence à se déposer dès l'abord du point d'émergence (à quelques dm de ce point, l'eau commence à prendre la couleur rouge-orange à rouge-brun (« rouille ») caractéristique de l'hydroxyde ferreux.

Le Pouhon Pietkin, situé en bordure de la Roer, en Fagne Wallonne non loin de l'endroit dit « Camp des Russes », est certainement l'un des pouhons les plus typiques (Fig. 9.1).

Une petite construction en maçonnerie protège et enclose un puits affleurant de quelques dizaines de dm² de surface où l'eau est remarquablement limpide. Le trop plein de ce puits, s'écoule par un ru (d'une trentaine de cm de largeur et de quelque 10 m de longueur) contenant un dépôt de plusieurs cm d'épaisseur et d'une très belle coloration orange. Ce dépôt repose sur une sous-couche jaune à verdâtre – qui est donc de moins en moins oxydée – dont l'exhalation en radon est nettement inférieure [12 Bq/(m³.kg) contre 19]. La configuration du pouhon d'Arumont, qui s'est avéré un sujet d'étude remarquable, est très semblable à celle du pouhon Pietkin.

La figure 4.1 montrait une autre configuration typique. Au Pouhon de Bernister, à « L'eau rouge », l'eau sourdait au fond d'une grande mare entièrement colorée par le dépôt qui l'a envahie progressivement. Depuis cette photo, la source a été captée en raison des travaux de soutènement de l'autoroute et un tuyau déverse l'eau dans un ru qui déborde plus loin et redonne une mare de même aspect qu'anciennement.

La figure 9.2 enfin montre la configuration du pouhon valdotain de Citrin. La limpidité du filet d'eau émergent contraste ici encore avec la coloration rouge du voisinage immédiat du point de chute de l'eau. Un échantillon du dépôt, récolté

par notre collègue Fr. Dimanche (photo) s'est avéré de loin le plus « performant » de tous les prélèvements testés (cf liste des prélèvements de produits ferrifères ci-après) : 1300 Bq/(m³.kg) contre 840 pour notre « record belge » du pouhon d'Arumont.



Figure 9.1. Pouhon Pietkin en Fagne Wallonne.



Figure 9.2. Le Pouhon de Citrin (Val d'Aoste) (Photo Mme Dimanche, Revue Hautes Fagnes n°2, 2003, reproduite avec l'aimable autorisation des intéressés).

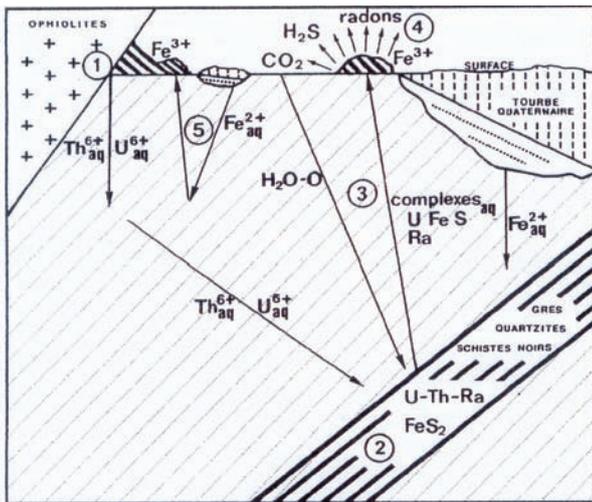


Figure 9.3. Schéma du cycle géochimique du fer et des métaux radioactifs (Fr. Dimanche, Hautes Fagnes n°2/2003, reproduction aimablement autorisée).

9.2. Cycle géochimique du fer et des métaux radioactifs

Dans 2 articles présentés en collaboration avec notre collègue Fr. Dimanche ([D.15] et [E.7]) se trouve évoqué un cycle géochimique proposé par ce dernier (Fig. 9.3) et conforté par des éléments trouvés dans une importante publication canadienne de W. Dyck [D.1'] traitant de la mobilité et de la concentration de l'uranium et de ses produits de filiation

Le soufre des schistes noirs profonds, souvent fortement pyritisés, jouerait un rôle essentiel dans la formation des complexes à partir du fer des roches locales solubilisé par les eaux d'infiltration et de percolation au travers d'un sous-sol réducteur (cas des Fagnes tout particulièrement) et de l'uranium solubilisé par ces mêmes eaux léchant des concrétions uranifères ou se mêlant à d'autres eaux venant d'ailleurs et contenant de l'uranium en solution.

A ces complexes ramenés en surface par les eaux de sources pourrait s'ajouter en diverses proportions du fer dissous non encore complexé et rencontré par ces eaux ascensionnelles. Les proportions variables en fonction des points d'émergence de ces 2 composés ferriques pourraient expliquer les variations de compositions et donc d'activités (ainsi que de teintes : d'orange à rouge-brun).

Remarque. La source « record » (pour l'exhalation de son produit ferrifère) de Citrin (Fig. 9.2) sourd elle aussi dans une région de tourbière à sphaignes, linaigrettes et narthécies qui occupe la pente au-dessus de 2300 mètres dans le Val d'Aoste.

9.3. Caractéristiques physicochimiques du dépôt ferrugineux du pouhon d'Arumont

9.3.1. Observation microscopique (MEB)

Quelques observations très aimablement réalisées par notre collègue R. Cloots au microscope électronique à balayage (Fig. 9.4) révèlent des caractéristiques dont certaines sont signalées dans la littérature scientifique concernant les composés ferrifères en général (par exemple : sphérolites et cube d'uraninite, cf ci-après).

Le cliché 1 montre la diversité des agrégats constituant le dépôt sec. On notera que ces agrégats sont discernables au microscope optique et des cristaux colorés, difficilement identifiables toutefois, sont visibles en dispersion dans l'ensemble.

Les clichés 2 et 3 montrent des plaquettes, de nature non identifiée, couvertes de sphérolites micrométriques que révèle beaucoup mieux le cliché 4. Ces sphérolites pourraient au moins en partie être de l'oxyde d'uranium non cristallisé (pechblende, de constitution chimique UO_2 à UO_3) car on sait que cet état d'agrégation est fréquent lorsque la cristallisation (cubique) n'a pas le temps de se réaliser [D.1].

Le cliché 5 montre un cube qui pourrait être de l'uraninite (UO_2) ou de la limonite (?).

Le cliché 6 montre des microtubules, probablement d'origine végétale, recouvertes de sphérolites. Ces microtubules sont probablement d'origine végétale car le dépôt est évidemment prélevé dans son environnement naturel donc parmi une végétation semi-aquatique (en partie vivante en partie constituée de débris de plantes et herbes avoisinantes).

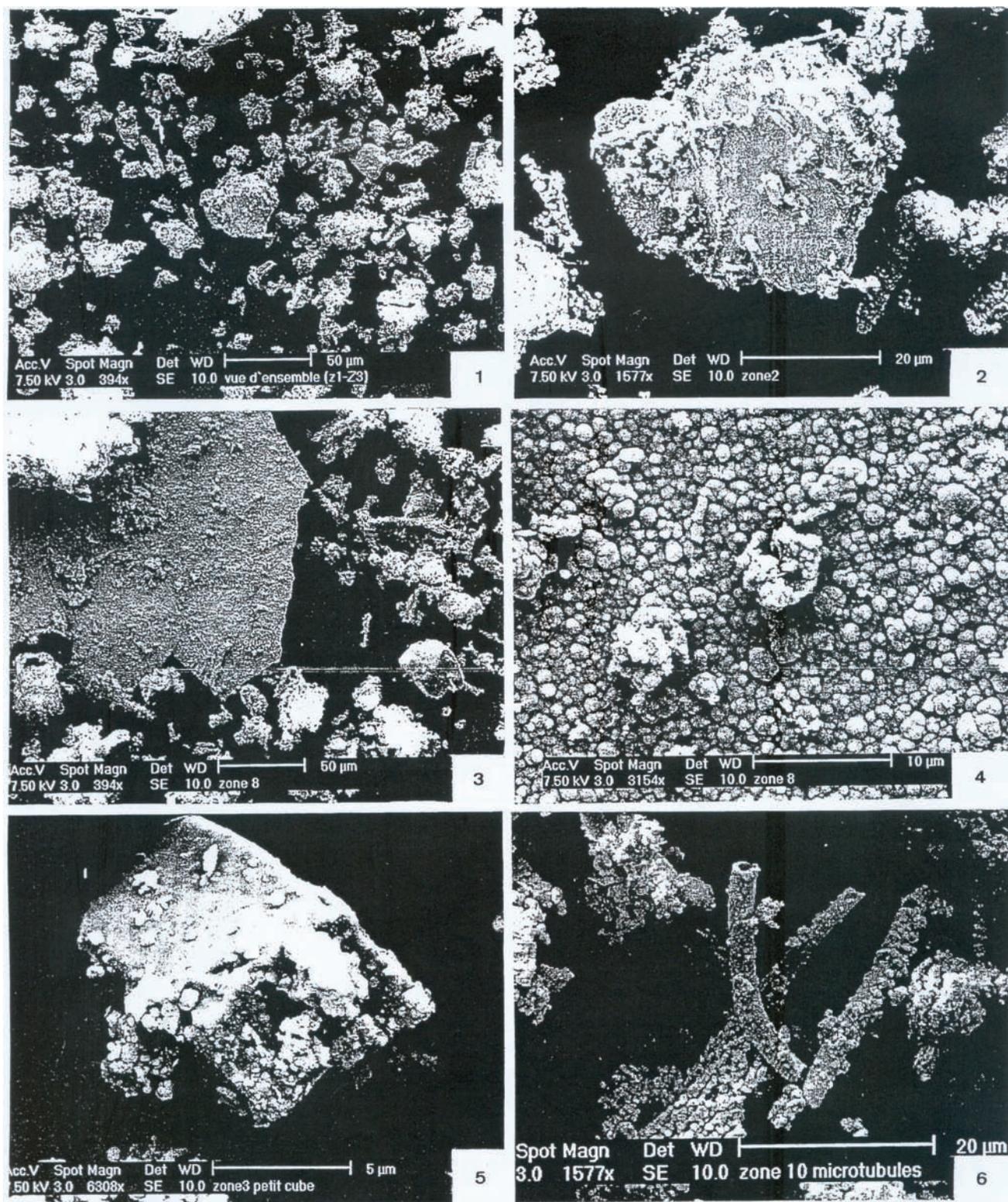


Figure 9.4. Le dépôt ferrugineux du Pouhon d'Arimont (Malmédy) Microscopie électronique à balayage (Observation personnellement effectuée par notre Collègue R. Cloots, Chimie Inorganique et Structurale)

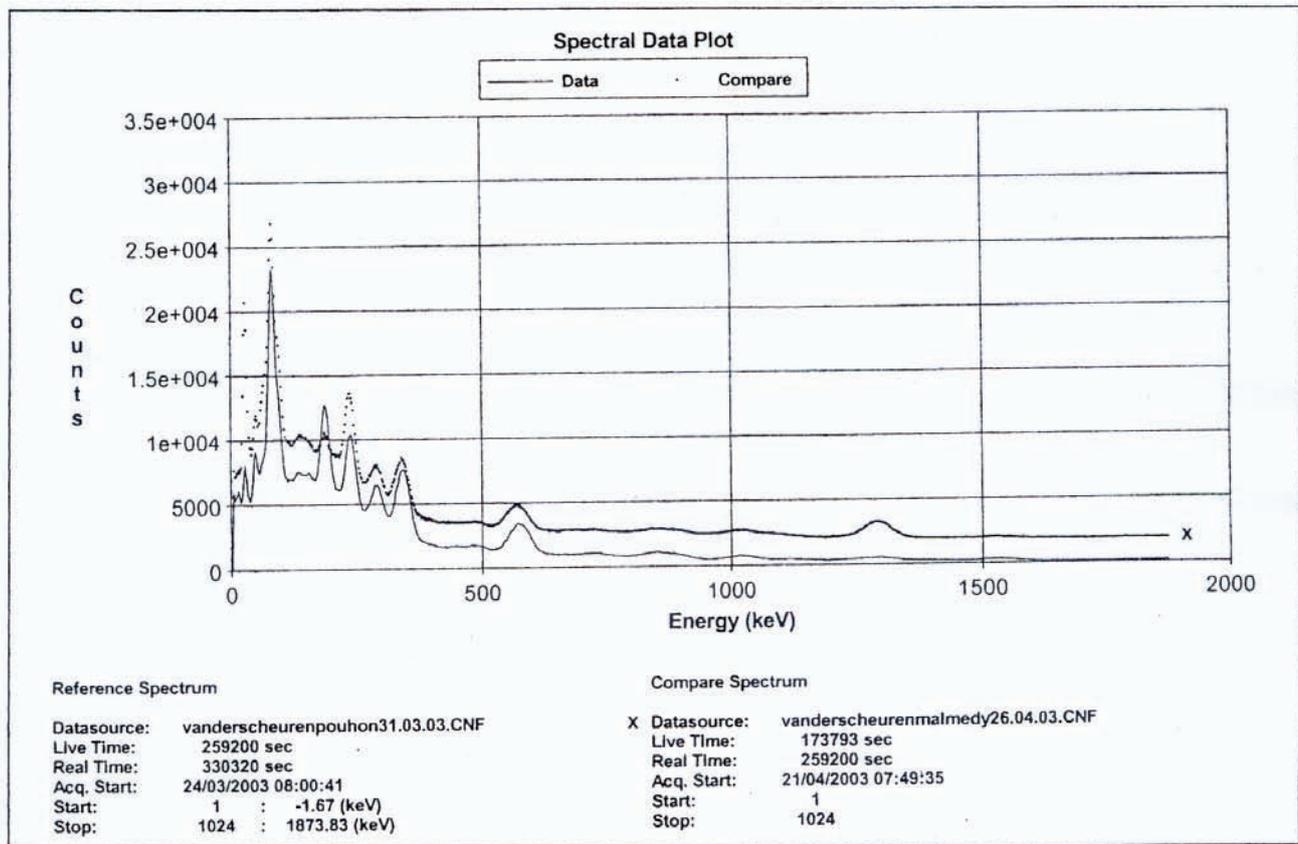


Figure 9.5. Comparaison des spectres gamma du dépôt ferrifère du pouhon d'Arimont et d'un schiste noir pyriteux de Malmédy (passage à niveau, route de Waimes).

9.3.2. Spectrométrie gamma

A la fois pour caractériser le matériau en question et pour conforter l'explication avancée pour la formation des complexes (Fe, U, S), des spectres gamma ont été réalisés au Cyclotron de l'ULg grâce à l'aide de M. Et. Lohay du Service de Contrôle Physique des Radiations que nous remercions vivement.

La figure 9.5 compare les spectres du produit rouge du pouhon d'Arimont et d'un schiste noir pyriteux du voisinage (falaise du passage-à-niveau à la sortie de Malmédy sur la route de Waimes). On constate immédiatement la similitude des spectres et surtout l'enrichissement concomitant en radium au détriment de l'uranium.

9.4. Résultats des mesures d'exhalation par les dépôts ferrifères

9.4.1. Ensemble des résultats de mesures « internationales »

Nous avons effectué des mesures sur divers échantillons de dépôts d'origine diverse. Tant en Wallonie qu'à l'étranger. Les résultats en sont présentés ci-dessous, classés par ordre d'activité décroissante sur chaque site particularisé. On peut y voir immédiatement la très large dispersion de valeurs, depuis le « record » de Citrin (Val d'Aoste) jusqu'à des valeurs presque nulles.

Dépôts ferrugineux de sources belges

a. Massif cambrien de Stavelot

1. Arimont (Géromont)-Malmédy 840 Bq/(m³.kg)
2. Coö (galerie intérieure Centrale hydroélectrique) 140
3. Plateau du Brackkopf 135
4. Pont de Porfays (Soor) 100
5. Coö (même galerie, deuxième émergence) 95
6. Blanchimont (Francorchamps) bas (pont) 68

7. Regné (captage du Wez-des-Pourceaux)	52
8. Bernister	42
9. Hogne (Sart)	30
10. Préaix (bas-côté opposé au puits)	25
11. Pouhon Pietkin - Sourbrodt (couche superfic. du ru, orange)	19
12. Ruisseau des Tailles (G'haster)	19
13. Bosfagne	16
14. Pouhon Pietkin – Sourbrodt (sous-couche, jaune-vert)	12
15. Gué du Trô Marets (Malmédy)	11
16. Habiomont :	10
17. Préaix (dans ru, bas-côté du puits)	7
18. Bayehon (passerelle bois près du pont du Moulin)	7
19. Blanchimont (Francorchamps) haut	6
20. Trô Maret (Pouhon des Cuves)	2
21. Spoorbach (N de Herzogenhügel)	1

b. Région liégeoise

22. Source de Vaux (Wérister)	60
23. Source de Boncelles (Famelette)	24

Dépôts ferrugineux de sources étrangères

a. Val d'Aoste (Italie-France)

24. Source de Citrin – St-Rhémy-en-Bosses	1300
25. Val d' Ayas	725

26. Grand Chamen – Valpelline	62
27. Archébois – col du Mont – Valgrisanche – Tarentaise (F)	20

b. Haute-Corse (région schisteuse Est)

28. Fontaine d'Orezza (Rapaggio, captage et embouteillage)	275
29. Caldane (Fontaine de la Vierge, Fium' Alto)	170

9.4.2. Distribution statistique des dépôts ferrifères sur le Massif de Stavelot

Le Massif de Stavelot, particulièrement riche en pouhons et schistes noirs était évidemment un site de prédilection permettant une approche statistique. L'existence de notre Station Scientifique des Hautes Fagnes (Mont Rigi) était pour nous un atout majeur tant par les possibilités de séjour prolongé que par l'accueil chaleureux (voire enthousiaste) réservé par le Directeur Louis Leclerc et les membres du personnel en ce compris les collaborateurs scientifiques bénévoles « effectifs » (nous pensons avant tout à M. D. Théatre spécialiste des pouhons des Fagnes) ou « assimilés » (nous pensons entre autres à notre collègue retraité M. Streel).

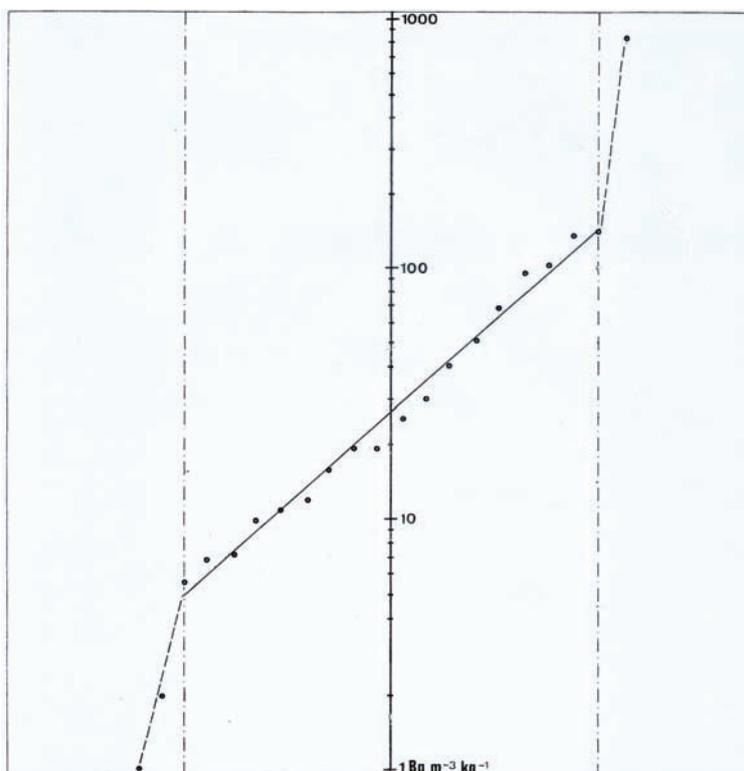


Figure 9.6. Répartition des résultats de mesure d'activité volumique unitaire sur les échantillons de produits ferrifères du Massif de Stavelot.

10. Liste des résultats de mesures (moyennes de 3 enregistrements à 4 jours d'intervalle) et valeurs correspondantes de la régression linéaire (logarithmique)

R	A	n	A _{th}
1	840		
2	140	17	141
3	135	16	116
4	100	15	95,3
5	95	14	78,3
6	68	13	64,4
7	52	12	52,9

8	42	11	43,5
9	30	10	35,7
10	25	9	29,3
11	19	8	24,1
12	19	7	19,8
13	16	6	16,3
14	12	5	13,4
15	11	4	11,0

16	10	3	9,0
17	7	2	7,4
18	7	1	6,1
19	6	0	5,0
20	2		
21	1		

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)

A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]

n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule (1)

A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

Formule de régression et caractérisation du site

$$\log A_{th} = 0,6997 + 0,0853.n$$

coefficient de corrélation : 0,9932

log A _{th} min.	log A _{th} max.	Moy. arithm.	A _{th} min.	A _{th} max.	Moy. géom.
0,6997	2,1498	1,4248	5,0084	141,1887	26,5919

Caractérisation : $5 < A_{th} < 140$ ou $26,5 \times / 5,3$ [Bq/(m³.kg)]

ANNEXE A. Unités de mesure et valeurs de référence caractérisant la radioactivité et ses effets*A.1. Radioactivité***Unité fondamentale (définition syst. MKS)**

	Le becquerel:	1 Bq = 1 désintégration/seconde
Ancienne :	Le curie:	
	1ère définition	1 Ci = nombre de dés./seconde de 1gr. de ²²⁶ Ra (dépend de la qualité de la référence $\cong 36,2.10^9$)
	Déf. convent.(1950)	1 Ci = 37.10^9 dés./seconde
Correspondance:		1 Ci = 37.10⁹ Bq (1 pCi = 37 mBq)

Activité d'une source

Globale:		Bq	
Spécifique:	Solide	Bq/kg	(ex.: ²²⁶ Ra $\rightarrow 36,2.10^{12}$ Bq/kg)
	Liquide	Bq/l	(ex.: eau «suspecte» $\rightarrow 100$ Bq/l)

Activité ambiante (volumique et dans l'air ; sans référence à la source)

		Bq/m ³	(ex.: local «suspect» $\rightarrow 400$ Bq/m ³)
Ancienne :		pCi /l	
Correspondance :		1 pCi/l = 37 Bq/m³	

Caractérisation d'un échantillon solide

En tant que source:	Bq/kg
Par activ. amb. produite:	Bq/(m ³ .kg) ou (Bq/m ³)/kg

*A.2. Effets des rayonnements ionisants***Dose absorbée (énergétique ou « physique ») D**

D correspond à l'énergie totale transférée à l'unité de masse de matière par la totalité des rayonnements qui la pénètrent (perte de leur énergie par échauffement, action physique, chimique ou biologique).

	Le gray :	1 Gy = 1 J/kg
Ancienne :	Le rad:	1 rad = 1 erg/gr
Correspondance :		1 rad = 10⁻² Gy

Equivalent de dose (efficace) E.D. ou « Effectance » (biologique)

E.D. correspond à la somme des énergies transférées à l'unité de masse de matière (de tissus humains) par la totalité des rayonnements qui la pénètrent mais pondérées par des coefficients « d'efficacité biologique » ou « facteurs de qualité », propres aux rayonnements et tissus concernés (ces coefficients résultant d'un consensus expérimental).

L' équivalent de dose est considéré comme additif.

	Le sievert :	1 Sv = 1 J/kg (efficace)
Ancienne :	Le rem (Röntgen equivalent for man)	
Correspondance :		1 rem = 10⁻² Sv

Exemple : Un séjour d'une journée (pendant 19h = référence conventionnelle = occupation à 80%) dans un local où règne une activité de 400 Bq/m³ (local « suspect ») équivaut à un E.D. de 2 \square Sv.
Un triple séjour identique dans ce même local équivaut à un E.D. de 6 \square Sv.

ANNEXE B. Nos résultats au crible de la « Loi de (Newcomb-) Benford »

Cum grano salis !

B.1. Présentation “tendancieuse” (habituelle) de la loi

Il est courant de rappeler “la loi de Benford” (en omettant sous ce vocable le nom du premier découvreur!) sous la forme – volontairement ou plus probablement involontairement – “tendancieuse” comme les 2 précurseurs eux-mêmes l’ont “ressentie”. Elle est d’ailleurs baptisée d’*étonnante* [L.3] et Benford lui-même citait les *anomalous numbers* [L.2].

L’origine réelle de la loi remonte, rappelons-le, à la fin du 19^{ème} siècle. L’astronome américain Newcomb, qui s’était étonné du fait que les premières pages de ses tables de logarithmes paraissaient (on en reparlera) plus abîmées que les dernières, s’était penché sur la fréquence de l’emploi des premiers chiffres dans les séries de nombres usuels. Il en avait élaboré la loi de probabilité dont question (nous l’explicitons ci-dessous) et disant en substance que le chiffre 1 se rencontre plus fréquemment que le 2, le 2 plus fréquemment que le 3... et ainsi de suite selon une distribution logarithmique [L.1].

Apparemment indépendamment, cette loi, dont la publication (trop synthétique ?) n’avait pas trouvé d’écho, a été “redécouverte” par le physicien américain Benford. Il a analysé longuement le fait et a présenté une publication bien étoffée [L.2] qui, elle, a retenu l’attention et intéressé des chercheurs d’horizons divers (et des plus grands ! tel le mathématicien Cesaro¹² par exemple).

Une très attractive approche, bien documentée a été récemment publiée en [L.3] et si la lecture de celle-ci mérite d’être recommandée, il est curieux de constater combien elle est teintée de la “manie”, d’ailleurs très ludique, des logiciens qui aiment présenter des problèmes (ou “énigmes”) sous une forme désarçonnante (cf une proposition telle que “la fille aînée est blonde” dans un problème de simple logique mathématique parlant d’âges et de numéros!) et qui se différencie tellement du même genre d’énigmes présentées

par des physiciens. La loi, « typiquement pour physiciens et ingénieurs » serait-on tenté de dire, n’est énigmatique que pour qui se laisse piéger par une approche trop superficielle - ou “grand public” - ou pour qui, manquant quelque peu de sens critique, fait automatiquement confiance aux assertions du « présentateur », qui fait parfois figure de “prestidigitateur”.

B.2. Présentation “naturelle” (physique) de la loi

Le trouble de l’approche précédente provient du fait que l’on y confond mode de **représentation** et **valeur** représentée.

En effet lorsque l’on s’intéresse à un ensemble de nombres que l’on peut trouver dans un texte quelconque (donc *pas à vocation purement mathématique*), il est évident qu’il s’agit le plus souvent de nombres traduisant des **valeurs de caractéristiques physiques** : consommations électriques des citadins de telle ville, longueurs des rivières de tel pays (un des exemples de Benford), âges géologiques d’un ensemble varié de roches, diamètres des corps célestes d’une galaxie, ... Remarquons d’emblée qu’il en résulte que l’expression, ou représentation, de ces **valeurs** dépend de **l’unité de mesure** choisie pour les chiffrer. Ceci s’avérera un intéressant critère de « vérification » comme on le verra.

Il est évident a priori que si l’ensemble est « grand » (au sens statistique habituel), s’il n’est contraint en aucune manière et si l’on exclut les valeurs a priori proches des limites acceptables (donc *certainement rares*¹³), en d’autres termes si l’on peut dire que: « *on ne voit pas de raison a priori pour qu’un sous-ensemble de cet ensemble soit privilégié* », alors la probabilité pour trouver une valeur dans un même intervalle **relatif** $[v, v(1 + a)]$ doit être indépendante de v quel que soit l’accroissement **relatif** « a » envisagé (par exemple [10 , 11] ou [20 , 22] ou encore [90 , 99]).

Explicitons le cas flagrant qui est à l’origine de « *l’étonnant étonnement* » de Newcomb d’abord puis de Benford après lui.

Newcomb , soit dit en passant, utilisait une table (pour calculs astronomiques) autrement plus volumineuse que la célèbre table scolaire qu’ont connue tous les élèves et étudiants « *d’avant l’avènement des calculettes* » et à laquelle nous

¹² Professeur de mathématique à Palerme et Rome et qui séjourna à l’ULg où son frère aîné enseignait la minéralogie.

¹³ 10 cm ne serait pas raisonnable en tant que longueur de rivière non plus que 10.000 km.

allons nous référer ici très exactement¹⁴. Mais le problème ne change pas. Il suffit d'imaginer que lorsque nous évoquerons des nombres de *pages* ou *lignes* ci-dessous, il faudra entendre respectivement *dizaines de pages* et *pages* pour approcher le « cas Newcomb ».

Newcomb donc s'étonnait de constater que les pages de ses tables concernant les logarithmes des nombres commençant par 1 étaient plus « manipulées » (donc plus ternies et écornées) que les pages traitant des nombres commençant par 9 (à l'extrême).

Or comment sont conçues de telles tables ? Pour des raisons de commodités, sinon de logique scientifique, les nombres dont on donne la mantisse du logarithme se succèdent « régulièrement » selon une suite arithmétique (d'unité en unité) ce qui conduit évidemment à utiliser un même nombre de lignes (donc de pages) pour imprimer tous les nombres compris entre 1000 et 1999 (série I) d'une part, entre 9000 et 9999 (série IX) d'autre part (soit 2 pages et 100 lignes¹⁵ dans la table scolaire). Il s'ensuit que lorsque l'on passe d'une ligne à la suivante, l'accroissement de la **valeur** traduite par les nombres correspondants n'est pas le même dans les 2 cas :

1 ‰ entre 1000 et 1001, **seulement** 0,111 ‰ entre 9000 et 9001.

Il résulte notamment de ce qui précède :

- Vu sous l'angle métrologique : les nombres à interpoler entre les 2 premiers de la série I, le seront avec une **incertitude** 9 fois plus grande qu'entre leurs homologues de la série IX,
- Vu sous l'angle informatif : la série I apparaît **comprimée** (9 fois pour l'intervalle entre les 2 premiers de la série I par rapport à celui de leurs homologues de la série IX),
- Vu sous l'angle statistique : la **probabilité** de trouver un nombre intercalé entre les 2 premiers de la série I, est 9 fois plus grande que celle d'en trouver un entre leurs homologues de la série IX.

Conclusion : Il est a priori évident que les pages de tout « tableau » - et non seulement les tables de logarithmes - mais les tableaux de toutes **valeurs** équiréparties - « souffrent » du même mal. Pour

qu'il n'en fût pas ainsi, il eût évidemment fallu que les tables en question fussent **décomprimées** (les nombres de référence écartés) de plus en plus au fur et à mesure qu'on se rapproche du début (à supposer que tous les nombres de référence soient exprimés avec la même quantité de chiffres évidemment) à la manière des diagrammes semi-log.

B.3. Expression de la loi

1. Approche de solution du cas Newcomb

On déduit, avec évidence, qu'on a la même probabilité p d'utiliser les nombres compris dans

[9000 ; 9999 (= 1111 ‰)], [8888 ; 8000],
[7777 ; 7000]...,
et donc en bout de course – pour les 2 dernières décades – dans :
[2000 ; 2222], [2223 ; 2469], [2470 ; 2744],
[2745 ; 3048]
[1000 ; 1111], [1112 ; 1235], [1236 ; 1373],
[1374 ; 1526]; [1527 ; 1696]; [1697 ; 1886];
[1887 ; 2096]

On trouve donc respectivement pour chaque décade (de 9 à 1 respectivement) :

$$p, \dots, 4p, 7p \quad (1)$$

Ce qui veut dire que Newcomb (et ses prédécesseurs éventuels !) avait eu, lorsqu'il s'étonna, sensiblement 7 fois plus de chance d'utiliser les pages consacrées aux nombres commençant par 1 que celles dévolues aux nombres commençant par 9. Rien de réellement *étonnant* en définitive dans la différence d'état de fraîcheur des pages en cause!

2. Expression exacte

Ce qui par contre est un peu plus étonnant est que, à partir de considérations peu convaincantes, Newcomb aussi bien que Benford, aît « proposé » la loi de probabilité correcte:

$$p([d ; d+1]) = \log \{(d+1)/d\} \quad (2)$$

avec d = un quelconque des chiffres décimaux 1 à 9.

¹⁴ Notamment parce que tout un chacun peut se la procurer aisément dans (les archives au moins de) toutes les bibliothèques publiques.

¹⁵ Et non 1000 (!) car la table a une présentation matricielle pour raison évidente de gain de place.

soit pour les chiffres 9 à 1 les probabilités successives:

0,0458 ; 0,0512 ; 0,0580 ; 0,0669 ; 0,0792 ;
0,0969 ; 0,1249 ; 0,1761 ; 0,3010

Répartition conforme à celle des valeurs approximatives données en (1).

3. Expression généralisée

L'expression générale, pour tout intervalle de valeur $[v_1 ; v_2]$ est donnée par :

$$p([v_1 ; v_2]) = \log(v_2/v_1) \quad (3)$$

ou, si l'intervalle est défini par l'accroissement relatif a , pour toute valeur v et tout accroissement relatif a , par :

$$p([v ; v(1+a)]) = \log(1+a) \quad (4)$$

4. Exploitation pratique

En pratique, cette loi statistique « naturelle » de distribution des valeurs **décimales** aléatoires a été assez souvent utilisées à des fins de contrôle « anti-fraude » notamment dans le domaine financier en se fondant sur la « conjecture » : *si l'ensemble (grand) des nombres intervenant dans un bilan ne respecte pas la loi de Newcomb-Benford, il y a suspicion de fraude.*

B.4. Application aux données du présent mémoire : vérification de l'adéquation de la loi

Nous nous sommes livré à ce jeu de contrôle de « notre propre probité » (intellectuelle) à partir de 592 **valeurs** d'exhalation de radon par les solides (bilan arrêté à la date du 20 décembre 2007). Il s'agit bien d'un « grand » ensemble et il n'est pas

contraint car les **valeurs** en question couvrent plus de 3 ordres de grandeurs.

Remarque. Pour la commodité des traitements ci-après (classements) de ces données, nous les avons toutes présentées sous forme de mantisse (au sens du traitement en virgule flottante: 1 seul chiffre avant la virgule).

1^{er} test d'adéquation : répartition des données directes

Sur la figure B.1, nous avons porté en colonnes les mantisses en question, chaque colonne étant attribuée à un même premier chiffre. L'ensemble résultant se présente donc comme un diagramme en bâtonnets de la répartition pratique.

On y a superposé à la même échelle le graphe de la fonction de répartition théorique (2).

On peut constater que l'adéquation est plus que satisfaisante.

2^{ème} test d'adéquation : résistance aux changements d'échelle

Comme on l'a fait remarquer, la loi étant sensée s'appliquer à des nombres traduisant des **valeurs physiques**, elle doit résister à tout changement d'échelle évidemment.

Il en est bien évidemment ainsi en ce qui concerne la loi de répartition théorique (logarithme d'un rapport).

Mais qu'en est-il des valeurs pratiques elles-mêmes ?

Pour ce contrôle, nous avons multiplié systématiquement les **mantisses** des 592 valeurs de départ (Fig. B.1) puis nous avons ramené les résultats obtenus à leurs mantisse respectives et reporté l'ensemble en tableau (Fig. B.2) et en diagrammes superposés sur la figure B.3.

On peut constater sur cette dernière figure que le test est suffisamment convaincant.

Interprétation: Au vu des figures B.1 et B.3, on peut conclure que l'ensemble des résultats apparaît comme « probablement honnête ».

	Premier chiffre des valeurs numériques								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X 1	165	117	74	54	48	46	32	26	30
X 2	182	86	79	65	52	34	40	33	21
X 3	179	103	68	55	42	39	47	31	28
X 4	180	118	64	50	36	46	33	29	36
X 5	191	102	78	56	40	36	27	35	27
X 6	187	100	79	53	50	38	29	19	37
X 7	192	101	73	67	39	39	35	21	25
X 8	180	108	72	63	55	28	36	30	20
X 9	162	119	77	53	49	46	24	33	29
Théor.	178	104	74	57	47	40	34	30	27

a

	Premier chiffre des valeurs numériques								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X 1	27,9%	19,8%	12,5%	9,1%	8,1%	7,8%	5,4%	4,4%	5,1%
X 2	30,7%	14,5%	13,3%	11,0%	8,8%	5,7%	6,8%	5,6%	3,6%
X 3	30,2%	17,4%	11,5%	9,3%	7,1%	6,6%	7,9%	5,2%	4,7%
X 4	30,4%	19,9%	10,8%	8,5%	6,1%	7,8%	5,6%	4,9%	6,1%
X 5	32,3%	17,2%	13,2%	9,5%	6,8%	6,1%	4,6%	5,9%	4,6%
X 6	31,6%	16,9%	13,3%	9,0%	8,5%	6,4%	4,9%	3,2%	6,3%
X 7	32,4%	17,1%	12,3%	11,3%	6,6%	6,6%	5,9%	3,6%	4,2%
X 8	30,4%	18,1%	12,1%	10,6%	9,3%	4,7%	6,1%	5,1%	3,4%
X 9	27,4%	20,1%	13,0%	9,0%	8,3%	7,8%	4,1%	5,6%	4,9%
Théor.	30,1%	17,6%	12,5%	9,7%	7,9%	6,7%	5,8%	5,1%	4,6%

b

Figure B.2. Tableaux donnant les nombres de valeurs numériques (donc de leurs mantisses : Fig. B.1) en a, et leurs proportions (n. total = 592) en b - en fonction du premier chiffre de la valeur numérique, tels que mesurés (1^{ère} ligne, x1) et respectivement multipliés par un facteur entier : de 2 à 9 .

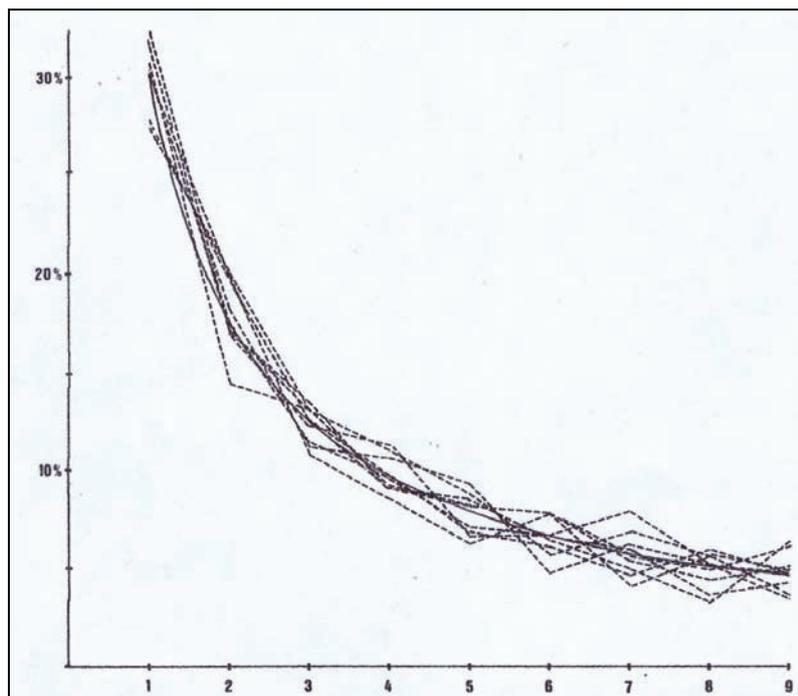


Figure B.3. Graphes traduisant les valeurs de la figure B.2.b. Traits pleins: courbe théorique.

ANNEXE C. Compléments statistiques sur la radioactivité

C.1. Statistique de l'activité volumique sur longue durée

Sur la figure C.1 nous avons reporté un ensemble de quelque 300 résultats de mesure de l'activité volumique développée par une source de radium dans une cellule fermée de "grand" volume.

Cet essai, remontant à l'année 1998, a été réalisé à l'aide d'un appareil du type "Radim". La cellule de mesure est un réservoir en polyéthylène épais de 550 litres, la source est constituée d'un dépôt solide de chlorure de radium sur coupelle d'acier réalisée par notre collègue P. Mignonsin du "Service" (à l'époque) de Radiochimie que nous remercions ici pour sa collaboration fructueuse et cordiale.

La figure reprend les mesures horaires de l'activité volumique prises après un séjour de 40 jours de la source dans la cellule, ceci afin que l'équilibre séculaire puisse être raisonnablement postulé, notamment eu égard à la durée relativement courte de la mesure totale. La demi-vie du radium étant de 1600 ans, il va de soi que la source est stable à l'échelle de temps de la mesure.

La dispersion naturelle des résultats est telle que l'on peut pratiquement ignorer, en première approximation au moins, les effets des imperfections de l'appareil de mesure et des grandeurs d'influence.

La figure reproduit (en b) l'allure d'un histogramme de ces valeurs ainsi que la meilleure courbe de Gauss traduisant une distribution normale centrée sur la valeur moyenne calculée soit ici $m = 1710 \text{ Bq/m}^3$. On se convainc facilement de l'adéquation du modèle gaussien [B.20].

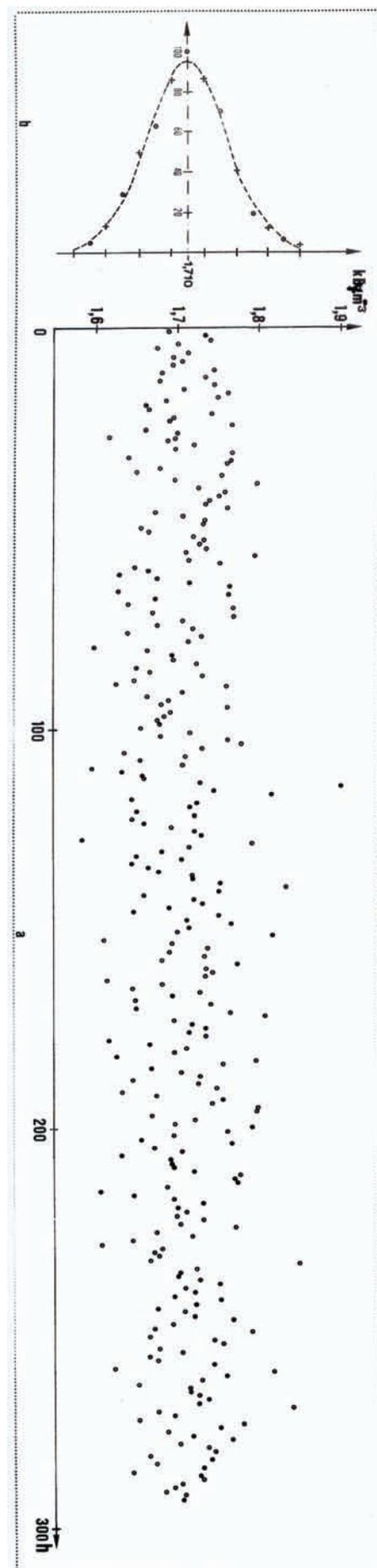


Figure C.1. Comportement statistique sur longue durée de l'activité volumique (source solide de chlorure de radium)

C.2. *Distribution statistique des écarts entre mesures et "meilleure droite" ("loi de répartition")*

Le nombre appréciable de mesures effectuées sur les échantillons de granite de Calvi (Revellata) et retenues pour la définition de la meilleure droite correspondante, soit 41 mesures, permet de tracer valablement la courbe de *distribution statistique* – F(x) – au sens classique de la théorie des probabilités et d'en déduire la *loi de densité de probabilité* correspondante f(x).

Si la loi postulée est "plausible" et si les écarts résultent d'un "grand nombre d'incertitudes de mesures et de traitement des résultats indépendantes", on doit s'attendre, comme l'enseigne la théorie, à obtenir la *loi de densité de probabilité normale* ou *loi de Gauss*:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

Les résultats de mesures résultent ici avec évidence de l'intervention de plusieurs causes indépendantes: incertitude instrumentale des mesures directes, incertitude instrumentale du traitement de signal (sélection des pics par le D.S.P...), dispersion "vraie" sur le terrain (inhomogénéité des roches, équidistance "approximative" des prélèvements,...), différences de granulométrie des échantillons, influence des conditions d'ambiance lors des mesures (température, pression, humidité relative, "compaction" des échantillons,...), bruit de fond,...

La figure C.2 montre la "courbe" cumulée des écarts relatifs entre valeurs logarithmiques de l'activité ("courbe incrémentale" en marches d'escalier) dont l'allure sigmoïdale "rassure" de visu quant à la validité du comportement gaussien de la loi de probabilité des écarts et aussi, par la même occasion évidemment, quant à la plausibilité de la loi postulée pour la répartition sitologique du radium.

La courbe 1 superposée à la courbe expérimentale est la distribution statistique normale (ou gaussienne) F(x):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$$

calculée à partir des valeurs expérimentales (*espérance mathématique et variance*):

$$m = 2.10^{-4} \text{ et } \sigma = 84,20.10^{-4}$$

On constate que la concordance est particulièrement bonne sur la moitié inférieure de la courbe, par contre la discordance croît avec les valeurs positives des écarts.

Il est donc très aisé d'améliorer l'ajustement en une seule étape (\cong optimiser) en modifiant la valeur moyenne de référence et en recalculant la nouvelle variance, la courbe 2 sur la figure correspond ainsi aux valeurs:

$$m^* = -4.10^{-4} \text{ et } \sigma^* = 84,06.10^{-4}$$

Remarques

1. A titre informatif, les écarts relatifs entre les valeurs des logarithmes de l'activité (en fait évidemment, par souci de rigueur: "les logarithmes des **nombres** traduisant en unités MKS l'activité")

$$x = (\log A - \log A_{th}) / \log A_{th}$$

sont reportés au tableau C.3 en regard des valeurs des activités.

2. "Didactiquement parlant", on peut dire que les 2 exemples traités dans cette annexe constituent une illustration édifiante de l'assertion tautologique selon laquelle une loi intégrale [ici la fonction de distribution F(x)] "nivelle les irrégularités" tandis qu'une loi différentielle [ici la fonction de densité f(x)] les met en exergue. En effet, la figure C.1 montre que les points représentatifs de l'histogramme choisi "collent" pratiquement avec la gaussienne elle-même et cela parce que le nombre de points de mesure est "très grand" au sens statistique.

Dans le cas de la figure C.2 par contre, on peut dire que le nombre de points n'est que "raisonnablement grand" au sens statistique de sorte que la fonction de distribution est très bien exploitable tandis que tout histogramme tendant à traduire la gaussienne s'avérerait trop grossier pour convaincre.

C'est le même type de raisonnement qui conduit à "louer" l'intérêt de la méthode de classement unitaire adopté pour mettre en évidence "notre" loi de répartition et de caractérisation sitologique: quelque 10 à 12 échantillons peuvent déjà conduire à un alignement convaincant tandis que

ce nombre serait absolument intraitable par histogramme.

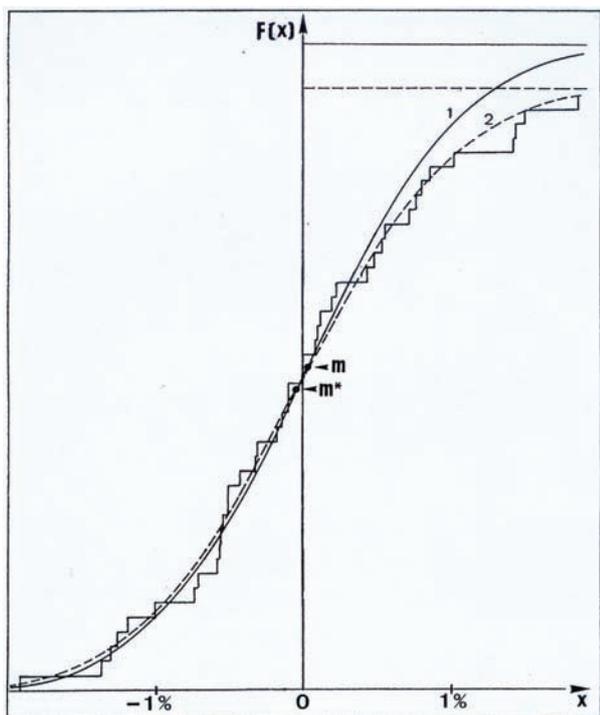


Figure C.2. Distribution statistique normale (ou gaussienne) des écarts relatifs logarithmiques (granite de la Revellate).

Tableau C.3. Activités et des écarts relatifs entre leurs valeurs logarithmiques pour le granite de la Revellate.

R	A	n	A _{th}	x · 10 ⁴
4	55	40	51,1	+187
37	53	39	50,1	+144
16	48	38	49,0	-53
53	47	37	48,0	-54
27	46	36	47,0	-56
29	45	35	46,0	-57
40	45	34	45,0	0
50	45	33	44,1	+53
19	44	32	43,2	+49
25	43	31	42,3	+44
41	43	30	41,4	+102
38	39	29	40,5	-102
34	38	28	39,7	-119
5	37	27	38,8	-130
17	37	26	38,0	-73
46	37	25	37,2	-15
18	36	24	36,4	-31
36	36	23	35,7	+23
10	35	22	34,9	+8
45	34	21	34,2	-17
13	33	20	33,5	-43
3	32	19	32,8	-71
44	32	18	32,1	-9
55	32	17	31,4	+55
20	31	16	30,8	+19
28	30	15	30,1	-10
22	29	14	29,5	-51
23	29	13	28,9	+10
49	28	12	28,3	-32
9	26	11	27,7	-191
11	26	10	27,1	-126
12	26	9	26,5	-58
24	26	8	26,0	0
39	26	7	25,4	+72
2	25	6	24,9	+12
7	25	5	24,4	+76
47	25	4	23,9	142
32	24	3	23,4	+80
35	24	2	22,9	+150
31	23	1	22,4	+85
8	21	0	21,9	-136

R = repère de l'échantillon (terrain et archivage)

A = activité volumique unitaire [en Bq/(m³.kg)]

n = numéro d'ordre de l'échantillon dans la « zone linéaire » et dans la formule

A_{th} = activité « théorique » c'est-à-dire correspondant à la droite de régression

x = écart relatif entre logarithmes de l'activité mesurée et de l'activité « théorique »

ANNEXE D. Aspects prophylactiques : le radon bénéfique à faible dose ?

A forte dose, le radon est néfaste, nul ne songerait sans doute à le nier. Il est, avec le tabac, la principale cause - ou au moins il augmente fortement les risques - du cancer du poumon (au niveau des bronches et bronchioles). Les ouvriers des mines d'uranium ou de radium sont malheureusement là pour en fournir la preuve péremptoire, en tout premier lieu les mineurs de Jachymov (ou Joachimsthal), la mine tchèque d'où fut extrait le minerai étudié par Marie Curie.

On notera d'ailleurs que le couplage tabac-radon est particulièrement pernicieux (effet dit multiplicatif) par le fait de la grande solubilité du radon dans les produits hydrocarbonés. En effet les voies respiratoires du fumeur, tapissées (« engluées ») de « goudron », retiennent le radon, qui sans cela les eût traversées plus rapidement, et accroissent donc la probabilité de désintégration in situ du radon.

Quant aux faibles doses, 2 tendances antagonistes « s'affrontent », leurs défenseurs se respectant d'ailleurs très « sportivement » faute d'éléments catégoriques confirmant ou infirmant l'une des thèses en présence.

Certains soutiennent qu'à faible dose le risque persiste tout en étant évidemment réduit au prorata, d'autres au contraire défendent l'idée qu'aux doses faibles, le radon peut avoir un effet bénéfique en ce que des agressions rares (conduisant dans le cas présent, à des ruptures d'ADN sous l'effet du « bombardement » alpha) « maintiennent » en éveil et même exaltent (effet hormesis) nos moyens de défense et de revalidation naturels.

Les organismes officiels de santé publique, appliquant sans restriction « le principe de précaution » s'en tiennent à la première thèse et recommandent donc la réduction du taux de radon dans les lieux de séjour prolongé (lieux publics, lieux de travail, écoles, salles de séjour domestiques, chambres à coucher...). En Belgique, aucune dérogation à cette règle de conduite n'existe et si la radioactivité a été jadis (surtout dans les années qui ont suivi sa découverte, soit au début du 20ème siècle, mais typiquement jusque dans les années 70) utilisée à des fins de « propagande » (terme plus approprié que le terme édulcoré et fallacieux de « publicité ») par des firmes commerciales « thermales », il ne pourrait plus, semble-t-il, en être question dans le contexte actuel.

Toutefois dans certains pays notamment en Allemagne, Autriche et en de nombreux pays de l'ancienne URSS particulièrement la Tchéquie, mais également au Canada (entre autres), des stations thermales, défendant la thèse de la « thérapie par le radon », offrent parfois une panoplie étonnante de cures à « effet graduel » telles que : eau naturellement ou artificiellement radonifère pour boisson ou bain, galerie d'exhalation naturelle et même inhalatorium sous casque ! En Allemagne, Bad Münster et Bad Kreuznach entre autres, très proches de chez nous, offrent de telles possibilités couplées à leurs très spectaculaires « salines ». Des fascicules très documentés sur la physique et les diverses thérapies du radon – toujours avec suivi médical – peuvent être obtenues localement (cf bibliographie) et de nombreux sites sont répertoriés sur internet, parfois sous l'égide de leur office de tourisme (mots clés pour la recherche : « radon, cure » ou « radon, inhalatorium » par exemple).

MOTIVATION ET REMERCIEMENTS.

Nous avons décrit au chapitre 2 l'équipement du Laboratoire-radon de l'Université de Liège, grâce auquel nous avons pu réaliser les mesures faisant l'objet du présent travail, mais nous nous devons d'exposer ici la motivation même de ce Laboratoire et de remercier les principaux acteurs ou collaborateurs qui ont contribué à sa création, son extension et qui contribueront, nous l'espérons, à sa pérennité.

C'est à l'initiative et avec l'aide précieuse et infatigable de M. Julien Garsou, ancien Directeur du Service de Contrôle Physique des Radiations Ionisantes de l'ULg et ancien Responsable du Contrôle Physique au Service de Radiologie et de Médecine Nucléaire du CHU, que nous avons mis en chantier ce nouveau volet de l'activité du Service de Mesures et Instrumentation Electronique (M.I.El.) de l'Institut Montefiore au début des années 90.

La motivation première était de doter l'ULg d'un laboratoire d'étalonnage et d'équipements de mesures dynamiques du radon permettant de compléter les mesures effectuées par les organismes officiels ou privés opérant chez le particulier et ce afin de vérifier rapidement l'efficacité des moyens de remédiation éventuellement préconisés par lesdits services.

D'entrée de jeu, le laboratoire s'est équipé sur fonds propres de plusieurs appareils du type Radim (cf chap. 2) qui ont permis d'offrir ce service citoyen, lequel s'est rapidement développé notamment grâce à la coopération initiale très efficace du Service de médecine préventive de la Province de Liège.

Ce premier appareillage s'est lui-même avéré suffisamment performant pour éveiller un intérêt pour des recherches à caractère plus fondamental, objet principal du présent mémoire, dont les premiers résultats ont permis de convaincre les autorités et organes de gestion de la Recherche de l'ULg et il nous est un agréable devoir de remercier ici en premier Monsieur le Recteur B. Rentier - à l'époque Vice-Recteur de l'Université - qui a appuyé notre projet et ainsi permis l'acquisition d'un équipement de mesure diversifié et de hautes performances.

Les recherches en ce domaine ont rapidement progressé grâce à une collaboration aussi efficace que cordiale avec nombre de collègues de notre université parmi lesquels nous voulons mettre en exergue J. Garsou lui-même ainsi que F. Dimanche et P. Mignonsin.

Mme A. Anceau, Mme J. Vander Auwera, et M. F. Hatert nous ont fait bénéficier de leurs judicieux conseils dès les premiers tâtonnements. Nous avons pu aussi rapidement apprécier l'aide spéciale de nos collègues du département de géologie: F. Boulvain, J.-C. Duchesne, A.-M. Fransolet, E. Poty et du département de chimie: R. Cloots et A. Rulmont. Nous ne pouvons oublier les échanges de vue fructueux et les judicieux conseils de collègues extérieurs à notre université et spécialistes reconnus dans le domaine du radon: J.-M. Charlet de la Faculté polytechnique de Mons, A. Poffijn de l'Universiteit Gent, le regretté A. Chambaudet de l'Université de Franche-Comté (Besançon), M. Simoën et J.-L. Picolo du C.E.N. Saclay, M. Makabu de la Faculté polytechnique de Lubumbashi (RDC).

Les Drs P. Lejeune et L. Leclerc Directeurs respectifs de nos deux stations scientifiques de «Stareso» (station de recherches sous-marines et océanographiques) de Calvi, Corse et «des Hautes Fagnes» (Mont Rigi) ont droit à notre reconnaissance particulière pour l'accueil et l'aide logistique et scientifique dont ils nous ont gratifié lors de nos séjours de recherches.

Enfin comment ne pas exprimer notre reconnaissance aux membres des groupes d'amis réunis sous l'acronyme G.R.I.L. (groupes radon interdisciplinaires liégeois) qui ont apporté leurs compétences spécifiques ainsi que leur aide «de terrain» pour dépister les sites intéressants ou récolter les échantillons à analyser: J. Cougnet, G. Dethier, F. Dimanche, A. Fraipont, J. Garsou, J.-M. Groulard, Ch. Legros, E. Lohay, M.-O. Louppe, R. Mouton, D. Théâtre (G.R.I.L. 1: eaux et dépôts ferrifères du Massif de Stavelot, spécialement); C. Ek, M. Defise, J. Garsou, J. Godissart, P. Harmeling, A. Jamouille, S. Laurent, J.-P. Offergeld (G.R.I.L. 2: roches, air et eau en cavités souterraines notamment ainsi que air chez les particuliers).

Références et bibliographie

Cette liste de travaux n'a certes pas la prétention d'être exhaustive. Le nombre de publications sur ce sujet - très vaste de par ses diverses implications - est à la fois considérable et de qualités très disparates. Nous avons simplement ici rapporté les titres de publications sélectionnées pour les informations particulières qu'elles nous ont personnellement fournies. Elles mêmes - disponibles au Département Electricité, Electronique et Informatique de Montefiore - contiennent évidemment nombre de références de première main.

Le classement en rubriques particulières est indicatif car des chevauchements et recoupements sont a priori inévitables. Nous pensons néanmoins qu'il permet d'orienter utilement les recherches d'informations. Une attention toute particulière a évidemment été portée aux aspects métrologiques du radon.

Une rubrique est consacrée aux effets jugés bénéfiques de l'exposition au radon. Le soin est laissé au lecteur de se faire une opinion personnelle quant aux allégations rapportées dans ces documents de « propagande ».

Trois références citées, qui remontent au début du 20^{ème} siècle (le recueil des travaux de Marie Curie a été publié en 1954 par sa fille Irène Joliot-Curie), ont valeur historique.

A. Généralités

Manuels, Dossiers, Brochures

- [A.1] I. Joliot-Curie, éditrice, « Œuvres de Marie Sklodowska Curie », Académie Polonaise des Sciences, Varsovie, 1954
- [A.2] M. Caubergs, Inventaire de quelques anciennes mines et carrières souterraines de Wallonie », Ed. de l'auteur
- [A.3] M. Deliens, P. Piret, G. Comblain, « Les minéraux secondaires d'uranium du Zaïre », Ed. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, 1981
- [A.4] M. Deliens, P. Piret, G. Comblain, « Les minéraux secondaires d'uranium du Zaïre. Complément », Ed. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, 1984
- [A.5] E. A. Keller, « Environmental Geology », Ed. Merrill Publ. Co., 5th ed., 1988
- [A.6] W. W. Nazaroff, A. V. Nero Jr, « Radon and its Decay Products in Indoor Air », Ed. Wiley Interscience Publ., 1990
- [A.7] M. Deliens, P. Piret, E. Van Der Meersche, « Les minéraux secondaires d'uranium du Zaïre. Deuxième complément », Ed. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, 1990

- [A.8] D. Blanc, « Physique nucléaire pour les médecins et les biologistes », Masson, 2^{ème} édition, Paris, 1995
- [A.9] « Le radon », Ed. Les livrets de l'IPSN (F), 1997
- [A.10] M. Blondieau, « Recherches minières, mines et carrières de Famenne », Ed. de l'auteur, 1997
- [A.11] H. Métivier et M.-Ch. Robé, coordonnateurs, « Le radon. De l'environnement à l'Homme », Institut de Protection et Sûreté Nucléaire (IPSN), EDP Sciences 1998
- [A.12] « Les irradiations naturelles en France », Journées d'Etude Soc. Franç. de Radioprotection Poitiers, 17-18 mars 1998
- [A.13] S. Dufour, « Les Ardoisières. Les vallées d'Aise et des Alleines », Ed. Centre Culturel de Bertrix, 153 p., 2^{ème} éd. 1998
- [A.14] J. A. Mandarino, « Fleischer's Glossary of Mineral Species », Ed. The Mineral Record Inc., Tucson, 8th ed. 1999
- [A.15] R. André-Jehan et J. Féraud, coordonnateurs, « Le radon, dossier », Géochronique, n°78, 2001
- [A.16] Ch. Pomerol, Y. Lagabrielle, M. Renard, « Eléments de géologie », Ed. Dunod, 12^{ème} éd., 2002
- [A.17] E. Poty, E. Chevalier, « L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives », Ed. Ministère de la Région Wallonne, Jambes, 2004

B. Métrologie du radon

Manuels et Dossiers

- [B.1] « Métrologie et Surveillance du radon, du thoron et de leurs produits de filiation », OCDE, Agence pour l'Energie Nucléaire, Paris, 1985
- [B.2] S. A. Durrani, R. K. Bull, « Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications », Ed. Pergamon Press, 1987
- [B.3] « Measurement of Radon and Radon Daughters in Air. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements », Ed. NCRPM, Iss. Nov. 1988
- [B.4] J.-L. Picolo, « Etude et réalisation d'un dispositif cryogénique permettant d'effectuer des mesures absolues d'activité de radon 222 en vue de l'élaboration d'un étalon primaire », Rapport CEA, Saclay : CEA-R-5696, Ed. Serv. Doc. Et Edit. Multimédia, 1995
- [B.5] S. A. Durrani, R. Ilic, « Radon Measurements by Etched Track Detectors. Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment », Ed. World Scientific, 1997

Publications

- [B.6] B. L. Cohen, E. S. Cohen, « Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption », *Health Physics*, vol. 45, n° 2, pp 501-508, Aug. 1983
- [B.7] A. Chambaudet, M. Cieur, M. Hussonois, D. Klein, « A portable system for the continuous measurement of radon-222 in hostile geophysical environments », *Nuclear Instr. And Meth. In Physics Res. B61*, pp 244-250, 1991
- [B.8] R. Barillon, D. Klein, A. Chambaudet, C. Chevillard, « Comparison of effectiveness of three radon detectors (LR 115, CR 39 and silicon diode PIN) placed in a cylindrical device – Theory and experimental techniques », *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, vol. 22, n° 1-4, pp 281-282, 1993
- [B.9] R. Barillon, D. Klein, A. Chambaudet, S. Malakhov, « Nuclear track detectors for radon monitoring in coal mines in the Kouzbass Siberian region (Russian Confederation) », *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, vol. 22, n° 1-4, pp 365-368, 1993
- [B.10] D. Klein, N. Roudko, A. Chambaudet, S. Malakhov, « Methodology to characterise radon emanation in environmental sciences. Radon measurements in coal mines in Kousbass region », *Proc. Intern. Symposium : « The impact of Mining on the Environment »*, 1994
- [B.11] J.-L. Picolo, « Mise au point d'une référence primaire d'activité de radon 222 », *Bull. du Bureau Nat. de Métrologie (F)*, n° 103, Janv. 1996
- [B.12] A. Chambaudet, D. Klein, R. Barillon, C. Devillard, A. Ozgumus, E. Tomaselia, M. L. Toussaint, « French techniques for radon emanation measurements », *Rare Gas Geochemistry, Proc. Vol. 3rd ICRGG*, 1996
- [B.13] A. Chambaudet, D. Klein, M. Voytchev, « Study of the response of silicon detectors for alpha particles », *Radiation Measurements*, vol. 28, n°1-6, pp 127-132, 1997
- [B.14] M. Gerken, L. Kreienbrock, J. Wellmann, M. Kreuzer, H. E. Wichmann, « Models for retrospective quantification of indoor radon exposure in case-control studies », *Health Physics*, vol. 78, n° 3, pp 268-278, Mar. 2000
- [B.15] D. Nikezic, K. N. Yu, « Monte Carlo calculations of LR115 detector response to ^{222}Rn in the presence of ^{220}Rn », *Health Physics*, vol. 78, n° 4, pp 414-419, Apr. 2000
- [B.16] S. A. Hadley, N. R. Meyer, R. L. Fleischer, A. Cavallo, « Eyeglass lenses for personal radon dosimetry », *Health Physics*, vol. 79, n° 3, pp 242-250, Sept. 2000
- [B.17] J. Vaupotic, I. Csige, V. Radolic, I. Hunyadi, J. Planinic, I. Kobal, « Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna cave, Slovenia », *Health Physics*, vol. 80, n° 2, pp 142-147, Feb. 2001
- [B.18] H. W. Vanderschueren, F. Dimanche, « A propos de la métrologie du radon : généralités et cas concrets », *Rev. Hautes Fagnes*, n° 4, 2002
- [B.19] R. Fleischer, « Détecteurs étonnants et banals », *Pour la Science*, n° 303, pp 68-73, janv. 2003
- [B.20] H.W.Vanderschueren, « Philosophie actuelle du traitement des incertitudes de mesure », *Rev. A.I.M.- Liège*, n°1, 1999

*C. Physicochimie du radon et modélisation comportementale***Manuel et Dossier**

- [C.1] R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker, « Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications », Ed. University of California Press, 1975
- [C.2] J.-L. Picolo, « Propriétés physicochimiques du radon et de ses descendants », *CEA Saclay, Note technique LPRI. 93.017*, 1993

Articles

- [C.3] C. Quet et P. Bussière, « Pouvoir émanateur de solides finement divisés », *Journal de Chimie physique et de Physicochimie biologique*, 72, pp 824-830, 1975
- [C.4] B. A. Ahier, C.R. Phillips, « Response of the unattached ^{218}Po -activity size distribution in H_2O - SO_2 - N_2 atmospheres », *Health Physics*, vol. 61, n° 3, pp 373-385, Sep. 1991
- [C.5] M. Wojcik, « Measurement of radon diffusion and solubility constants in membranes », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B61*, pp 8-11, 1991
- [C.6] A.W. Casleman Jr, « Consideration of the Chemistry of Radon Progeny », *Environ. Sci. Technol.*, 25, pp 730-735, 1991
- [C.7] S. Ch. Scarpitta, « Optimum ^{222}Rn -adsorbing activated charcoals », *Health Physics*, vol. 62, n° 6, pp 576-580, Juni 1992
- [C.8] J. Cornelis, H. Vanmarcke, C. Landsheere, A. Poffijn, « Modeling radon progeny absorbed in glass », *Health Physics*, vol. 65, n° 4, pp 414-417, Oct. 1993
- [C.9] L. Morawska, C.R. Phillips, « Dependence of the radon emanation coefficient on radium distribution and internal structure of the material », *Géochim. Cosmochim. Acta*, 57, pp 1783-1797, 1993
- [C.10] I. Lakatos, K. Bauer, J. Lakatos-szabo, I. Csige, J. Hakl, H.-J. Kretzschmar, « Diffusion of Radon in Porous Media Saturated with Gels and

Emulsions », *Transport in Porous Media*, 27, 171-184, 1997

[C.11] D. Wang, H.-P. Chiang, Y.-H. Shiau, W.-S. Tse, K. Skrabbe, K.-P. Li, « A Theoretical Treatment of Adsorption of Radon Gas on Charcoal », *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 34, n° 9, pp 930-938, Sep. 1997

[C.12] M. Antonopoulos-Domis, P. Kriditis, C. Raptis, « Diffusion model of radon exhalation rates », *Health Physics*, vol. 74, n° 5, pp 574-580, 1998

[C.13] L. Zikovsky, « Determination of adsorption coefficients of ^{222}Rn on activated charcoal by adsorption-desorption in a simple laboratory apparatus », *Health Physics*, vol. 75, n° 3, pp 313-314, 1998

[C.14] J. Morel, M. Etcheverry, J.-L. Picolo, « Probabilité d'émission photonique des principales raies gamma émises par les descendants du radon-222 », *bulletin du BNM (F)*, n° 114, oct. 1998

[C.15] H. W. Vanderschueren, P. Harmeling, J. Garsou, « Etude de la diffusivité libre du radon. Application à la détermination de l'efficacité de l'aération d'un local », *Rev. A.I.M.-Liège*, n°3, 1999

[C.16] P. Cauwels, A. Poffijn, W. Mondelaers, P. Lahorte, B. Masschaele, G. Meesen, A. Van Deynse, « Theoretical study of the relation between radon and its long-lived progeny in a room », *Health Physics*, vol. 79, n° 4, pp 389-395, 2000

[C.17] H. W. Vanderschueren, J. Garsou, P. Laubin, « Solution du système de 6 équations différentielles d'une filiation radioactive. Application au Rn 222 et au Po 218 », *Départ. Electricité, Electronique, Informatique Montefiore*, note technique interne N.T.I. 2000-1, Serv. M.I.El, ULg, 2000

[C.18] L. Minkin, « Thermodiffusion in concrete slab as a driving force of indoor radon entry », *Health Physics*, vol. 80, n° 2, pp 151-156, 2001

D. *Geologie*

Manuels et Dossier

[D.1] M. Rouault, « Géologie de l'uranium », Ed. Masson, 1958

[D.1'] W. Dyck, « The mobility and concentration of U and its decay products in temperate superficial environments in Kimberley MM », in *Short course in U deposits*, Toronto, Min. Ass. Canada, pp 57-101, 1978

[D.2] F. J. Dahlkamp, « Uranium Ore Deposits », Ed. Springer-Verlag, 1993

Articles

[D.3] J. C. Sabroux, « Le radon, traceur de phénomènes naturels », *Le Radium* pp 32-47, 1904

[D.3'] J. J.W. Rogers, J. A.S. Adams, « Lognormality of thorium concentrations in the Conway granite », *Geochemica et Cosmochimica Acta*, vol. 27, issue 7, pp 775-783, 1963

[D.4] J.M. Charlet, coordonnateur, « Le radon dans les habitations, aspects géologiques du risque », *Plaquette du Secrétariat à l'Energie*, 1993

[D.5] A. Özgümüş, R. Barillon, A. Chambaudet, « Radon emanation coefficient study of a geological sample », *Proc. Ivth ICRGG*, Rome, Oct. 1997

[D.6] I. Je, N. Eyles, « Bedrock Structure Control on Soil-Gas Radon-222 Anomalies in the Toronto Area, Ontario, Canada », *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. IV, n° 4, pp 445-454, 1998

[D.7] St. Demongeot, « Recherche des différents paramètres caractérisant le potentiel d'exhalation en radon des sols », *CEA Saclay, Rapport CEA-R-5795*, 1998

[D.8] A. Kies, F. Massen, « Radon concentrations under a dam reservoir », *Vth Int. Conf. Gas Geochemistry*, Debrecen (Hungary), 12 p., Sept. 1999

[D.9] A. Kies, F. Massen, « Investigations on radon concentrations under the Vianden Storage Reservoir », *Journées Luxembourgeoises de Géodynamique*, 86th session, Munsbach (G.D. Luxembourg), 10 p., Nov. 1999

[D.10] A. Özgümüş, R. Barillon, A. Chambaudet, J. E. Groetz, « Theoretical study of the radon emanation coefficient for granular material : influence of packing and humidity », *Proc. Workshop in the Living Environment*, Athens (Greece), 19-23 Apr. 1999

[D.11] H. W. Vanderschueren, J. Garsou, J. Gillet, « Etude comparative de l'exhalation de radon par les "granites industriels" », *Rev. A.I.M.-Liège*, n°4, 1999

[D.12] V. Tort, T. Schneider, J.-L. Daroussin, « Evaluation de l'impact radiologique du radon associé au stockage des résidus de traitement de minerais d'uranium », *Radioprotection*, vol. 34, n° 4, pp 491-503, 1999

[D.13] K. Kharatian, Y. Travi, V. Igoumnov, « Activité du gaz radon dans l'air du sol et sismicité locale : exemple du bassin de l'Arax (Arménie) », *C.R. Académie des Sciences (F), Géosciences de surface*, 334 pp 179-185, 2002

[D.14] H. W. Vanderschueren, M.-O. Louppe, « La Station de Recherches Sous-Marines et Océanographiques en Corse (Stareso), Domaine privilégié pour l'étude de l'exhalation du radon en site granitique », *Rev. A.I.M.-Liège*, n°1, 2002

[D.15] F. Dimanche, H. W. Vanderschueren, « Le cycle géochimique des métaux radioactifs en milieu fagnard ardennais », Rev. Hautes Fagnes, n° 1, 2003

[D.16] J.-C. Duchesne, E. Goemaere, J.-C. Grigolato, H.W. Vanderschueren, B. Charlier, « Altered rhyolitic rocks in the Visé boreholes : a geochemical approach », *Geologica Belgica*, 8/3, pp 71-83, 2005

E. *Le radon et l'eau*

[E.1] E. Gérard, F. Fontaine, « Mesure de la Radioactivité des Eaux de Spa et des environs », *Bull. Sc. de l'Assoc. des Ing. El. Liège*, pp 241-252, 1906

[E.1'] L. Zikovsky, B. Chah, « Lognormal distribution of radon concentration in ground water », *Ground Water*, vol. 28, n°5, pp 673-676, 1990

[E.2] R. Barillon, S. Violette, E. Nicolini, D. Klein, A. Chambaudet, J.P. Carbonnel, M. J. Heath, J. Merefield, « Continuous measurements of radon content in groundwater on the volcanic site of « Piton de la Fournaise » (Island of Reunion, France) », *Nuclear Tracks Radiat. Meas.*, vol. 22, n° 1-4, pp 277-280, 1993

[E.3] E. Nicolini, S. Violette, D. Klein, R. Barillon, M. Rouault, « Radon activity in groundwaters of active volcano, Piton de la Fournaise, Reunion Island ».

[E.4] D. Théâtre, « Les pouhons sur internet », www.pouhon.com

[E.5] A. Savidou, G. Sideris, N. Zouridakis, « Radon in public water supplies in Migdonia Basin, Central Macedonia, Northern Greece », *Health Physics*, vol. 80, n° 2, pp 377-393, Feb. 2001

[E.6] J.-M. Charlet, « Radon dans les eaux souterraines, le cas de la Wallonie », *Tribune de l'Eau*, n° 600-601, pp 85-96, 1999

[E.7] J. Cougnet et al : Collectif G.R.I.L. (Groupe Radon Interdisciplinaire Liégeois), « Mesure des émissions radon dans les eaux et les milieux géologiques fagnards, ainsi qu'en divers contextes non-fagnards de comparaison – données analytiques complètes », *Rev. Hautes Fagnes*, n° 2, 2003

[E.8] S.D. Schery, S. Huang, « An estimate of the global distribution of radon emissions from the ocean », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L19104, doi :10.1029/2004GL021051, 4p, 2004

F. *Aspects médicaux et études épidémiologiques*

[F.1] R. Taylor, F. Carlier, « Le radon et l'amiante », Ed. Gamma Tournai, 17p, 1991

[F.2] B. L. Cohen, « Validity of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis in the low dose region », *Technology*, vol. 6, pp43-61, 1999

[F.3] « Exposures from natural radiation sources », Un. Nat. Scient. Committee, 48th session os UNSCEAR, Vienna, 12-16 Apr. 1999

[F.4] P. Servais, « Umwelt und Krebs. Ratgeber Prävention », *Fond. Luxemb. contre le Cancer*, 2000

[F.5] W. Hofmann, M. G. Ménache, D. J. Crawford-Brown, R. S. Caswell, L. R. Karam, « Modeling energy deposition and cellular radiation effects in human bronchial epithelium by radon progeny alpha particles », *Health Physics*, vol. 78, n° 4, pp 377-393, Avr. 2000

[F.6] B. L. Cohen, « Testing a Beir-VI suggestion for explaining the lung cancer vs. Radon relationship for U.S. counties », *Health Physics*, vol. 78, n° 5, pp 522-562, May. 2000

[F.7] Y. Wang, C. Ju, A. D. Stark, N. Teresi, « Radon awareness, testing and remediation survey among New-York State residents », *Health Physics*, vol. 78, n° 6, pp 641-647, Jun. 2000

[F.8] F.D. Gilliland, W.C. Hunt, V.E. Archer, G. Saccomanno, « Radon progeny exposure and lung cancer risk among non-smoking uranium miners », *Health Physics*, vol. 79, n° 4, pp 365-372, Oct. 2000

[F.9] M. Bilban, J. Vaupotic, « Chromosome aberrations study of pupils in high radon level elementary school », *Health Physics*, vol. 80, n° 2, Feb. 2001

G. *Directives officielles de radioprotection*

[G.1] Radiation Protection 88, « Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources », Directorate-General Environnement, Nuclear Safety and Civil Protection, European Communities, 34 p, 1997

H. *Environnement*

[H.1] « Radiation protection. Exposure to natural radiation in dwellings of the European Communities », Directorate-General Health and Safety, Luxembourg, May 1987

[H.2] P. Zettwoog, N. Lemaître, S. Bernard, Y. Vauzelle, « Utilisation de la signature isotopique

des radionucléides relâchés par les mines et les usines de traitement de minerais d'uranium, pour discriminer aux bas niveaux leur impact environnemental de celui de la radioactivité tellurique naturelle », Radioprotection, vol. 32, n°4, pp 467-489, 1997

I. Mesures et moyens de remédiation domestiques

[I.1] N. Jonassen, « The Effect of Filtration and Exposure to Electric Fields on Airborne Radon Progeny », Chapter 20 in « Radon and its decay Products », American Chemical Society, pp 264-271, 1987

[I.2] M.-C. Robé, D. Grassin, C. Cottaz, « Techniques de réduction du radon dans les bâtiments – Quelques cas concrets », Rapport IPSN (F), 97-36, 1997

[I.3] B. Collignan, J.-R. Millet, « Des moyens de réduire la concentration en radon dans les bâtiments », CSTB Magazine n° 113, pp 25-30, avr. 1998

[I.4] J. Wiegand, S. Feige, X. Quingling, U. Schreiber, K. Wieditz, Ch. Wittmann, L. Xiarong, « Radon and thoron in cave dwellings (Yan'an, China) », Health Physics, vol. 78, n° 4, pp 438-444, Apr. 2000

[I.5] M. Kuske, J. Nicolas, « Les pollutions dans l'air intérieur des bâtiments. Diagnostic, Incidences sur la santé », F.U.L. Arlon, Prov. Lux. Départ. Prévention-Santé, 2000

[I.6] « Protection against radon », Proceedings Third Eurosymposium A.I.M., Assoc. Ingénieurs de Montefiore, Liège, 2001

J. Effets « exotiques »

[J.1] J. F. Ziegler, T. H. Zabel, H. W. Curtis, « Video display terminals and radon », Health Physics, vol. 65, n° 3, pp 252-264, 1993

[J.2] D. L. Henshaw, A. N. Ross, A.P. Fewes, A. W. Preece, « Enhanced deposition of radon daughter nuclei in the vicinity of power frequency electromagnetic fields », Int. J. Radiat. Biol., vol. 69, n° 1, pp 25-38, 1996

[J.3] J. C. H. Miles, R.A. Algar, « Measurements of radon decay product concentrations under power lines », Radiation Protection Dosimetry, vol. 74, n° 3, pp 193-194, 1997

[J.4] R. Biagioni, R. W. Sheets, « ^{222}Rn emanation from uranium-glazed ceramics », Health Physics, vol. 80, n° 2, pp 148-150, 2001

K. « Effets bénéfiques du radon »

[K.1] « Radon-Heilbad, seit 1478, Bad Münster am Stein-Eberburg », Kurverwaltung Bad Münster in Verbindung mit dem Arbeitskreis Bau- und Naturdenkmäler, 1986

[K.2] « 10 Fragen zur Radontherapie », Arbeitsgemeinschaft Europäischer Radonheilbäder, 1999

[K.3] Endroits de cure de « radonothérapie » :
Allemagne : Bad Brambach, Bad Kreuznach, Bad Münster am Stein-Eberburg, Bad Schmiedeberg, Bad Steben, Schlema, Sibyllenbad

Autriche : Bad Gastein, Bad Hofgastein, Bad Zell

Tchéquie : Jachymov (St-Joachimsthal)
Italie, Bulgarie, Pologne, Japon, Russie (plus de 30 endroits)...!

L. « Divers »

[L.1] S. Newcomb, « Note on the frequency of the use of the digits in natural numbers », Amer. Jour. Math., 4, pp 39-40, 1881

[L.2] F. Benford, « The law of anomalous numbers », Proc. Amer. Philos. Soc., 78-4, pp 551-572, 1938

[L.3] J.-P. Delahaye, « L'étonnante loi de Benford », Pour la Science, n°351, pp 90-95, janvier 2007

[L.4] C. Lopez,
http://www.geo.upm.es/postgrado/CarlosLopez/geost_03/node43.html, « The Lognormal Distribution »

[L.5] « Wikipedia »,
fr.wikipedia.org/wiki/Loi_log-normale, {Google : wikipedia lognormal}

Manuscrit déposé le 26.11.2008 et accepté pour publication le 17.2.2009.

H.W. Vanderschueren, « **Le Radon. Mesure dynamique de son exhalation par l'air, l'eau et les solides. Contribution à la caractérisation géologique des matériaux et des sites. Tome 1. Thèse principale: Distribution statistique log-uniforme.** », publication à diffusion restreinte ULg, 292 p., juillet 2010.

Professional Papers of the Geological Survey of Belgium

The series, which started in 1966, welcomes papers dealing with all aspects of the earth sciences, with a particular emphasis on the regional geology of Belgium and adjacent areas. Detailed geological observations are accepted if they are interpreted and integrated in the local geological framework (e.g. boreholes, geological sections, geochemical analyses, etc.). Submitted papers written in English, French, Dutch or German should present the results of original studies. Members of the Geological Survey of Belgium or external reviewers will review each paper.

Editor Geological Survey of Belgium
Jenner str. 13
B-1000 Brussels
Belgium

Editorial board Léon Dejonghe
Michiel Duser

Guide for authors: see website Geologica Belgica
<http://www.ulg.ac.be/geolsed/GB>

List of publications and conditions of sale: see website Geological Survey of Belgium
http://www.naturalsciences.be/institute/structure/geology/gsb_website/products/pp
or website Royal Belgian Institute of Natural Sciences
<http://www.natuurwetenschappen.be/common/pdf/science/publications/Cata/index.html>

ISSN 0378-0902

© Geological Survey of Belgium

Impression: Service public fédéral
Economie, P.M.E., Classes moyennes et
Energie

Drukwerk: Federale Overheidsdienst
Economie, K.M.O., Middenstand en Energie

“The Geological Survey of Belgium cannot be held responsible for the accuracy of the contents, the opinions given and the statements made in the articles published in this series, the responsibility resting with the authors.”