

Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon en Basse-Normandie

Rapport Final

BRGM/RP-54772-FR
Juin 2006



Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon en Basse-Normandie

Rapport Final

BRGM/RP-54772-FR

Juin 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2005 PSP05BNO09

B. Tourlière et P. Le Berre

Avec la collaboration de
J-F. Pasquet et P. Lebret



Liberté • Egalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de la santé
et des solidarités



PRSE - BASSE NORMANDIE

Vérificateur :

Nom : P. Lebret

Date : 04/07/2006

Signature : p/o JF Pasquet

Approbateur :

Nom : JF Pasquet

Date : 05/07/2006

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Basse-Normandie, Calvados, Manche, Orne, radon, uranium, aléa, levé aérospectrométrique, carte géologique numérisée

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Tourlière B., Le Berre P., Pasquet J.-F., Leuret P. ; (2006) : Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon en Basse-Normandie – Rapport BRGM/RP-54772-FR, 80 p., 14 ill., 4 ann., 12 cartes hors texte, 2 pl. hors texte.

Synthèse

Le radon est un gaz radioactif naturel, invisible et sans odeur qui peut s'accumuler dans l'atmosphère confinée de certains bâtiments et atteindre des concentrations dangereuses pour la santé (risque de développer un cancer du poumon).

Depuis 1982, des campagnes de mesure ont été menées dans les bâtiments par l'IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire) et la DGS (Direction Générale de la Santé).

Afin de focaliser ces mesures sur les zones les plus naturellement sensibles, la DRASS de Basse-Normandie a demandé au BRGM d'établir une cartographie de l'aléa radon à partir des données géologiques disponibles pour l'ensemble de cette région (convention du 17/11/2005).

Le travail a consisté à superposer les teneurs en uranium issues du levé aérospectrométrique du Massif armoricain (1998) aux données des cartes géologiques départementales harmonisées et numérisées pour localiser les formations géologiques à aléa radon. Ce levé aérospectrométrique ne couvre qu'une partie de la région Basse-Normandie. Sur cette partie, il a été calculé une teneur moyenne en uranium par formation géologique, puis cette valeur moyenne a été étendue à l'ensemble de la formation présente dans la région. Enfin, il a été calculé la teneur moyenne en uranium pour les communes ayant au moins 70% de leur surface couverte par des formations géologiques à teneur en uranium connue.

Les teneurs en uranium mesurées au cours du levé aérospectrométrique réalisé en Basse-Normandie sont généralement basses. La teneur moyenne des différentes formations géologiques est généralement inférieure à 3 eppm¹ (formations considérées comme non anormales lors de l'étude sur la région des Pays de la Loire).

Parmi ces formations, seules quelques unes présentent des teneurs supérieures à 3 eppm : les Siltites et argilites lustrées du Briovérien, les Grès à Platyorthis (Dévonien), les Calcaires à spongiaires et des Argiles à poissons (Jurassique) couvrent des surfaces significatives.

Le calcul de la teneur moyenne en uranium par commune a mis en évidence l'existence d'un groupement de communes à teneur en uranium comprise entre 3 et 5 eppm dans la région de Falaise.

¹ Eppm : teneur en uranium, calculée d'après le rayonnement, en « équivalent partie par million »

Les failles sont connues pour favoriser l'exhalaison du gaz radon car elles constituent des drains et des voies de circulation préférentielle des fluides (à teneur en uranium équivalente, on peut supposer que l'aléa radon est plus fort dans les zones faillées).

Il a été estimé une densité de failles par commune, à partir de l'ensemble des failles dessinées sur les cartes géologiques harmonisées, ce qui a permis de repérer des zones intensément faillées :

- autour de Coutances,
- à l'ouest de la Ferté-Macé,
- au sud d'Avranches,
- au nord de Vire.

La combinaison des teneurs moyennes en uranium et de la densité de failles par commune a permis de confirmer l'aléa pour les communes situées à proximité de Falaise.

Mais l'extension des teneurs moyennes en uranium par formation à l'ensemble de la région Basse-Normandie se heurte au fait que certaines formations ne sont pas répertoriées dans la zone de prospection aéroportée et ne peuvent être affectées d'une teneur en uranium. Afin de compléter cette cartographie, nous avons recherché dans les bases de données BRGM, les résultats d'analyses chimiques uranium et de diagraphies gamma-ray (exprimés en coups par seconde) de la région. Nous avons tenté d'établir une corrélation entre ces données et les teneurs en uranium du levé aérospectrométrique. Mais le nombre d'analyses chimiques ou de diagraphies est insuffisant pour établir une corrélation valide.

De ce fait, il a été défini un aléa à partir des mesures radon fournies par les DDASS et l'OPRI dans les bâtiments. Ont été prises en compte les teneurs maximum en radon mesurées dans les bâtiments pour chaque commune : pas de mesure, aléa 0, mesure < 400 Bq/m³, aléa 1, comprise entre 400 et 1000 Bq/m³, aléa 2, > 1000 Bq/m³, aléa 3.

Ces valeurs ont été uniquement prises en compte pour les communes dont la teneur en uranium n'a pu être estimée à partir du levé aérospectrométrique et des cartes géologiques.

La prise en compte simultanée de la teneur en uranium par formation géologique, des mesures de radon dans les bâtiments pour les communes dont la teneur en uranium est inconnue et de la densité de failles a conduit à identifier 48 communes de Basse-Normandie présentant un aléa radon significatif :

- 18 communes dans le Calvados,
- 11 communes dans la Manche
- 15 communes dans l'Orne.

Sommaire

1. Cadre du projet	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	9
1.3. DONNEES DE BASE	10
2. Généralités sur le radon.....	11
2.1. RAPPEL CONCERNANT LA RADIOACTIVITE	11
2.2. ORIGINE DU RADON.....	12
2.3. RADON ET SANTE	13
3. Cadre géologique	15
3.1. FORMATIONS PROTEROZOIQUES ET PALEOZOIQUES	17
3.2. FORMATIONS DU TRIAS ET DU JURASSIQUE	18
3.3. FORMATIONS DU CRETACE.....	18
3.4. FORMATIONS TERTIAIRES ET QUATERNAIRES.....	19
3.5. DONNEES STRUCTURALES	20
4. Description des travaux.....	23
4.1. UTILISATION DU LEVE AEROSPECTROMETRIQUE DU MASSIF ARMORICAIN.....	23
4.1.1. Description du levé aérospectrométrique du Massif armoricain.....	23
4.1.2. Cartographie de l'aléa radon en Basse-Normandie à partir du levé aérospectrométrique.....	25
4.2. RECHERCHE D'ANALYSES CHIMIQUES URANIUM ET DE DIAGRAPHIES GAMMA-RAY	33
4.2.1. Résultats d'analyses chimiques uranium	34
4.2.2. Diagraphies gamma-ray	36
4.2.3. Indices miniers.....	38
4.2.4. Carte de synthèse	38

4.3. MESURES DE RADON DANS LES BATIMENTS	40
4.3.1. Utilisation des mesures radon	41
4.3.2. Autres mesures radon	46
5. Conclusion	47
6. Bibliographie	49

Liste des illustrations

Illustration 1 : Chaîne de désintégration de l'uranium 238 (d'après M.C. Robé, IRSN).....	12
Illustration 2 : Carte géologique simplifiée de la Basse-Normandie.	16
Illustration 3 : Exemple de spectre de rayonnement gamma (extrait du site internet "Ressources Naturelles Canada").	25
Illustration 4 : Formations géologiques à teneur en uranium supérieure à 3 eppm.....	27
Illustration 5 : Communes présentant des teneurs en uranium supérieures à 3 eppm.	29
Illustration 6 : Scores affectés aux paramètres U moyen et densité de failles par commune.....	30
Illustration 7 : Liste des communes présentant au moins une anomalie uranium supérieure à 2 eppm avec un fond uranium supérieur à 3 eppm.	31
Illustration 8 : Liste des communes présentant au moins une anomalie uranium et non répertoriées par la méthode des moyennes.	32
Illustration 9 : Liste des communes présentant à la fois des valeurs moyennes en uranium supérieures à 3 eppm et une ou des anomalies supérieures à 1 eppm.....	33
Illustration 10 : Résultats des analyses chimiques uranium sur roche en Basse-Normandie (extrait base D. Thiéblemont, BRGM).....	35
Illustration 11 : Exemple de diagraphie gamma-ray (forage à Saint-Sauveur-le-Vicomte).	37
Illustration 12 : Liste des communes traversées par les granites hercyniens (toutes situées dans le département de la Manche).	39
Illustration 13 : Liste des communes présentant des teneurs en radon mesurées dans les bâtiments supérieures à 1000 Bq/m ³	41
Illustration 14 : Liste des communes présentant un aléa radon lié aux mesures uranium aéroportées ou aux mesures radon dans les bâtiments en cas d'absence de mesure uranium.	44

Liste des annexes

Annexe 1 : Teneurs moyennes en uranium des formations géologiques couvertes par le levé aérospectrométrique.....	51
Annexe 2 : Diagraphies gamma-ray sur forages	59
Annexe 3 : Liste des communes présentant une anomalie uranium.....	65
Annexe 4 : Illustration de la variabilité des mesures radon (ex. commune d'Alençon)	73

Cartes et planches hors texte

Carte 1 – Levé aérospectrométrique du Massif Armoricaïn (1998)

Carte 2 – Teneurs en uranium mesurées par le levé aérospectrométrique

Carte 3 – Teneur moyenne en uranium par formation géologique sur la zone couverte par le levé aérospectrométrique

Carte 4 – Teneur moyenne en uranium par formation géologique étendue sur l'ensemble de la Basse-Normandie à partir des valeurs calculées sur la zone couverte par le levé aérospectrométrique

Carte 5 – Densité de failles par commune calculée à partir des cartes géologiques au 1/50 000

Carte 6 – Teneur moyenne en uranium par commune calculée à partir des teneurs des formations géologiques étendues avec un seuil d'au moins 70% de surface de la commune par des formations à teneur connue

Carte 7 – Potentiel uranium et densité des failles par commune

Carte 8 – Communes présentant des anomalies uranium

Carte 9 – Valeur maximum de radon mesurée par commune (en Bq/m³)

Carte 10 – Scores d'aléa radon calculés par commune à partir des teneurs moyennes en U des formations géologiques (si U valorisé) ou des valeurs maxi en radon (si pas de mesure U)

Carte 11 – Aléa radon calculé par commune à partir des teneurs moyennes en U des formations géologiques et des valeurs maxi en radon hiérarchisé par la densité des failles géologiques

Carte 12 – Aléa radon calculé par commune à partir des teneurs moyennes en U des formations géologiques et des valeurs maxi en radon hiérarchisé par la densité des failles géologiques. Report des indices miniers et des diagraphies en sondages extraits de la BSS

Planche 1 - Carte des teneurs moyennes en uranium par formation géologique et des failles de la carte géologique au 1/50 000

Planche 2 - Aléa radon associé au potentiel uranium géologique + densité de failles par commune. Report des indications ponctuelles d'indices et de forages avec diagraphies issues de la BSS

1. Cadre du projet

1.1. CONTEXTE

Le radon est un gaz radioactif naturel généré dans le sous-sol par désintégration du radium, lui-même produit par désintégration de l'uranium. Il provient surtout des sous-sols granitiques et volcaniques.

Ce gaz invisible et sans odeur peut s'accumuler dans l'atmosphère confinée de certains bâtiments et atteindre des concentrations dangereuses pour la santé (risque de développer un cancer du poumon).

Depuis 1982, des campagnes de mesure ont été menées par l'IPSN (Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire) et la DGS (Direction Générale de la Santé).

Une circulaire 99-46 du 27 janvier 1999 a défini les actions que devaient conduire les services de l'Etat pour assurer la gestion du risque radon : 27 départements sensibles ont été identifiés pour lesquels des campagnes de mesures systématiques de concentration en radon doivent être réalisées dans les établissements recevant du public ou ERP. Pour les autres départements, une cartographie préalable du risque doit être entreprise, avec l'aide, en particulier du BRGM.

Mais le choix des 27 départements apparaît discutable, en particulier en ce qui concerne la Basse-Normandie : le Calvados retenu, mais pas la Manche ni l'Orne.

Dans ce cadre, la DRASS de Basse-Normandie a demandé au BRGM d'établir une cartographie de l'aléa radon naturel à partir des données géologiques disponibles pour l'ensemble de cette région (convention signée le 17 novembre 2005).

1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le travail envisagé consiste à faire une carte de l'aléa radon naturel de la région en fonction de la nature du sous-sol.

Pour cela, le premier point a été de superposer les teneurs en uranium issues du levé aérospectrométrique du Massif armoricain (1998) aux données des cartes géologiques numérisées pour localiser les formations géologiques à risque.

Mais le levé aérospectrométrique disponible ne couvre qu'une partie de la région Basse-Normandie. Sur cette zone, le BRGM a tenté d'établir une corrélation entre nature des formations et leur teneur en uranium puis d'étendre cette corrélation à l'ensemble de la région.

La définition des zones à risque a été ensuite précisée en prenant en compte les indices minéralisés en uranium, les diagraphies gamma-ray des forages d'eau et surtout les mesures de radon déjà effectuées dans les bâtiments.

1.3. DONNEES DE BASE

Les données disponibles sont les suivantes :

- Cartes géologiques départementales harmonisées à 1/50 000 de l'Orne et du Calvados.
- Parties harmonisées et numérisées de la future carte géologique départementale de la Manche et esquisse de la carte de Sainte-Mère Eglise (en fin de levé).
- Partie du levé aérospectrométrique du Massif armoricain (1998) concernant la Basse-Normandie.
- Données gamma-ray des sondages d'eau stockés dans la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM.
- Indices minéralisés et analyses chimiques concernant l'uranium (base BRGM).
- Teneurs en radon mesurées dans les bâtiments (données DRASS).

2. Généralités sur le radon

2.1. RAPPEL CONCERNANT LA RADIOACTIVITE

La radioactivité est l'ajustement du noyau d'un atome d'un état instable (radionucléide ou radioisotope) vers un état stable avec émission d'énergie radioactive sous trois formes :

- **Radiations alpha :**

Une radiation alpha correspond à un noyau d'hélium (deux neutrons et deux protons) accompagné de la libération d'une quantité donnée d'énergie. Cette particule a une masse et une charge qui interagissent facilement avec la matière. Elles sont arrêtées par quelques cm d'air ou quelques micromètres de matière solide.

- **Radiations bêta :**

Les radiations bêta sont comparables au niveau de la masse et de l'énergie aux électrons, mais peuvent avoir une charge négative ou positive (la désintégration bêta correspond à la transformation d'un neutron en proton). Les particules bêta sont bien plus petites que les particules alpha et peuvent voyager jusqu'à 1 m dans l'air. Une feuille de métal (papier aluminium par exemple) les arrête.

- **Radiations gamma :**

Les radiations alpha et bêta laissent les nouveaux noyaux dans un état excité qui est réduit par une autre émission d'énergie libérée sous forme de rayonnement gamma. Il s'agit d'une radiation électromagnétique sans charge ni masse (photons de haute énergie) à fort potentiel de pénétration (50 cm dans les sols et roches et des centaines de m dans les airs).

Les principaux éléments radioactifs naturels ont été créés lors de la synthèse originelle de l'univers et incluent le potassium 40, le thorium 232, l'uranium 238 et l'uranium 235. Leur demi-vie, de l'ordre du milliard d'années, leur permet d'être encore présents dans les roches.

La série de décroissance de l'uranium 238 est présentée à titre d'exemple sur l'illustration 1.

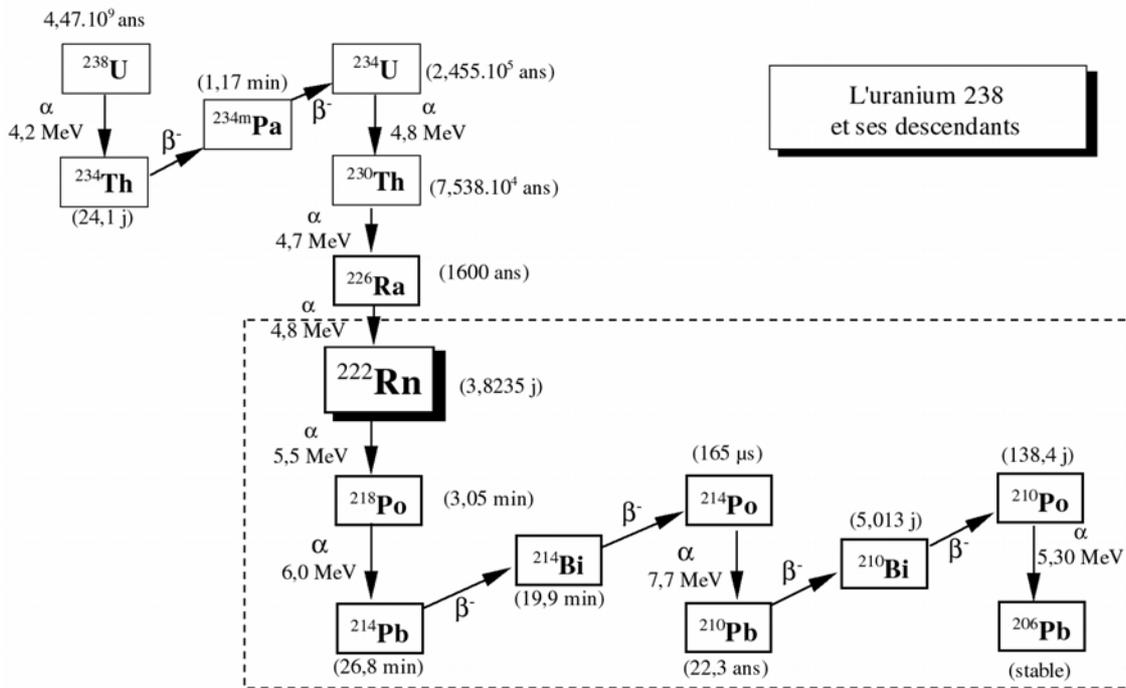


Illustration 1 : Chaîne de désintégration de l'uranium 238 (d'après M.C. Robé, IRSN).

2.2. ORIGINE DU RADON

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle inodore et incolore. Il provient de la désintégration du radium, lui-même issu de la désintégration de l'uranium et du thorium contenus dans la croûte terrestre.

Sa concentration varie selon la nature géologique du sol. Il émane surtout des sous-sols granitiques et volcaniques.

Il se diffuse dans l'air à partir du sol ou de l'eau où il peut-être dissous. A l'air libre, sa concentration est faible et il est dilué par les vents. Mais dans l'atmosphère confinée d'un bâtiment (cave par exemple), il peut atteindre des concentrations élevées.

Cet élément possède trois isotopes naturels (radon 219, radon 220, radon 222) descendant respectivement des radioéléments uranium 235, thorium 232 et uranium 238. Leurs abondances respectives sont fonction de la teneur des parents dans le sous-sol et de leurs périodes radioactives.

Le radon 222 issu de la désintégration de l'uranium 238 est l'isotope le plus présent dans l'atmosphère à cause de sa période radioactive suffisamment longue (3,8 jours) pour lui permettre de migrer à l'air libre (Illustration 1).

2.3. RADON ET SANTE

Le radon est un facteur de risque du cancer du poumon. Le radon pénètre dans les poumons avec l'air respiré mais ne reste que quelques secondes dans les voies respiratoires.

En revanche, les descendants solides se déposent dans les poumons et émettent des rayonnements alpha qui irradient les cellules les plus sensibles des bronches (Illustration 1). Ce phénomène peut induire le développement d'un cancer.

Le radon est considéré comme la deuxième cause de cancer du poumon après le tabac (l'association tabac - radon augmente considérablement le risque).

L'Organisation Mondiale de la Santé estime que 1000 à 6000 décès par an pourraient être attribuables à l'exposition au radon en France.

La concentration en radon dans les bâtiments varie en fonction de l'ouverture des portes et fenêtres tout au long de la journée (concentrations plus élevées entre 0 et 9 h) ainsi qu'au cours de l'année (concentrations plus élevées en hiver). Elle varie aussi en fonction des caractéristiques de la construction. Dans les endroits clos (sous-sol, vide sanitaire), le radon peut se concentrer et entrer dans les maisons par les fissures, les passages de canalisation, etc.

Le Becquerel par mètre cube (Bq/m³) est l'unité de mesure de la concentration du radon dans l'air. Il équivaut à une désintégration d'un atome de radon par seconde.

La mesure est effectuée à l'aide d'un dosimètre. Les particules alpha émises par le radon heurtent le film du dosimètre et on compte les impacts sur ce film (durée minimale de l'exposition : deux mois).

En l'état actuel des connaissances, les pouvoirs publics ont fixé le seuil d'alerte à 1000 Bq/m³ et le seuil de précaution à 400 Bq/m³ :

- en dessous de 400 Bq/m³, la situation ne justifie pas d'action correctrice (aération et ventilation sont toutefois conseillées),
- entre 400 et 1000 Bq/m³, il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples,
- au-delà de 1000 Bq/m³, des actions correctives, éventuellement d'envergure, doivent être conduites.

Les techniques de réduction de la concentration en radon des bâtiments consistent en :

- assurer l'étanchéité des sous-sols, des vides sanitaires, des murs, planchers et passages de canalisation,
- ventiler le sol sous le bâtiment et les vides sanitaires,
- aérer les pièces en mettant en place un système de ventilation mécanique.

3. Cadre géologique

La région Basse-Normandie est en partie constituée par les assises d'un socle ancien (Protérozoïque et Paléozoïque, soit environ 600 à 300 Ma²) appartenant au Massif armoricain. Ces terrains concernent un peu plus de la moitié du territoire régional dont ils constituent la partie armoricaine et bocagère.

L'autre moitié, dans la partie orientale, est composée par une couverture sédimentaire mésozoïque (ère secondaire, 200-60 Ma) et localement cénozoïque (ère tertiaire, 60-5 Ma et quaternaire). Ces assises constituent la frange ouest du bassin de Paris. Le socle armoricain est alors surmonté en discordance par ces dépôts de couverture et s'ennoie de plus en plus profondément vers l'est.

Le sous-sol de cette région présente une géologie très variée en particulier du point de vue de la nature (nombreuses lithologies) et de l'origine des roches (sédimentaires, volcaniques, métamorphiques) et de l'âge des terrains (Illustration 2).

² Ma = Million d'années.

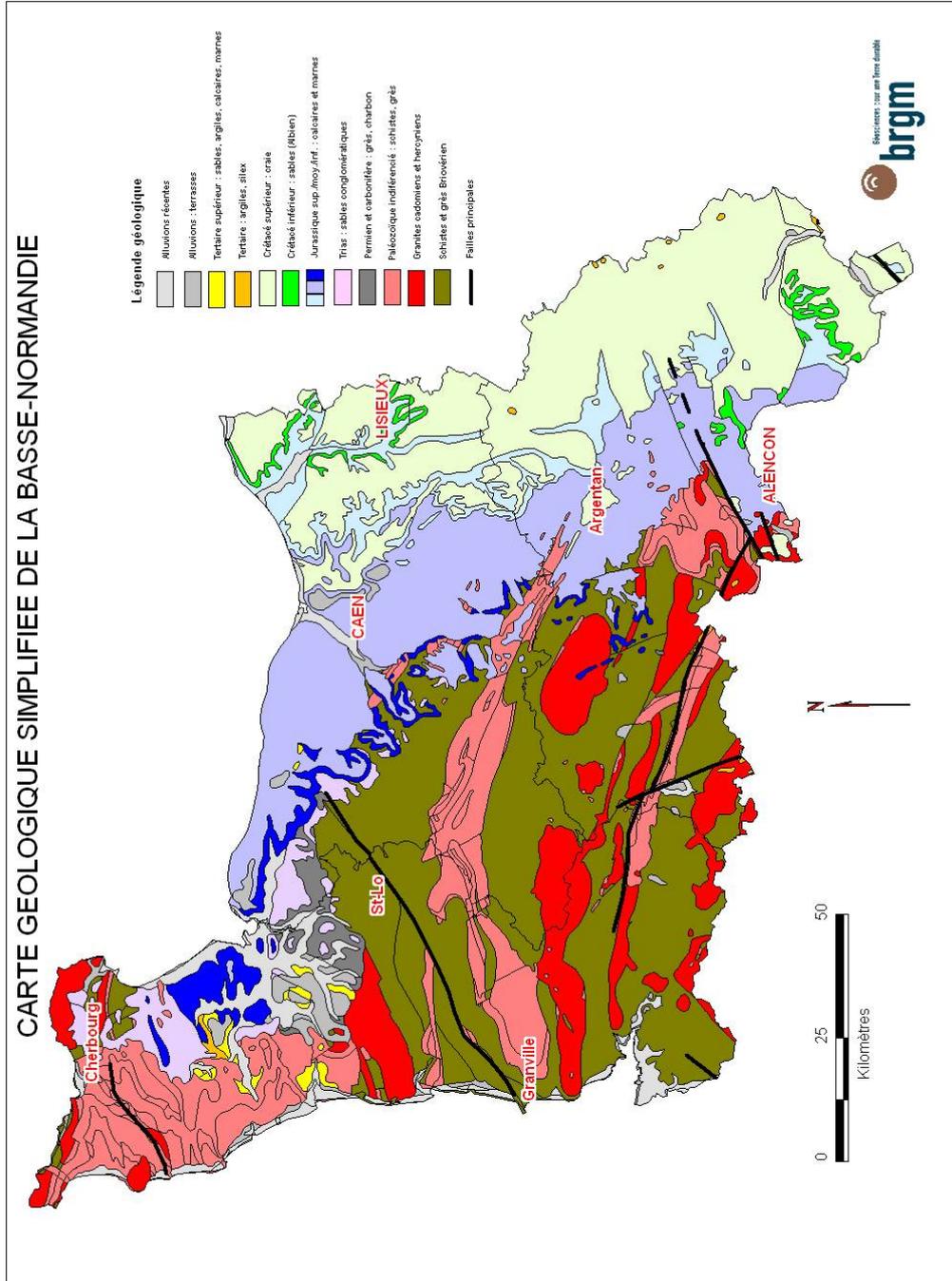


Illustration 2 : Carte géologique simplifiée de la Basse-Normandie.

3.1. FORMATIONS PROTEROZOIQUES ET PALEOZOIQUES

Anecdotiques en quantité mais d'intérêt géologique remarquable (ce sont les rares vestiges de cet âge en France), les terrains les plus anciens de Normandie et de France, se rencontrent à la Pointe de la Hague. Ils sont essentiellement constitués de gneiss et d'amphibolites : vestiges de la plus vieille chaîne de montagne connue en France, la chaîne icartienne (2000 Ma).

En revanche, le sous-sol du tiers occidental de la région est principalement composé de schistes et grès du Briovérien. Ces dépôts sédimentaires se sont mis en place avant 600 Ma environ, au fond d'un océan.

Ces formations antécambriennes ont été plissées lors de la phase orogénique cadomienne (entre 600 et 540 millions d'années). C'est à la fin de la constitution de cette chaîne de montagnes que se sont mises en place des roches plutoniques (granodiorites) au sein de ces formations anciennes. Le métamorphisme de contact, résultant de l'intrusion de ces roches, a entraîné l'apparition autour des massifs, d'auréoles de roches particulièrement résistantes (cornéennes). Les massifs granodioritiques anciens sont principalement les massifs d'Avranches-Mortain, de Vire, d'Athis, de Coutances et de la Hague.

Cette chaîne de montagne est décapée lorsque les premiers dépôts du Cambrien du cycle sédimentaire suivant (Paléozoïque inférieur) se mettent en place, à partir de 540 Ma.

Superposés de façon discordante aux roches briovériennes, les terrains du Paléozoïque sont composés de poudingues, de schistes et de grès (Grès armoricain) et de quelques formations calcaires. Ces terrains sont structurés en grands synclinaux d'axe approximativement WNW-ESE. Dans ces synclinaux, les niveaux inférieurs, datés du Cambrien et de l'Ordovicien, ont fait l'objet d'intenses exploitations de minerai de fer (May-sur-Orne, Soumont-Saint-Quentin, Saint-Rémy-sur-Orne). Il existe au sein de ces séries très homogènes des coulées de laves acides (rhyolithes).

Le Cotentin, qui représentait déjà un domaine structural particulier lors de l'orogénèse cadomienne, (dans le prolongement vers le NE des failles majeure de la baie de Saint-Brieuc) continue à s'individualiser.

Ces formations primaires ont été plissées lors de la phase orogénique varisque (ou hercynienne, entre 360 et 300 millions d'années). En relation avec cette orogénèse, quelques massifs de granite se sont mis en place vers la fin de l'ère primaire au nord du Cotentin (granites de Flamanville et de Barfleur).

Après les phases principales de l'orogène varisque, se déposent d'abord des unités riches en charbon (bassin de Littry) puis viennent les couches permienues constituées d'argiles et sables rouges (sédimentation détritique). Ces dernières affleurent à l'ouest du bassin de Carentan et surtout au sud de la ville.

3.2. FORMATIONS DU TRIAS ET DU JURASSIQUE

Ce deuxième ensemble qui constitue une bande orientée nord-ouest/sud-est, regroupe les formations du Trias, du Jurassique inférieur ainsi que les premiers termes du Jurassique moyen.

Les dépôts du Trias correspondent à des formations fluviales composées d'argiles et de conglomérats plus ou moins indurés. Les constituants de ces dépôts proviennent du démantèlement des montagnes hercyniennes et de leur soubassement cadomien.

Le Jurassique inférieur est composé de formations calcaires (Sinémurien, Hettangien dans le Cotentin puis Toarcien, Aalénien) qui n'affleurent que très peu, les formations marno-calcaires du Jurassique moyen (Bajocien-Bathonien) les recouvrant presque toujours.

Ce sont ces calcaires du Jurassique moyen (« type Pierre de Caen ») qui forment les plaines d'Alençon, d'Argentan et de Caen. Le Bajocien calcaire qui affleure surtout plus au nord-ouest, dans le Bessin, est riche en fossiles d'os de poissons (fragments de phosphate sous forme d'apatite en général) et fluor associé. Le Bathonien, plus exclusivement carbonaté, continue la plateforme de la campagne de Caen et de ses extensions vers le sud.

Plus à l'est, les marnes et argiles calloviennes, oxfordiennes et kimméridgiennes (Jurassique moyen et supérieur) déterminent des paysages aux reliefs mous, généralement humides du fait de leur imperméabilité (Pays d'Auge).

3.3. FORMATIONS DU CRETACE

Sur la bordure orientale de la Basse-Normandie, la présence d'une cuesta marque morphologiquement le passage des terrains argileux du Jurassique supérieur aux assises crétacées.

Les terrains du Crétacé sont composés, à la base, de couches de sables quartzeux riches en glauconie (Sables du Maine, Sables du Perche) surmontées par des craies glauconieuses. Ces craies glauconieuses passent vers leur sommet, à des dépôts de plus en plus carbonatés représentés par la craie blanche à silex qui affleure le long des versants de vallées. Ces niveaux de craie blanche, plus ou moins riches en silex, s'épaississent vers l'est de la région, sous les plateaux du Lieuvin ou du Roumois.

3.4. FORMATIONS TERTIAIRES ET QUATERNAIRES

Une des particularités remarquables de la géologie de la Basse-Normandie est constituée par les dépôts du « seuil du Cotentin ». Cette dépression partiellement occupée par les marais de Carentan, est en fait un ensemble de « pièges sédimentaires » très particulier qui a fonctionné à différents moments de l'histoire géologique de la région depuis plus de 180 Ma et en particulier pendant le Tertiaire.

On compte quatre bassins tertiaires connus sur le territoire du département de la Manche : Sainteny-Marchésieux (le plus grand), Lessay, Saint-Sauveur-le-Vicomte et le Merderet. Ces « bassins d'effondrement » associent des formations triasiques (argiles, sables grès, poudingues et conglomérats), crétacées, éocènes (faluns et calcaires), miocènes (calcaires, marnes et faluns) et plio-quatérnaires (faluns, sables et graviers). L'ensemble de ces dépôts est le plus souvent recouvert de dépôts quaternaires plus récents (alluvions anciennes ou modernes, loess, altérites fluées), ce qui a toujours rendu difficile leur compréhension.

Ces bassins sont associés à des failles qui jouent lors de paroxysmes tectoniques. Leur dernier rejeu notable serait récent, au cours du Pléistocène, il y a moins de 2,4 Ma.

C'est aussi au Tertiaire que se développe un important manteau d'altérites sur toute la région. On en perçoit les traces sous deux formes principales :

- A l'ouest, ce sont les arènes des granites et granodiorites qui marquent la racine de ces sols « latéritiques ». On constate que les schistes ou les grès ont aussi été intensément altérés, avec localement kaolinisation.
- A l'est, l'ensemble de la zone crayeuse est recouvert d'altérites à silex qui passent de quelques mètres en bordure de cuesta à l'ouest, à plus de 15-20 m vers l'est.

Enfin, les formations quaternaires sont représentées par quatre grands ensembles de formations superficielles :

- les dépôts de versant (« head », « presles », « grèze » etc.) issus des périodes de climats froids et humides lors des glaciations quaternaires qui couvrent les versants,
- les alluvions grossières, souvent étagées qui traduisent le régime des rivières lors des périodes glaciaires,
- les dépôts vaseux de l'interglaciaire actuel (alluvions fines des fonds de vallées, slikke et schorre des marais d'estuaire ou de plateforme littorale),
- les sédiments d'origine éoliennes (sables dunaires holocènes et surtout loess du Pléistocène supérieur),

Si les sables dunaires sont limités aux plages sableuses et au champ fossile de Vauville (Nord Cotentin), les lœss (silts éoliens) sont abondants. Ils couvrent de grandes étendues. Ils sont allochtones sur toute la façade littorale des côtes de la Manche. Leur épaisseur et leur granulométrie diminuent avec l'éloignement du trait de côte. Ils deviennent de plus en plus autochtones, issus du soufflage des altérites et de lœss plus anciens, à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

Les alluvions grossières sont composées de fragments des roches qui constituent leur bassin versant. La dynamique périglaciaire qui a permis leur transit se traduit aussi par un tri dans la lithologie des galets : ce sont les roches les plus dures de la région (filons de quartz, grès, cornéennes, phanites...) qui forment le plus souvent les galets les plus grossiers, la matrice étant généralement composée de quartz provenant soit des arènes de granites (s.l.), soit des sables du Crétacé.

Les alluvions fines et waddens associés proviennent du ruissellement sur les dépôts affleurant à la fin du Pléistocène (fin de la dernière glaciation) : ce sont généralement des dépôts de granulométrie fine à très fines (silts fins à argiles).

3.5. DONNEES STRUCTURALES

Le bâti structural de la région est initialement déterminé lors de l'orogénèse cadomienne qui donne des orientations N30-N70 aux grandes unités qui affectent le Cotentin jusqu'à l'accident majeur qui passe à Granville et se prolonge vers Bayeux.

Au nord, dans la péninsule, plusieurs accidents de ce type, subparallèles, (sud-ouest /nord-est), morcellent ce socle. Au sud, les schistes et granodiorites du bocage normand sont orientés selon un axe ouest-est (N90).

Lors de l'orogénèse hercynienne, les synclinaux sont structurés selon deux axes principaux de plissement et de failles, l'un dit « varisque » (SW-NE – approximativement N30 à N60) et l'autre dit « armoricain » (WNW-ESE, soit approximativement N110 à N130).

Ces structures sont recoupées par une phase en distension qui permet la mise en place de filons de dolérites et de quartz le long de fractures subméridiennes d'âge dévonien à carbonifère possible (LE GALL J., 1999 ; VERNHET Y. et CHEVREMONT P., 1997).

Au début du Mésozoïque, la base du Cotentin reste une région particulière en subsidence qui permet aux premiers dépôts du Lias (Hettangien et Sinémurien) de se mettre en place. La forme générale de cette zone traduit le jeu des fractures mises en place précédemment.

Si pendant le Mésozoïque existent des mouvements tectoniques réactivant des failles, c'est au cours du Cénozoïque que vont s'acquérir les derniers éléments des structures majeures de la région.

Ainsi, à l'Eocène, la compression pyrénéenne venant du sud détermine des plissements à grand rayon de courbure associés au rejeu des accidents anciens, hercyniens le plus souvent. La compression alpine, plus récente (depuis la fin du Miocène), se traduit aussi par le rejeu d'accidents anciens.

Entre ces deux phases de compression, l'Oligocène est une période de distension. C'est dans cette succession Eocène compressif – Oligocène distensif que rejouent les failles qui vont créer des petits pièges à remplissage lacustre, comme celui de Céaucé près de Domfront ou ceux du seuil du Cotentin où des dépôts éocènes sont aussi connus.

Enfin, au Plio-Quaternaire, sur un substrat en compression généralisée d'orientation N-S à NW-SE, le seuil du Cotentin fonctionne en blocs subsidents. Il est alors généré des « bassins » à remplissage épais (plus de 160 m pour le bassin de Marchésieux) limités par des failles soulignant le rejeu d'accidents profonds et hérités.

Du fait du peu de données disponibles sur cet aspect, il faut rester très prudent sur la nature ouverte ou fermée des failles que l'on peut déduire de cette analyse régionale. A l'échelle de la région, on peut penser que les accidents proches d'un axe EW sont en compression et plutôt en relation avec des failles et diaclases fermées alors que les failles perpendiculaires (NS ou NE/SW) pourraient présenter des fissures ouvertes.

Enfin, il est vraisemblable que les failles qui affectent le seuil du Cotentin et les petits bassins « tertiaires » plus au nord sont vraisemblablement des failles partiellement ouvertes actuellement.

4. Description des travaux

Le travail de base consiste à superposer les teneurs en uranium issues du levé aérospectrométrique du Massif armoricain (1998) aux données des cartes géologiques numérisées pour localiser les formations géologiques à aléa radon.

Mais le levé aérospectrométrique ne couvre qu'une partie de la région Basse-Normandie. Sur cette partie, nous avons calculé les teneurs moyennes en uranium de chaque formation puis nous avons étendu cette valeur moyenne à l'ensemble des formations du même type sur la région.

Le fond géologique utilisé pour cette étude est constitué par les cartes géologiques départementales issues de l'harmonisation des cartes géologiques à 1/50 000 levées par le BRGM.

Les cartes géologiques numérisées du Calvados et de l'Orne sont disponibles. En ce qui concerne la Manche, nous avons synthétisé dans le cadre de ce travail, les différents documents disponibles pour esquisser une première carte numérisée de ce département (voir chapitre 1.3).

4.1. UTILISATION DU LEVE AEROSPECTROMETRIQUE DU MASSIF ARMORICAIN

Des données radiométriques aéroportées de haute sensibilité ont été acquises lors du levé géophysique « Massif armoricain » réalisé en 1998 pour le compte du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. L'acquisition et la compilation des mesures ont été réalisées par la compagnie Sander sous la supervision du BRGM. L'ensemble des données techniques et résultats sont décrits dans le rapport BRGM R40471 (*Bonijoly et al.*, 1999).

4.1.1. Description du levé aérospectrométrique du Massif armoricain

Les mesures ont été effectuées selon des lignes de vol orientées nord-sud espacées de 1000 m recoupées par des traverses perpendiculaires espacées de 10 km

Les mesures ont été effectuées avec une garde au sol moyenne de 120 m. La radioactivité naturelle a été enregistrée avec un spectromètre gamma à 256 canaux, corrigée du bruit atmosphérique « radon », du bruit de fond, de l'effet Compton et de l'atténuation altimétrique.

Pour la cartographie géologique, les pics suivants sont considérés : pics K40 pour le potassium), Bi214 pour l'uranium et Tl208 pour le thorium.

En effet, ni l'uranium 238, ni le thorium 232, ne sont des émetteurs gamma directs, seuls certains de leurs produits de désintégration décroissent par émission gamma et en particulier Bi214 et Tl208.

Les mesures sont effectuées sur les raies de ces deux éléments. En supposant les chaînes de désintégration à l'équilibre, un rapport de proportionnalité est appliqué entre le radionucléide détecté et le radionucléide parent pour calculer les concentrations en uranium et thorium.

Celles-ci sont notées eU et eTh (e pour équivalent) pour tenir compte du fait que ce sont les produits de la chaîne de désintégration qui sont mesurés.

Durant le vol, le spectre de rayonnement gamma est enregistré chaque seconde sous la forme d'un histogramme caractérisant le comptage relatif de chaque niveau d'énergie entre 0 et 3 MeV (Illustration 3). Ce spectre est représentatif de la partie superficielle des formations géologiques affleurantes (profondeur inférieure à 1 m).

Lors du traitement des données, les comptages des radioéléments sont cumulés puis convertis en concentration élémentaire (%) pour le potassium et en teneur équivalente (ppm) pour l'uranium et le thorium, le comptage total étant exprimé en unité de dose absorbé (nanogray /heure).

La teneur équivalente en uranium est obtenue par l'intermédiaire de la concentration en Bi214 moyennant l'hypothèse que cette concentration est représentative de la totalité de l'uranium présente initialement. Mais la chaîne de désintégration de cet élément produit des isotopes intermédiaires dont la dispersion ou la concentration peut fausser le calcul des teneurs équivalentes (gaz radon pouvant diffuser dans l'atmosphère ou être piégé dans les fonds de vallée).

Cette teneur équivalente en uranium est aussi représentative de la teneur en radon 222 du sol, situé en position intermédiaire entre Bi214 et U238 comme le montre la chaîne de désintégration de cet isotope de l'uranium (Illustration 1)

Les données radiométriques mesurées ont ensuite été interpolées aux nœuds d'une grille de 125m de côté par la méthode du minimum de courbure (Cartes 1 et 2 hors texte).

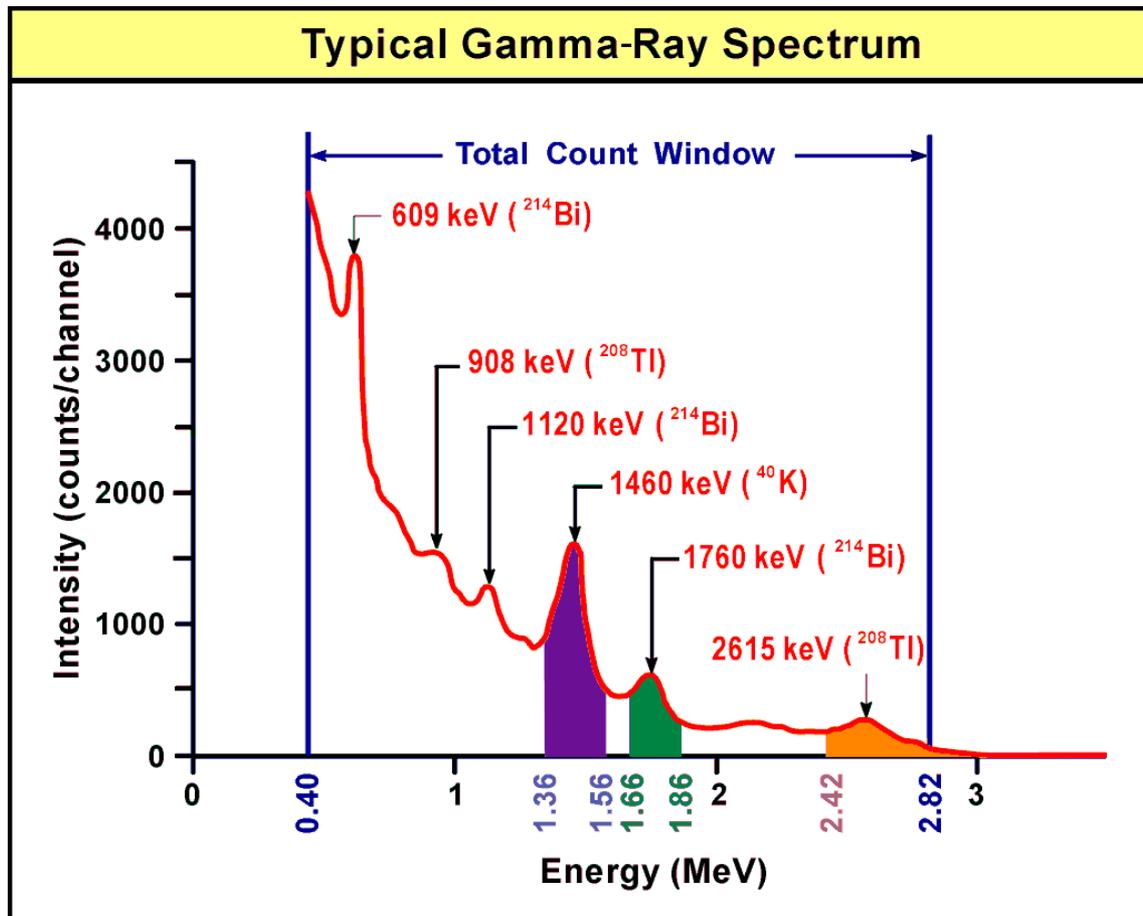


Illustration 3 : Exemple de spectre de rayonnement gamma (extrait du site internet "Ressources Naturelles Canada").

4.1.2. Cartographie de l'aléa radon en Basse-Normandie à partir du levé aérospectrométrique

Le radon étant principalement issu de l'uranium par la chaîne de désintégration de ce dernier, mesurer la teneur en uranium donne une indication sur le potentiel radon des formations géologiques survolées.

Méthodologie utilisée

Pour le cas de la Basse-Normandie, le levé aérospectrométrique du Massif armoricain (carte 1) ne couvre qu'environ un tiers de la surface de la région : la partie centrale de l'Orne, la zone Caen - Falaise pour le Calvados, la bordure sud de la Manche (carte 2 hors texte).

Cette information partielle nous a conduits à travailler en plusieurs étapes afin de produire un résultat intéressant une surface plus importante :

1. Calcul de la teneur moyenne en uranium des communes situées à l'aplomb du levé aérospectrométrique.
2. Calcul de la teneur moyenne en uranium des formations géologiques situées à l'aplomb du levé aérospectrométrique (carte 3 hors texte).
3. Extension de ces teneurs moyennes à l'ensemble des formations géologiques similaires rencontrées sur la surface de Basse-Normandie (carte 4 hors texte et planche 1 hors texte).
4. Calcul d'une teneur moyenne en U pour les communes ayant au moins 70% de leur surface couverte par des formations géologiques à teneur en U estimée.
5. Comparaison des valeurs obtenues à l'issue des calculs 1 et 4 et extraction de la valeur la plus forte (carte 6 hors texte).
6. Prise en compte des failles (cartes 5 et 7 hors texte).

Calcul des teneurs moyennes en uranium des formations géologiques

Les teneurs en uranium mesurées au cours du levé aérospectrométrique réalisé en Basse-Normandie sont généralement basses.

La teneur moyenne des différentes formations géologiques est généralement inférieure à 3 eppm (formations considérées comme non anormales lors de l'étude sur la région des Pays de la Loire).

Seules quelques formations présentent des teneurs moyennes supérieures à 3 eppm :

Nombre de polygones	Uranium moyen par formation (eppm)	Description	Surf/km2
4	5.49	horizon calcaire indifférencié dans la formation k2 (Cambrien)	0.036
219	3.26	Calcaires à spongiaires de Fresné-la-Mâre, Falaise (Jurassique)	80.768
48	3.21	Grès à <i>Platyorthis monnieri</i> (Dévonien)	121.103
1	3.09	Schistes d'Urville (ou du Pissot) métamorphisés: schistes à andalousite	0.740
1	3.09	Calcaires bioclastiques (zone à <i>Humphriesanum</i> et <i>Nortiense</i>)	0.052
607	3.05	Siltites et argilites lustrées (Briovérien inférieur)	175.269
14	3.05	Argiles blanches et calcaires à oolites ferrugineuses	3.034
134	3.04	Argiles à poissons, Calcaires à ammonites (Jurassique)	19.254
1	3.02	Grès armoricain métamorphisé (Ordovicien)	0.038

Illustration 4 : Formations géologiques à teneur en uranium supérieure à 3 eppm

Parmi ces formations, on peut noter :

- Des niveaux calcaires dans la formation des schistes et calcaires du Cambrien (k2) à teneur moyenne de 5.49 ppm mais d'extension très faible.
- Seules les formations des grès à *Platyorthis*, des calcaires à spongiaires, des schistes lustrés du Briovérien et des Argiles à poissons couvrent des surfaces significatives.

L'ensemble des valeurs moyennes par formation est présentée dans l'Annexe 1. On peut noter que les granodiorites cadomiennes présentent des teneurs moyennes faibles, de l'ordre de 2.5 eppm.

Dans ce contexte, les loess et limons présentent des valeurs relativement élevées, entre 2.6 et 2.7 eppm.

L'extension des teneurs en uranium par formation à l'ensemble de la région Basse-Normandie se heurte au fait que certaines formations ne sont pas répertoriées dans la zone de prospection aéroportée et ne peuvent donc être affectées d'une teneur en uranium (carte 4 hors texte). D'autre part, on a fait abstraction d'éventuelles variations latérales dans les formations au-delà de la zone du levé qui pourraient conduire à des modifications dans la teneur en uranium de ces formations.

Calcul des teneurs moyennes en uranium des communes

Deux cas de figures sont présents en Basse-Normandie :

- si la commune est couverte par le levé aéro-spectrométrique, on peut directement calculer sa teneur moyenne en uranium ;
- si la commune est située sur une (ou des) formation(s) géologique(s) à teneur connue, on peut aussi estimer une teneur moyenne pour la commune, à condition que les formations géologiques à teneur connue couvrent une forte proportion de la surface de la commune. Pour cette étude, nous avons retenu le seuil d'au moins 70% de surface couverte.

Les résultats sont présentés sur la carte 5 hors texte et l'illustration 5 qui montrent un groupement de communes à plus fortes teneurs moyennes dans la région de Falaise.

Commune	INSEE	Uranium moyen	Radon maximum	Département
DEPARTEMENT DU CALVADOS				
ERAINES	14244	4.55		14
VILLY-LEZ-FALAISE	14759	4.12		14
PERTHEVILLE-NERS	14498	3.87		14
FOURCHES	14283	3.76		14
FRESNE-LA-MÈRE	14289	3.74	101	14
MAY-SUR-ORNE	14408	3.37	174	14
FEUGUEROLLES-BULLY	14266	3.33	244	14
BEAUMAIS	14053	3.27		14
FALAISE	14258	3.14	213	14
LAIZE-LA-VILLE	14349	3.12		14
MARTIGNY-SUR-L'ANTE	14405	3.11	110	14
SAINT-REMY	14656	3.09		14
LE VEY	14741	3.06		14
COULONCES	14187	3.02	79	14
SAINT-PIERRE-DU-BU	14649	3.01	18	14
DEPARTEMENT DE LA MANCHE				
BAUDREVILLE	50035	3.17		50
MONTGARDON	50343	3.16		50
CANVILLE-LA-ROCQUE	50097	3.05		50
SAINT-REMY-DES-LANDES	50544	3.04		50
SAINT-GEORGES-MONTCOCQ	50475	3.00	266	50
SAINT-MAURICE-EN-COTENTIN	50522	3.00		50

Commune	INSEE	Uranium moyen	Radon maximum	Département
DEPARTEMENT DE L'ORNE				
MERRI	61276	3.44		61
SAINT-HILAIRE-LA-GERARD	61403	3.37		61
GUEPREI	61197	3.33	201	61
OMMOY	61316	3.28		61
CUISSAI	61141	3.21	69	61
HABLOVILLE	61199	3.16		61
COLOMBIERS	61111	3.10		61
VALFRAMBERT	61497	3.10	70	61
CHAMPCERIE	61084	3.03		61
FONTENAI-SUR-ORNE	61173	3.02		61
RI	61349	3.01		61

Illustration 5 : Communes présentant des teneurs en uranium supérieures à 3 eppm.

Prise en compte des failles

Les failles sont connues pour favoriser l'émission du gaz radon car elles constituent des drains et des voies de circulation préférentielle des fluides. A teneur en uranium équivalente, on peut supposer que l'aléa radon sera plus fort dans les zones faillées.

En utilisant la fonction calcul de densité d'ArcView[®] on a pu estimer une densité de failles par commune, à partir de l'ensemble des failles dessinées sur les cartes géologiques harmonisées.

Le résultat de ce calcul est directement influencé par la cartographie des accidents qui n'est pas forcément homogène sur l'ensemble de la région. D'autre part, seuls les accidents majeurs sont représentés sur ces cartes.

Sur la carte 5 hors texte, on peut distinguer des zones intensément faillées autour de Coutances, à l'ouest de la Ferté-Macé, au sud d'Avranches et au nord de Vire.

La carte 7 montre le résultat de la combinaison des teneurs moyennes en U et de la densité de failles par commune.

Cette combinaison a été faite par la somme des scores attribués à chaque paramètre avec les règles suivantes :

Valeur U moyen	Score U	Valeur densité de failles	Score Failles
Pas de mesure	0	Pas de faille	0
Compris entre 0 et 3	1	Densité entre 0 et 5	1
Compris entre 3 et 3.5	2	Densité entre 5 et 7.5	2
Supérieur à 3.5	3	Densité supérieure à 7.5	3

Illustration 6 : Scores affectés aux paramètres U moyen et densité de failles par commune.

Cette carte permet de hiérarchiser l'aléa radon et confirme un aléa fort pour les communes situées à proximité de Falaise ; la zone de Coutances, à forte densité de failles pourrait aussi présenter un risque mais l'absence de mesure uranium ne permet pas de l'affirmer.

Recherche d'anomalies uranium :

Une autre approche, possible seulement dans la zone couverte par le levé, permet aussi d'estimer un aléa radon associé à l'uranium. Cette méthode consiste à rechercher les anomalies uranium (calculées par différence entre la teneur mesurée lors du levé et la teneur moyenne de la formation géologique sous-jacente) situées sur des zones à teneur en uranium supérieures à 3 eppm.

L'ensemble des communes présentant au moins une anomalie uranium supérieure à 1 eppm sur plus de 4 pixels est présentée en annexe 3.

Celles présentant une anomalie uranium supérieure à 2 eppm (aléa plus significatif qu'une anomalie de 1 eppm) sur une surface supérieure à 2 pixels (environ 3 ha) sont listées dans l'illustration 7. Elles sont représentées sur la carte 8 hors texte.

Commune	INSEE	Radon maxi	Uranium moyen	DEPT
DEPARTEMENT DU CALVADOS				
BEAUMAIS	14053		3.27	14
CLECY	14162	81	2.74	14
CONDE-SUR-NOIREAU	14174	930	2.84	14
COSSESSEVILLE	14183		2.94	14
ERAINES	14244		4.55	14
FALAISE	14258	213	3.14	14
FEUGUEROLLES-BULLY	14266	244	3.33	14
FONTENAY-LE-MARMION	14277	114	2.89	14
FRESNE-LA-MERE	14289	101	3.74	14
FRESNEY-LE-PUCEUX	14290	462	2.84	14
LA HOGUETTE	14332		2.43	14
LE BO	14080		2.70	14
MAY-SUR-ORNE	14408	174	3.37	14
PERTHEVILLE-NERS	14498		3.87	14
PONT-D'OUILLY	14764	58	2.62	14
SAINT-PIERRE-CANIVET	14646		2.56	14
SAINT-REMY	14656		3.09	14
SOULANGY	14677	101	2.95	14
VAUDELOGES	14729	34	2.14	14
VILLY-LEZ-FALAISE	14759		4.12	14
DEPARTEMENT DE L'ORNE				
COLOMBIERS	61111		3.10	61
ECOUCHE	61153	110	2.48	61
FLEURE	61170		2.46	61
FONTENAI-SUR-ORNE	61173		3.02	61
GUEPREI	61197	201	3.33	61
LA FERRIERE-BECHET	61164		2.47	61
MACE	61240	25	2.69	61
MAGNY-LE-DESERT	61243	76	2.64	61
MERRI	61276		3.44	61
OMMOY	61316		3.28	61
SAINT-HILAIRE-LA-GERARD	61403		3.37	61
SAINT-PIERRE-DU-REGARD	61447	348	2.89	61
TANQUES	61479		2.52	61
VALFRAMBERT	61497	70	3.10	61

Illustration 7 : Liste des communes présentant au moins une anomalie uranium supérieure à 2 eppm avec un fond uranium supérieur à 3 eppm.

Cette méthode présente l'intérêt de souligner des zones potentiellement plus émissives sur une commune qui n'a pas nécessairement une teneur moyenne importante. Ces zones sont souvent très localisées et de faible superficie et ne sont donc pas extensibles à l'ensemble de la commune. Le plus souvent, l'origine de cette anomalie ponctuelle est inconnue.

Il est à noter qu'en dehors des communes ci-dessous, les autres communes repérées le sont déjà par la méthode précédente.

CLECY
CONDE-SUR-NOIREAU
COSESSEVILLE
FONTENAY-LE-MARMION
FRESNE-LA-MERE
FRESNEY-LE-PUCEUX
LA HOGUETTE
LE BO
PONT-D'OUILLY
SAINT-PIERRE-CANIVET
SOULANGY
VAUDELOGES
ECOUCHE
FLEURE
LA FERRIERE-BECHET
MACE
MAGNY-LE-DESERT
SAINT-PIERRE-DU-REGARD
TANQUES

Illustration 8 : Liste des communes présentant au moins une anomalie uranium et non répertoriées par la méthode des moyennes.

Les communes présentant à la fois une teneur moyenne en uranium supérieure à 3 eppm et une anomalie uranium supérieure à 1 eppm sont celles sur lesquelles des contrôles devraient être réalisés en priorité, au moins à l'aplomb des anomalies.

Commune	INSEE	Radon maximum	Uranium moyen	Dept
DEPARTEMENT DU CALVADOS				
BEAUMAIS	14053		3.27	14
COULONCES	14187	79	3.02	14
ERAINES	14244		4.55	14
FALAISE	14258	213	3.14	14
FEUGUEROLLES-BULLY	14266	244	3.33	14
FOURCHES	14283		3.76	14
FRESNE-LA-MERE	14289	101	3.74	14
LAIZE-LA-VILLE	14349		3.12	14
LE VEY	14741		3.06	14
MARTIGNY-SUR-L'ANTE	14405	110	3.11	14
MAY-SUR-ORNE	14408	174	3.37	14
PERTHEVILLE-NERS	14498		3.87	14
SAINT-PIERRE-DU-BU	14649	18	3.01	14
SAINT-REMY	14656		3.09	14
VILLY-LEZ-FALAISE	14759		4.12	14
DEPARTEMENT DE L'ORNE				
CHAMPCERIE	61084		3.03	61
COLOMBIERS	61111		3.1	61
CUISSAI	61141	69	3.21	61
FONTENAI-SUR-ORNE	61173		3.02	61
GUEPREI	61197	201	3.33	61
HABLOVILLE	61199		3.16	61
MERRI	61276		3.44	61
OMMOY	61316		3.28	61
RI	61349		3.01	61
SAINT-HILAIRE-LA-GERARD	61403		3.37	61
VALFRAMBERT	61497	70	3.1	61

Illustration 9 : Liste des communes présentant à la fois des valeurs moyennes en uranium supérieures à 3 eppm et une ou des anomalies supérieures à 1 eppm.

4.2. RECHERCHE D'ANALYSES CHIMIQUES URANIUM ET DE DIAGRAPHIES GAMMA-RAY

Nous avons recherché dans les bases de données BRGM les résultats d'analyses chimiques uranium et de diagraphies gamma-ray (exprimés en coups par seconde) de la région Basse-Normandie.

Une corrélation a été tentée entre ces données et les teneurs en uranium du levé aérospectrométrique. Malheureusement, le nombre d'analyses chimiques ou de diagraphies est insuffisant pour établir une corrélation valide.

4.2.1. Résultats d'analyses chimiques uranium

Une base Access des analyses chimiques sur roche totale a été entreprise au niveau national par D. Thiéblemont du BRGM (Illustration 10). La teneur en uranium de certaines roches a été analysée (analyses effectuées par différentes méthodes, activation neutronique et ICPMS...).

Pour chaque analyse, une localisation du prélèvement est indiquée en coordonnées Lambert 2 étendu ainsi que la formation géologique dont il provient. Cette localisation est souvent approximative. Pour la Basse-Normandie, on a trouvé 31 analyses de roche concentrées sur la partie sud de la région.

Nous avons tenté de comparer les teneurs en uranium trouvées par analyse chimique et celles estimées à partir du levé aérospectrométrique. Malheureusement nous n'avons pas pu mettre en évidence de corrélation compte tenu du faible nombre de couples de mesures (9 points) et de l'incertitude sur leur localisation.

X-lambert2	Y- lambert 2	Qualité de localisation	Nom de roche	U (ppm)
342711	2398704	Arbitraire	Granite	10.50
342403	2398443	Arbitraire	Granite	8.70
332210	2395272	Arbitraire	Granite	6.70
316338	2411043	D'après carte	Granite	6.70
342522	2398621	Arbitraire	Granite	5.60
316338	2411043	D'après carte	Granite	5.10
420067	2397775	Approximatif	Dacite	3.73
316338	2411043	D'après carte	Granite	3.70
316338	2411043	D'après carte	Granite	3.60
391470	2427350	Arbitraire	Granite	3.60
420067	2397775	Approximatif	Rhyolite	3.59
349437	2462729	Arbitraire	Wacke	3.40
343269	2398337	Arbitraire	Granite	3.30
320684	2464515	Arbitraire	Dacite	3.14
314437	2424947	Approximatif	Granodiorite	2.70
349427	2462719	Arbitraire,	Wacke	2.70
401208	2412062	Approximatif	Métasédiment	2.50
365795	2458937	Approximatif	Métasédiment	2.40
342367	2398847	Arbitraire	Adamellite	2.30
319616	2463961	Arbitraire	Basalte	2.22
316338	2411043	D'après carte	Granite	2.20
319656	2464001	Arbitraire	Téphrite	1.77
319596	2463941	Arbitraire	Andésite	1.53
319576	2463921	Arbitraire	Andésite	1.38
320664	2464495	Arbitraire	Dacite	1.37
319556	2463901	Arbitraire	Andésite	1.15
319636	2463981	Arbitraire	Andésite	1.09
320644	2464475	Arbitraire	Andésite	0.99
319516	2463861	Arbitraire	Andésite	0.80
319536	2463881	Arbitraire	Andésite	0.75
421300	2399000	Exacte	Trachybasalte	0.44

Illustration 10 : Résultats des analyses chimiques uranium sur roche en Basse-Normandie (extrait base D. Thiéblemont, BRGM)

4.2.2. Diagraphies gamma-ray

Nous avons extrait de la banque du sous-sol (BSS) du BRGM, les forages et sondages de recherche d'eau ayant fait l'objet d'une diagraphie gamma-ray. Ce type de diagraphie permet d'apprécier la radioactivité naturelle totale des roches traversées en fonction de la profondeur.

Cette radioactivité est due à la présence, non seulement d'uranium radioactif U238, mais aussi de potassium et thorium radioactifs K40 et Th232.

La mesure est exprimée en nombre de coups par seconde (CPS) comme le montre l'enregistrement de l'illustration 11. Sur cette figure concernant un forage réalisé sur la commune de Saint-Sauveur-le-Vicomte, on observe les différents niveaux suivants de haut en bas :

- des argiles de 0 à 11 m de profondeur, dont la radioactivité naturelle diminue progressivement de 90 à 25 CPS,
- des faluns (sable calcaire) de 11 à 42 m de profondeur, dont la radioactivité est constante au voisinage de 40 CPS avec des pics à 60 CPS (probablement liés à la présence d'argile),
- des schistes de 42 à 47 m de profondeur, dont la radioactivité est plus forte, de l'ordre de 100 CPS.

Lors du dépouillement des forages et sondages issus de la BSS, nous avons pris en compte uniquement les diagraphies présentant une échelle de mesure et avons estimé la radioactivité naturelle en surface et la radioactivité maximale (voir tableaux par département en annexe 2).

Les argiles et schistes présentent généralement une radioactivité plus élevée que les calcaires.

Nous avons tenté d'établir une corrélation entre la radioactivité mesurée au sommet des diagraphies et la teneur en uranium estimée à partir du levé aérospectrométrique. Même si une tendance se dessine, le nombre de diagraphies en forage disponibles dans la zone couverte par le levé aérospectrométrique est trop faible (17 forages) pour pouvoir calculer une loi de corrélation et tenter d'étendre les teneurs en uranium de ce levé à l'ensemble des formations traversées par les forages ayant fait l'objet de diagraphies.

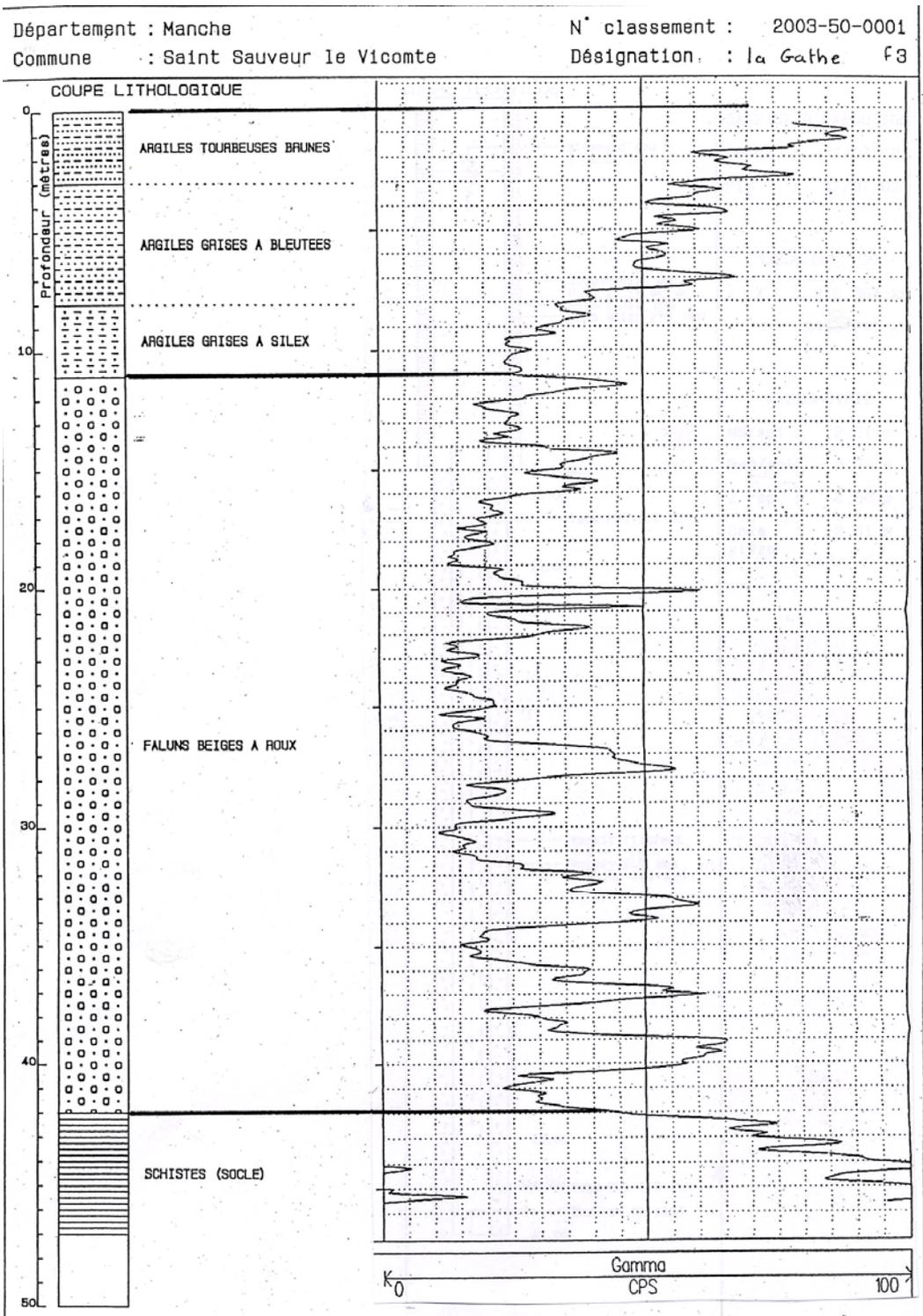


Illustration 11 : Exemple de diagraphie gamma-ray (forage à Saint-Sauveur-le-Vicomte).

4.2.3. Indices miniers

Aucun indice d'uranium n'est répertorié dans la BSS pour la région Basse-Normandie.

On peut simplement noter la présence de quelques indices de phosphates qui peuvent parfois être associés à des concentrations en uranium comme pour les gisements de phosphates marocains par exemple.

4.2.4. Carte de synthèse

L'ensemble des informations issues des données uranium aéroportées, des cartes géologiques et des points extraits de la BSS est reporté sur une carte de synthèse (planche 2 hors texte).

Pour compléter l'information, on y a rajouté les communes traversées par les granites hercyniens du Cotentin pour lesquels nous n'avons pas de mesure en uranium, mais qui ont un potentiel uranifère si on les compare aux autres granites hercyniens du Massif armoricain et en particulier à ceux des Pays de la Loire.

Commune	INSEE	Radon maximum -Bq/m3
ANNEVILLE-EN-SAIRE	50013	110
AUDERVILLE	50020	42
BARFLEUR	50030	104
BEAUMONT	50041	145
BENOITVILLE	50045	
BRANVILLE-HAGUE	50073	277
BRETTEVILLE	50077	1762
CARNEVILLE	50101	59
CLITOURPS	50135	44
COSQUEVILLE	50142	173
DIGULLEVILLE	50163	
ECULLEVILLE	50171	202
FERMANVILLE	50178	365
FLAMANVILLE	50184	186
GATTEVILLE-LE-PHARE	50196	11
GOUBERVILLE	50211	166
GREVILLE-HAGUE	50220	167
HERQUEVILLE	50242	645
JOBOURG	50257	111
LA PERNELLE	50395	
LE THEIL	50595	57
LE VAST	50619	
LES PIEUX	50402	
MAUPERTUS-SUR-MER	50296	604
MONTAIGU-LA-BRISSETTE	50335	347
MONTFARVILLE	50342	56
NEVILLE-SUR-MER	50375	65
OMONVILLE-LA-PETITE	50385	
OMONVILLE-LA-ROGUE	50386	102
QUETTEHOU	50417	46
RETHOVILLE	50432	154
REVILLE	50433	86
SAINT-GERMAIN-DES-VAUX	50477	252
SAINT-PIERRE-EGLISE	50539	159
SAINT-VAAST-LA-HOUGUE	50562	42
SAINTE-CROIX-HAGUE	50460	75
SAINTE-GENEVIEVE	50469	62
SIOUVILLE-HAGUE	50576	46
TEURTHEVILLE-BOCAGE	50593	173
THEVILLE	50596	
TOCQUEVILLE	50598	33
TREAUVILLE	50604	178
URVILLE-NACQUEVILLE	50611	64
VALCANVILLE	50613	
VAROUVILLE	50618	39

Illustration 12 : Liste des communes traversées par les granites hercyniens (toutes situées dans le département de la Manche).

4.3. MESURES DE RADON DANS LES BATIMENTS

Plusieurs campagnes de mesure de radon (Bq/m³) ont été réalisées dans les bâtiments (en priorité les bâtiments recevant du public). Les données suivantes nous ont été transmises par la DRASS le 05 avril 2006 :

- **campagne IPSN de 1994/95** à raison d'une valeur par commune : 150 mesures sur le Calvados, 150 mesures sur l'Orne et 300 mesures sur la Manche.

La localisation de ces mesures est indiquée en coordonnées Lambert 2 étendu avec :

- une précision « 1 » (localisation en un point),
- une précision « 2 » (localisation dans une rue sans numéro),
- une précision « 3 » (localisation dans un bourg mais plus précise que le centroïde).

- **campagne de mesure 1999/2000 :**

Ce sont 1000 mesures sur le sud-ouest du Calvados et 1000 mesures sur l'ouest de l'Orne. Sur chacun de ces départements, il y a environ 20 mesures > 400 Bq/m³, seuil au-delà duquel des actions correctives sont obligatoires. La localisation de ces mesures est seulement indiquée au niveau communal (pas de X, Y).

- **campagne de mesure 2005/2006 :**

Une autre campagne de mesures est en cours (2005/06), mais les données ne seront pas disponibles pour notre étude.

Les teneurs en radon maximales par commune mesurées dans les bâtiments supérieures à 1000 Bq/m³ sont reportées dans l'illustration 13. Il est à noter que ces communes présentent des teneurs moyennes en uranium supérieures à 2.4 eppm.

Commune	INSEE	Uranium (eppm)	Radon (Bq/m3)
CAUMONT-L'EVENTE	14143	2.48	1499
DAMPIERRE	14217	2.58	1164
POTIGNY	14516	2.67	1933
THURY-HARCOURT	14689	2.50	1330
TORTEVAL-QUESNAY	14695	2.52	1250
VIRE	14762	2.49	1880
PERRIERS-EN-BEAUFICEL	50397	2.47	2376
SAINT-PIERRE-DE-SEMILLY	50538	2.93	1632
ALENCON	61001	2.42	1661
CALIGNY	61070	2.53	1161
CERISY-BELLE-ETOILE	61078	2.58	1382
HALEINE	61200	2.47	1430
MONCY	61281	2.42	1298
MONTILLY-SUR-NOIREAU	61287	2.77	1028

Illustration 13 : Liste des communes présentant des teneurs en radon mesurées dans les bâtiments supérieures à 1000 Bq/m3.

4.3.1. Utilisation des mesures radon

Comme les mesures uranium directes (levé aéroporté) ou étendues sur la région (par le biais des formations géologiques) ne permettent pas de couvrir l'ensemble de la surface, il a été tenté de définir un aléa à partir des mesures radon fournies par la DRASS afin de compléter notre cartographie.

Le protocole suivant a été utilisé :

1. Prise en compte des teneurs en radon maximum mesurées dans les bâtiments pour chaque commune : pas de mesure, aléa 0, mesure < 400 Bq/m3, aléa 1, comprise entre 400 et 1000 Bq/m3, aléa 2, >= 1000 Bq/m3, aléa 3,
2. Pour les communes présentant moins de 70% de leur surface couverte par des formations géologiques à teneur connue ou estimée en uranium, nous avons alors considéré les scores radon pour compléter nos données,
3. Carte de synthèse par commune regroupant les résultats du l'aléa radon issu des mesures uranium et des mesures radon de la DRASS.

La carte 9 illustre la répartition des teneurs maximum mesurées sur les communes ayant fait l'objet de mesures radon dans les bâtiments. Seuls les secteur au nord de Flers (61) et de Caumont l'Eventé (14) montrent un groupement de plusieurs communes à valeurs supérieures à 1000Bq/m3. Les autres communes à fortes valeurs

sont dispersées dans la région et se trouvent essentiellement sur soubassement de roches briovériennes.

L'utilisation des valeurs issues des mesures radon permet de compléter celles issues des mesures de l'uranium. Toutefois, on doit signaler que l'on mélange des informations qui ne sont pas du même niveau : mesures aériennes de l'uranium et mesures du radon dans des bâtiments. Cela permet de produire une carte plus « complète » en soulignant les zones d'aléa maximum mais les nombreux paramètres qui permettent l'exhalaison du radon ne sont pas tous pris en compte dans cette cartographie.

L'ajout des scores radon pondérés par la densité des failles à ceux de l'uranium permet d'obtenir la carte 11. De plus, on a ajouté des scores supplémentaires de 4 pour les communes présentant à la fois des teneurs en uranium moyennes supérieures à 2.5 eppm et une mesure radon supérieure à 1000 Bq/m³.

Le calcul du score combiné U+Rn+failles se fait suivant la formule suivante :

score = (score uranium ou score radon) X10 + score faille.

Ainsi, pour un score radon de 2 et un score de failles de 1 on obtient la valeur de 21 qui signifie un aléa radon moyen et une faible densité de failles. Plus les scores sont élevés, plus l'aléa est important.

Commune	INSEE	Uranium (eppm)	Radon (Bq/m3)	Score uranium	Score radon	Score U+Rn+failles	Département
DEPARTEMENT DU CALVADOS							
DAMPIERRE	14217	2.58	1164	1	3	43	14
TORTEVAL-QUESNAY	14695	2.52	1250	1	3	41	14
POTIGNY	14516	2.67	1933	1	3	40	14
ERAINES	14244	4.55		3	0	31	14
FRESNE-LA-MERE	14289	3.74	101	3	1	31	14
VILLY-LEZ-FALAISE	14759	4.12		3	0	31	14
FOURCHES	14283	3.76		3	0	30	14
PERTHEVILLE-NERS	14498	3.87		3	0	30	14
FEUGUEROLLES-BULLY	14266	3.33	244	2	1	23	14
LE VEY	14741	3.06		2	0	23	14
SAINT-REMY	14656	3.09		2	0	23	14
FALAISE	14258	3.14	213	2	1	22	14
LAIZE-LA-VILLE	14349	3.12		2	0	22	14
MAY-SUR-ORNE	14408	3.37	174	2	1	22	14
SAINT-PIERRE-DU-BU	14649	3.01	18	2	1	22	14
COULONCES	14187	3.02	79	2	1	21	14
MARTIGNY-SUR-L'ANTE	14405	3.11	110	2	1	21	14
BEAUMAIS	14053	3.27		2	0	20	14
DEPARTEMENT DE LA MANCHE							
SAINT-PIERRE-DE-SEMILLY	50538	2.93	1632	1	3	41	50
HERQUEVILLE	50242		645	0	2	23	50
LE LOREY	50279		505	0	2	22	50
LA MANCELLIERE-SUR-VIRE	50287		562	0	2	21	50
MONTGARDON	50343	3.16		2	0	21	50
SAINT-GEORGES-MONTCOCQ	50475	3.00	266	2	1	21	50
SAINT-MAURICE-EN-COTENTIN	50522	3.00	31	2	0	21	50
BAUDREVILLE	50035	3.17		2	0	20	50
CANVILLE-LA-ROCQUE	50097	3.05		2	0	20	50
MAUPERTUS-SUR-MER	50296		604	0	2	20	50
SAINT-REMY-DES-LANDES	50544	3.04		2	0	20	50

DEPARTEMENT DE L'ORNE							
CALIGNY	61070	2.53	1161	1	3	43	61
MONTILLY-SUR-NOIREAU	61287	2.77	1028	1	3	43	61
CERISY-BELLE-ETOILE	61078	2.58	1382	1	3	42	61
CUISSAI	61141	3.21	69	2	1	22	61
FONTENAI-SUR-ORNE	61173	3.02		2	0	22	61
SAINT-HILAIRE-LA-GERARD	61403	3.37		2	0	22	61
COLOMBIERS	61111	3.10		2	0	21	61
MERRI	61276	3.44		2	0	21	61
VALFRAMBERT	61497	3.10	70	2	1	21	61
CHAMPCERIE	61084	3.03		2	0	20	61
GUEPREI	61197	3.33	201	2	1	20	61
HABLOVILLE	61199	3.16		2	0	20	61
OMMOY	61316	3.28		2	0	20	61
RI	61349	3.01		2	0	20	61

Illustration 14 : Liste des communes présentant un aléa radon lié aux mesures uranium aéroportées ou aux mesures radon dans les bâtiments en cas d'absence de mesure uranium.

Les communes à uranium moyen égal à 0 ne sont valorisées que par les teneurs radon mesurées dans les bâtiments.

Cette cartographie synthétique permet de mettre en évidence les communes à aléa radon lié à l'uranium et aussi celles qui ont déjà montré de fortes valeurs radon dans au moins un bâtiment. La pondération par la densité des failles géologiques permet de hiérarchiser les différentes classes obtenues.

La comparaison entre les valeurs uranium issues du levé aéroporté et les mesures radon dans les bâtiments montre une corrélation « en grand » avec toutefois des disparités. En effet, on peut observer de fortes teneurs en radon sur des communes à teneur en uranium inférieures à 3 eppm mais ces teneurs sont toutefois au moins supérieures à 2.4 eppm. Inversement, on observe des mesures radon faibles dans des communes à plus fortes teneurs moyennes en uranium.

Ces disparités apparentes appellent plusieurs commentaires :

- le levé aéroporté a été effectué avec des lignes de vol distantes de 1000 m avec une intégration du signal d'une seconde, et donc, des phénomènes ponctuels peuvent être omis lors de la mesure,
- le levé aéroporté prend en compte (en moyenne) une tranche de terrain d'environ 50 cm et une source d'uranium profonde peut être masquée par un écran argileux qui peut être percé lors d'une construction,
- l'extension des mesures sur l'ensemble de la Basse Normandie a été faite à partir des formations géologiques en faisant l'hypothèse de leur homogénéité ;

- les facteurs liés au bâtiment sont prépondérants pour l'accumulation du radon et même avec un faible potentiel géologique, on pourra avoir une accumulation dangereuse. Inversement, si l'aération du bâtiment est bien conçue, les teneurs en radon seront faibles même sur un soubassement à plus forte teneur en uranium (cas de Falaise par exemple avec un uranium moyen à 3.14ppm et une teneur en radon maximum mesurée de 213 Bq/m³)
- le transfert d'une mesure radon maximale à l'ensemble d'une commune n'est pas forcément pertinent, des phénomènes naturels très locaux peuvent expliquer la présence de radon dans un bâtiment. Une étude faite sur les mesures radon de la commune d'Alençon montre cette forte dispersion des mesures (annexe 4) qui empêche de prendre en compte un paramètre comme la teneur moyenne en radon. C'est pourquoi nous avons considéré la teneur maximale en radon validée par les DDASS sur une commune pour signaler l'existence d'un aléa.

4.3.2. Autres mesures radon

Des mesures radon ont été effectuées par l'INERIS dans les secteurs de May-sur-Orne et de Soumont (Calvados) à proximité d'anciennes mines de fer.

Il s'agit de mesures sur des prélèvements d'atmosphère dans le sol (30-40 cm de profondeur) au-dessus et à proximité des anciennes galeries d'exploitation. Les teneurs mesurées varient de 62Bq/m³ à 37000 Bq/m³ avec une moyenne de 13000 Bq/m³ sur May sur Orne et de 8000Bq/m³ à Soumont .

Néanmoins, le protocole de mesure et le contexte particulier de ces mesures (mesures d'atmosphère du sol) ne permet pas de les intégrer à l'échelle régionale, ni de les comparer aux mesures faites dans les bâtiments.

On doit toutefois souligner que sur certaines des communes intéressées par ces mesures dans le secteur de May-sur-Orne montrent des teneurs en uranium supérieures à 3eppm ainsi que des anomalies uranium ce qui correspond, dans notre échelle, à un aléa moyen et qu'on y note la présence de failles. En revanche, on ne signale pas d'aléa autour de Soumont.

L'examen de la carte géologique peut permettre d'avancer une explication à cette différence. En effet, les formations paléozoïques affleurent assez largement près de May sur Orne alors qu'une seule petite occurrence de grès est cartographiée dans le secteur de Soumont. Comme on l'a vu dans le paragraphe 4.3.1, les mesures aéroportées sont faites sur des lignes distantes de 1000m et leur profondeur d'investigation est d'environ 50 cm. Ces deux facteurs peuvent expliquer l'absence de réponse uranium dans le secteur de Soumont où le recouvrement jurassique est important.

5. Conclusion

Les travaux entrepris ont permis de sélectionner 43 communes présentant un aléa radon principalement défini à partir des teneurs en uranium issues du levé aérospectrométrique et des mesures radon dans les bâtiments

En ce qui concerne la Basse-Normandie, le levé aérospectrométrique du Massif armoricain ne couvre qu'environ un tiers de la surface de la région : la partie centrale de l'Orne, la zone Caen - Falaise pour le Calvados, la bordure sud de la Manche. Seules les teneurs en uranium mesurées sur cette zone sont connues.

Nous avons ensuite étendu ces valeurs au reste de la Basse-Normandie par le biais du calcul de la teneur moyenne en uranium des formations géologiques situées à l'aplomb du levé aérospectrométrique.

Ceci a permis d'estimer la teneur en uranium en dehors de la zone de levé aérospectrométrique, dans les secteurs où il existe des formations géologiques similaires à celles présentes dans la zone du levé géophysique. Mais il s'agit seulement d'une estimation : la teneur en uranium d'une même formation géologique peut varier d'un point à un autre.

Cette estimation n'a pu être étendue aux formations géologiques non présentes dans la zone du levé. Pour ces secteurs de teneur en uranium inconnue, il a été pris en compte les teneurs en radon mesurées dans les bâtiments.

Cette méthode n'est pas idéale pour estimer un potentiel géologique car si les teneurs en radon dans les bâtiments dépendent effectivement de la présence d'uranium dans le sous-sol, elles dépendent aussi d'autres paramètres dont le mode d'isolation et d'aération de ces bâtiments.

Ainsi, l'objectif de cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon en Basse-Normandie est correctement atteint pour les communes situées à l'aplomb du levé aéroporté. L'extension des teneurs moyennes mesurées sur les formations géologiques à toute la surface couverte par ces formations part de l'hypothèse que ces formations sont homogènes sur toute la région. Cette procédure diminue un peu la fiabilité de la réponse pour ces zones. Enfin, pour les communes sans teneur en uranium connue ou supposée, l'utilisation des teneurs radon mesurées par la DRASS dans les bâtiments peut servir d'indicateur d'aléa mais les mesures ne sont plus faites dans les mêmes conditions et ne sont pas directement corrélables. Il s'agit d'une simple indication de tendance d'aléa.

Afin d'améliorer les résultats de cette étude, il serait souhaitable d'envisager d'étendre le levé aérospectrométrique à l'ensemble de la Basse-Normandie en dehors de la zone déjà connue, que ce soit en domaine de socle ou en domaine sédimentaire.

6. Bibliographie

Béchenec F., Tourlière B., Perrin J., Urien P., Rabu D. (1999) : Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon à partir de la radiométrie spectrale aéroportée de l'uranium et des données de la carte géologique à 1/250000 du socle de la région des Pays de la Loire – rapport BRGM R40895 de décembre 1999

Béchenec F., Tourlière B., Bouroullec I., Perrin J., Maget P., Conil P. (2000) : Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon à partir de la radiométrie spectrale aéroportée de l'uranium, des diagraphies gamma ray et des données de la carte géologique à 1/250000 de la région des Pays de la Loire (phase 2) – rapport BRGM RP-50448-FR de décembre 2000

Bonijoly D., Perrin J., Truffert C., Asfirane F., Couverture géophysique aéroportée du Massif armoricain, magnétisme et radiométrie spectrale, rapport BRGM R40471, 1999, 75p.

Le Gall J. (1999). Les dolérites et basaltes tholéiitiques du domaine nord-est armoricain . *Géol. de la France*, n°4, pp.3-26, 15 fig., 5 tabl.

Vernhet Y. et Chevremont P. (1997). Carte géologique France (1/50 000), feuille Landivy (248) et notice explicative

Sites internet :

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) :

Etude et traitement des situations impliquant du radon par M.C. ROBE.
http://www.irsn.org/vf/05_inf/05_inf_1dossiers/05_inf_16_radon/pdf/etude_trait_radon.pdf

Ressources naturelles Canada :

The Radiation Geophysics Section of the Geological Survey of Canada is responsible for the GSC's ground and airborne gamma-ray spectrometry program (NATGAM)
gsc.nrcan.gc.ca/gamma/index_e.php - 18k -

Annexe 1 : Teneurs moyennes en uranium des formations géologiques couvertes par le levé aérospectrométrique

En jaune, Teneur > 3
En vert, 3 > Teneur >2.5
En blanc, Teneur <2.5

Nombre de polygones	Uranium moyen par formation	Description	Surface couverte en km2
4	5.49	horizon calcaire indifférencié dans la formation k2	0.036
219	3.26	Calcaires à spongiaires de Fresné-la-Mâre, Falaise	80.768
48	3.21	Grès à <i>Platyorthis monnieri</i>	121.103
1	3.09	Schistes d'Urville (ou du Pissot) métamorphisés: schistes à andalousite	0.740
1	3.09	Calcaires bioclastiques (zone à <i>Humphriesanum</i> et <i>Nortiense</i>)	0.052
607	3.05	Siltites et argilites, lustrées (Briovérien inférieur)	175.269
14	3.05	Argiles blanches et calcaires à oolites ferrugineuses	3.034
134	3.04	Argiles à poissons, Calcaires à ammonites	19.254
1	3.02	Grès armoricain métamorphisé	0.038
155	2.98	Calcaire de Caen	117.718
85	2.94	Malière	28.776
47	2.94	Faciès de bordure des écueils paléozoïques (Bajocien-Bathonien)	10.085
8	2.93	Schistes et quartzites du Val	3.802
6	2.91	Granodiorite cadomienne métamorphisée	3.238
7	2.91	Altérites des formations cambro-ordoviciennes	5.257
95	2.91	Schistes rouges de Saint-Rémy	59.679
230	2.91	Calcaire à bélemnites	42.613
89	2.91	Ampélites et calcaires (Silurien)	43.800
2	2.90	Sables du Maine	11.289
65	2.89	Leucogranites (tardi-Cadomien)	12.097
45	2.87	Calcaires marneux à <i>Gryphea arcuata</i>	147.909
11	2.84	Granodiorite à biotite et cordiérite mylonitisée	16.286
13	2.83	Tufs de source, travertins	0.423
66	2.83	Grès et pélites rouges intercalés dans la formation k4	1.446
102	2.81	Schistes de Gouvix	76.990
84	2.80	Alluvions weichséliennes	20.485
10	2.80	Volcanites indifférenciées d'Ecouves-Multonnes	6.902
17	2.79	Schistes à stomatolithes	1.529
26	2.78	Calcaire à <i>Acanthothiris spinosa</i>	1.827
60	2.77	Calcaires à nérinées-Calcaires à bryozoaires	22.445
189	2.77	Schistes du Pont-de-la-Mousse, Schistes et Grès verts	193.425
1	2.76	Schistes à Fucoïdes	0.031
4	2.75	Marnes et calcaires de Bourg-Le-Roi	0.319
67	2.75	Calcaires de Clécy et de Laize-la-Ville	5.166
19	2.75	Leucogranite d'Alençon	4.419
72	2.74	Oolite ferrugineuse et conglomérat de Bayeux	3.351
10	2.74	Calcaire de Bon-Mesnil: Faciès d'Olendon	7.725
26	2.69	Pegmatites, aplites	0.097
161	2.68	Formation des "Schistes et calcaires"	49.132

43	2.68	Tillite de Feuguerolles	2.785
7	2.67	Granodiorite à biotite et cordiérite: Faciès à tourmaline	5.039
4	2.66	Filons de lamprophyres	0.049
155	2.66	Glauconie de base	31.025
798	2.66	Loess weichséliens non carbonatés ou indifférenciés	855.012
22	2.65	Calcaires oolitiques de Damigni, Villaines-la-Carelle, du Saosnois	2.277
243	2.65	Limons des plateaux	200.753
14	2.64	Siltites, argilites (b2), cornéifiées (granodiorites cadomiennes)	11.267
66	2.64	Loess weichséliens carbonatés	139.682
7	2.64	Silurien indifférencié	2.307
2	2.63	Faciès de bordure des écueils paléozoïques (Callovien)	0.213
63	2.63	Schistes du Pont-de-Caen	58.931
25	2.62	Leucogranites tardi-cadomiens	1.678
25	2.60	Calcaire d'Ecouché et calcaire de Sarceaux (regroupés)	33.278
3	2.60	Conglomérats et brèches volcanogènes d'Ecouves-Multonnes-Les Courvons	0.699
35	2.60	Schistes du Pont-de-Caen, Tillite de Feuguerolles, indifférenciés	3.416
37	2.60	Cailloutis résiduel de la base du Jurassique transgressif	8.272
2	2.59	Aplites, pegmatites	0.029
10	2.59	Calcaires meuliérisés résiduels	1.100
12	2.58	Calcaires de Bailleul et de Fresné-La-Mère	7.862
13	2.58	Oolite ferrugineuse de Grandmesnil, de Chemilli	4.665
9	2.57	Marnes de Dives, de Villers, Oolite de Villers, Argiles à Lophea gr., indifférenciées	4.150
88	2.57	Grès de Caumont et Grès brun-vert	22.804
183	2.56	Siltites et Grès du Briovérien, métamorphisés (Schistes tachetés)	197.405
8	2.56	Calcaires du Bajocien et/ou du Bathonien silicifiés	0.642
252	2.55	Granodiorite à biotite et cordiérite	453.934
17	2.54	Alluvions anciennes: terrasse intermédiaire	8.840
13	2.54	Argilites et siltites violacées	4.162
41	2.54	Calcaires à Rosnaiella	1.681
100	2.53	Craie de Rouen (ou de Théligny)	176.676
146	2.53	Altérites des formations briovériennes	158.214
13	2.53	arènes granitiques enrichies en loess	24.806
194	2.53	Dépôts anthropiques, remblais	22.242
247	2.52	Siltites et Grès du Briovérien, métamorphisés (Cornéennes)	433.951
54	2.51	Grès fins et grauwackes du Briovérien, métamorphisés (Schistes tachetés)	6.159
29	2.51	Arkose d'Alençon, Sables et graviers de Tessé	4.110
83	2.51	Grès culminant	22.845
284	2.51	Argiles grises et rouges, sables, cailloutis	394.637
4	2.50	Schistes et calcaires métamorphisés	0.243
122	2.50	Siltites et Grès briovériens indifférenciés, cornéifiés	286.991
199	2.50	Altérites des granodiorites cadomiennes	177.888
23	2.50	Calcaire de Valfrembert	15.172

107	2.49	Calcaires de Rouvres, de Creully, de Saint-Pierre-du-Mont	95.916
29	2.49	Rhyolites ignimbritiques d'Ecouves-Multonnes	20.259
1714	2.49	Loess non carbonatés ou décalcifiés	790.029
93	2.48	Filons de quartz	0.762
228	2.48	alluvions elstériennes	49.583
53	2.48	Sables et Grès de Sainte-Opportune	4.654
6	2.47	Marnes de Montmarlo-Marnes de Rouillé	16.607
6	2.47	Siltites et Grès verts	1.633
203	2.47	Argile à silex sur calcaires jurassiques et/ou crétacés	557.790
235	2.46	Granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite	182.690
50	2.46	Epanrages préquaternaires	24.132
23	2.45	Micromonzogranite de Beauvain	0.487
21	2.45	Granodiorites cadomiennes à biotite seule	11.278
144	2.45	Briovérien supérieur: microconglomérats et conglomérats	4.793
1416	2.44	Grès fins et grauwares (Briovérien supérieur)	411.620
17	2.44	Sables et argiles d'Aunou	1.827
1250	2.43	Siltites, argilites (Briovérien supérieur)	130.930
1697	2.43	Colluvions indifférenciées	443.036
969	2.43	Alluvions récentes	1361.954
103	2.43	Marnes à brachiopodes de la forêt de Gouffern	172.959
44	2.43	Schistes d'Urville (ou du Pissot): minerai de fer	0.745
162	2.42	Siltites et argilites (b2) métamorphisées dans le domaine des "Schistes tachetés"	60.240
59	2.42	Colluvions limoneuses, limons sablonneux	16.595
40	2.42	Argiles et marnes sableuses	14.668
117	2.42	Grès feldspathiques bigarrés	35.555
397	2.41	Formation de Granville et de la Laize: siltites, argilites, Grès, grauwares et conglomérats	1075.263
11	2.40	Siltites et argilites du Briovérien métamorphisées (Schistes tachetés)	0.991
5	2.40	Oolite Fe-Mâlière, oolite Fe-conglomérat de Bayeux, calcaires à spongiaires, indifférenciés	1.059
18	2.39	Grès à Sabalites	8.738
7	2.39	Tufs et cinérites d'Ecouves-Multonnes	4.615
4	2.39	Membre des pélites noires intermédiaires (Formation de May)	0.133
7	2.38	Spilites de Vassy: tholeïtes interstratifiées dans le Briovérien (b2)	0.243
359	2.38	Filons de quartz	3.400
245	2.38	Dépôts de solifluxion indifférenciés	108.461
146	2.38	Grâzes, heads, éboulis	41.814
20	2.37	Grès et grauwares du Briovérien, métamorphisés (Cornéennes)	1.869
7	2.37	Marnes et calcaires d'Assé-Le-Riboul	11.100
5	2.36	Ignimbrites métamorphisées	0.622
466	2.36	Alluvions saaliennes	96.245
7	2.36	Oolite de Suré	8.158
5	2.35	Grès du Grand-May (Formation des Grès de May)	0.681
4	2.34	Faciès marneux du Cornbrash	13.803

429	2.34	Argiles à silex	479.911
3	2.33	Grès et grauwackes (b2) cornéifiés (granodiorites cadomiennes)	0.387
280	2.33	Filons doléritiques	3.374
22	2.33	Sables, argiles, cailloutis, Grès silicifiés conglomératiques	11.074
1341	2.33	Points d'eau, bassins, étangs	39.917
2	2.33	Ignimbrites d'Ecouves-Multonnes	0.366
8	2.33	Dépôts marins anciens d'âge anté-Eemien, infra-Saalien ou Holsteinien .	14.827
115	2.31	Altérites des granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite	158.293
99	2.31	Sables du Perche	211.044
81	2.31	Alluvions périglaciaires du Quaternaire moyen	24.922
23	2.31	Épandages torrentiels	77.918
147	2.30	Grès de May-sur-Orne	126.378
15	2.30	Graviers et galets résiduels de la base de la transgression crétacée	3.847
118	2.29	Grès et grauwackes (b2) métamorphisés dans le domaine des "Schistes tachetés"	10.596
1	2.29	Argiles et calcaires de Céaucé	0.375
12	2.28	Marnes d'Escoville, marnes d'Argences et marnes à Belemnopsis latesulcatus indifférenciées	50.906
93	2.27	Briovérien indifférencié, métamorphisé dans le domaine des Schistes tachetés	129.181
238	2.27	Conglomérats et Grès pourprés	75.607
5	2.27	Grès du Petit-May (Formation des Grès de May)	0.416
70	2.26	Blocs résiduels de Grès et conglomérats tertiaires	1.572
310	2.24	Filons doléritiques	3.420
19	2.22	Alluvions anciennes indifférenciées	3.984
4	2.22	Calcaire de Mamers et Caillasse des Baronniers	0.526
1	2.22	Calcaires oolitiques intercalés dans la formation k4	0.003
309	2.22	Formations solifluées et colluvionnées	118.774
41	2.20	Calcaires du Bathonien supérieur indifférenciés	33.284
62	2.20	Marnes de Port-en-Bessin	52.399
50	2.20	Grès de Sainte-Suzanne-Grès suprarhyolitiques d'Ecouves	14.109
211	2.19	Schistes d'Urville, Schistes du Pissot	123.857
140	2.18	Calcaires de Bon-Mesnil, Blainville, Sarceaux, ou des Mées	123.360
19	2.18	Argiles à silicifications diverses, silcrêtes, zones silicifiées	12.446
4	2.16	Membre des Grès ferrugineux (Formation des Grès de May)	0.314
78	2.13	Craie glauconieuse (craie de St Jouin, craie à Pecten asper)	167.147
1	2.13	Argiles glauconieuses à minéral de fer	0.011
299	2.13	Grès armoricain	193.986
40	2.12	Marnes et calcaires d'Exmes	34.228
1	2.10	Argiles laguno-lacustres de La Goulande	0.136
2	2.10	Caillasse de Belle-Eau et Calcaire d'Argentan	0.112
94	2.10	Marnes à Pernes	72.263
15	2.08	Colluvions dérivées des marnes calloviennes	15.276
27	2.06	Accumulations ferromanganiques	0.642
13	2.05	Marnes d'Escoville et marnes d'Argence indifférenciées	10.559

95	2.05	Assise des Carreaux	175.021
327	2.05	Glauconie de base (ou Glauconie à <i>Ostrea vesiculosa</i> , ou à <i>Pycnodonte vesiculosum</i>)	143.741
1	2.02	Microgranite porphyrique de Beauvain	0.277
105	2.01	Roussié de Gacé	29.356
4	1.99	Microsyénogranite de Beauvain	0.314
16	1.98	Marnes d'Argences	3.000
27	1.98	Marnes du Chevain (ou d'Escoville)	59.513
29	1.97	Calcaire de Fel	3.020
63	1.97	Calcaire de Ranville	107.660
316	1.96	Craie glauconieuse et Craie de Rouen	262.758
24	1.95	Colluvions dérivées du Bathonien	14.401
107	1.93	Calcaires de Langrune, Argentan, ou Chambois	90.378
26	1.87	Argiles et marnes sableuses et Assise des Carreaux indifférenciées	10.634
2	1.86	Calcaires de Damigni, Villers, Mamers, Valfrembert, du Saosnois, regroupés	1.832
177	1.85	Sables éoliens	42.871
31	1.83	Paléovolcanites acides et intermédiaires de Montsurvent	17.761
1	1.83	Marnes d'Argence et marnes à <i>Belemnopsis latesulcatus</i> indifférenciées	1.686
1	1.82	Faciès de bordure des écueils paléozoïques (Bathonien)	0.922
43	1.81	Caillasses de La Basse-Ecarde, de Belle-Eau ou de Chambois	1.621
1	1.69	Sables résiduels indifférenciés	0.451
19	1.68	Marais gris: tangué limoneuse	12.189
20	1.66	Tangué de schorre et de haute slikke	57.098
90	1.64	Dépôts marins flamandais, sablo-argileux ou argilo-sableux	108.477
61	1.63	Caillasse de Blainville	4.726
4	1.63	Argiles de Lion-sur-Mer	1.110
71	1.62	Dépôts tourbeux	102.422
148	1.58	Altérite de craie cénomaniennne	250.482
21	1.45	Grès armoricain: horizon conglomératique	0.388
19	1.34	Paléovolcanites basiques de Montsurvent	35.164
25	1.31	Dépôts fluvio-marins flamandais	7.341
28	0.79	Tangué des mondrains et anciennes salines	1.194

Annexe 2 : Diagraphies gamma-ray sur forages

INDICE	COMMUNE	X_Lambert 2	Y_Lambert 2	CPS en surface	CPS maximum	Géologie en surface	Géologie fond
01768X0022	OCCAGNES	422404	2423035	15	30	Calcaire	Argile
02131X0017	JUVIGNY-SUR-ORNE	429425	2417811	8	25	Argile	Calcaire
02131X0018	SAINT-LOYER-DES-CHAMPS	431981	2413642	40	40	Marne	Calcaire
02131X0022	AUNOU-LE-FAUCON	431243	2416148	25	25	Argile	Calcaire
02136X0015	CHATEAU-D'ALMENECHES(LE)	435786	2410776	25	50	Argile	Calcaire
02513X0014	ESSAY	445156	2397547	17	17	Argile	Calcaire
02527X0008	PIN-LA-GARENNE(LE)	466886	2384261	12	50	Argile	Calcaire
02532X0034	MARCHAINVILLE	488684	2399801	12	35	Sable	Argile
02537X0010	BRETONCELLES	496121	2387077	20	30	Sable	Calcaire
02883X0008	APPENAI-SOUS-BELLEME	469971	2372088	16	20	Argile	Calcaire
02885X0001	SAINT-FULGENT-DES-ORMES	459060	2370135	8	60	Calcaire	Volcanite
02888X0011	THEIL(LE)	476918	2363197	10	25	Argile	Calcaire
02892X0006	CONDE-SUR-HUISNE	490105	2377042	12	12	Calcaire	
02893X0004	COULONGES-LES-SABLONS	493727	2379414	12	35	Argile	Sable
00721X0025	VAUVILLE	301313	2523400	30	45	Argile	Grès
00726X0006	COUVILLE	309290	2512942	50	90	Grès	
00936X0025	DENNEVILLE	311218	2488192	40	40	Argile	Sable
00937X0031	SAINT-SAUVEUR-DE -PIERREPONT	312739	2487682	40	60	Argile	
00938X0026	SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	319693	2493833	20	70	Faluns	Schiste
00938X0027	SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	319743	2493693	40	70	Argile	Schiste
00938X0044	SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	320415	2492890	45	50	Argile	Faluns
00938X0045	SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	319960	2493250	85	100	Argile	Faluns
00938X0046	SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	320405	2492883	20	40	Argile	Faluns
00945X0049	PICAUVILLE	330880	2492595	50	80	Argile	Sable
00945X0050	BEUZEVILLE-LA-BASTILLE	331295	2490890	40	100	Argile	Calcaire
00945X0051	CRETTEVILLE	328465	2490495	160	200	Sable	Grès
00945X0052	APPEVILLE	332725	2487850	100	150	Argile	Sable
01171X0022	SAINTENY	331118	2477171	40	40	Faluns	
01172X0058	SAINTENY	334601	2477248	70	70	Argile	Calcaire
01172X0062	SAINTENY	332769	2477264	40	40	Sable	Faluns
01172X0064	SAINTENY	334260	2477888	70	70	Argile	Faluns

01172X0070	AUVERS	331583	2484789	30	60	Tourbe	Calcrete
01172X0079	AUVERS	331653	2484799	35	35	Argile	Grès
01172X0095	SAINTENY	333612	2477876	12	25	Sable	Faluns
01172X0096	AUVERS	333935	2484993	30	70	Argile	Sable
01172X0098	AUVERS	335186	2484946	35	65	Argile	Sable
01172X0099	AUVERS	332321	2481641	75	75	Argile	Faluns
01172X0100	AUVERS	333017	2481874	40	40	Argile	Faluns
01174X0027	VEYS(LES)	346387	2485028	40	70	Tourbe	Argile
01175X0029	SAINT-GERMAIN-SUR-SEVES	329451	2475266	30	60	Argile	Faluns
01176X0038	MARCHESIEUX	335321	2472835	30	60	Argile	Faluns
01176X0040	MARCHESIEUX	335601	2472906	100	100	Argile	Sable
01176X0041	MARCHESIEUX	336081	2472747	70	70	Argile	Sable
01176X0042	MARCHESIEUX	335912	2472226	50	50	Argile	Sable
01176X0043	MARCHESIEUX	336311	2472967	80	80	Argile	Sable
01176X0044	SAINT-GERMAIN-SUR-SEVES	331130	2476300	40	40	Argile	Faluns
01174X0033	ISIGNY-SUR-MER	348024	2484771	32	67	Argile	Sable
01181X0021	ISIGNY-SUR-MER	351234	2483846	21	120	Argile	Schiste
01181X0022	ISIGNY-SUR-MER	351954	2484348	36	36	Sable argile	
01188X0016	TORTEVAL-QUESNAY	376606	2467426	15	35	Argile	Sable
01188X0018	SAINT-PAUL-DU-VERNAY	374705	2468740	32	50	Argile	Schiste
01191X0263	RYES	383910	2484154	20	60	Calcaire	Marne
01193X0189	AMBLIE	392980	2480445	20	45	Calcaire	Marne
01193X0196	COLOMBIERS-SUR-SEULLES	393251	2480115	25	60	Calcaire	Marne
01193X0197	BANVILLE	395110	2481779	15	60	Calcaire	Marne
01193X0198	AMBLIE	393202	2479089	12	60	Calcaire	Marne
01194X0166	THAON	397434	2477193	5	15	Calcaire	Marne
01194X0167	LANGRUNE-SUR-MER	402005	2482380	37	37	Calcaire	Argile
01194X0170	LANGRUNE-SUR-MER	403296	2482836	40	40	Calcaire	Marne
01197X0129	BRETTEVILLE-L'ORGUEILLEUSE	392343	2471525	40	40	Calcaire	Marne
01197X0135	CHEUX	391021	2465528	40	65	Argile	Schiste
01197X0136	SAINT-MANVIEU-NORREY	393487	2469746	30	50	Marne	Calcaire
01201X0168	BENOUVILLE	408001	2475452	25	30	Calcaire	Marne
01205X0472	CROUAY	405653	2472687	30	100	Calcaire	Marne
01206X0211	DEMOUVILLE	410193	2468429	30	30	Calcaire	
01206X0214	RANVILLE	411885	2473180	10	15	Calcaire	Argile
01207X0097	BURES-SUR-DIVES	416936	2470631	15	15	Calcaire	
01211X0151	SAINT-VAAST-EN-AUGE	429866	2479876	40	40	Calcaire	Argile
01446X0005	FERRIERE-HARANG(LA)	362480	2447086	100	100	Schistes	Grès
01452X0024	NOYERS-BOCAGE	387288	2463011	30	60	Argile	Calcaire
01457X0012	SAINT-MARTIN-DE-SALLEN	389701	2445831	35	60	Argile	Grès

01457X0013	SAINT-MARTIN-DE-SALLEN	389727	2445331	60	60	Argile	Schiste
01464X0021	PERCY-EN-AUGE	424184	2454557	3	20	Calcaire	
01464X0026	OUVILLE-LA-BIEN-TOURNEE	426968	2453040	40	40	Marne	Calcaire
01464X0027	PERCY-EN-AUGE	425715	2454569	15	50	Calcaire	Schiste
01464X0028	PERCY-EN-AUGE	424250	2454533	15	30	Calcaire	Schiste
01464X0029	OUVILLE-LA-BIEN-TOURNEE	426969	2453001	30	30	Marne	Calcaire
01464X0031	PERCY-EN-AUGE	424164	2454137	30	40	Calcaire	
01464X0032	PERCY-EN-AUGE	423904	2454327	30	30	Calcaire	
01464X0034	PERCY-EN-AUGE	423825	2453711	30	40	Colluvions	Calcaire
01467X0063	VENDEUVRE	421921	2447859	15	50	Calcaire	Schiste
01467X0064	MAGNY-LA-CAMPAGNE	420443	2452831	6	25	Calcaire	
01468X0039	GRISY	423372	2448041	30	55	Calcaire	Schiste
01468X0040	MAGNY-LA-CAMPAGNE	423916	2452285	25	25	Calcaire	Grès
01468X0041	SAINT-PIERRE-SUR-DIVES	424902	2448914	20	60	Calcaire	Grès
01468X0042	THIEVILLE	426470	2451098	30	50	Calcaire	Schiste
01468X0045	OUVILLE-LA-BIEN-TOURNEE	424688	2451215	10	45	Calcaire	Schiste
01468X0046	MAGNY-LA-CAMPAGNE	423940	2452264	20	30	Calcaire	Grès
01468X0047	THIEVILLE	426479	2451148	35	60	Calcaire	Schiste
01468X0048	SAINT-PIERRE-SUR-DIVES	424842	2448894	30	80	Calcaire	Schiste
01468X0049	MAGNY-LA-CAMPAGNE	422906	2452384	20	20	Calcaire	
01468X0051	SAINT-PIERRE-SUR-DIVES	424570	2449834	15	20	Calcaire	
01468X0061	BRETTEVILLE-SUR-DIVES	428109	2452124	25	25	Argile	Calcaire
01468X0062	GRISY	425232	2448784	10	20	Calcaire	Quartzite
01468X0064	THIEVILLE	425689	2451607	12	20	Calcaire	
01474X0064	SAINT-JULIEN-DE-MAILLOC	454254	2455558	30	50	Calcaire	Sable
01477X0036	SAINTE-MARGUERITE-DES-LOGES	444183	2448588	30	30	Argile	Calcaire
01477X0038	SAINTE-MARGUERITE-DES-LOGES	444169	2448604	30	30	Argile	Calcaire
01748X0012	CHENEDOLLE	372682	2432365	80	80	Schistes	
01752X0017	PERIGNY	384612	2438515	20	70	Schistes	
01752X0019	PERIGNY	383456	2439213	75	90	Schistes	Grès
01754X0012	SAINT-OMER	397554	2440770	75	75	Argile	Calcaire
01754X0013	COMBRAY	396072	2441738	75	75	Argile	Calcaire
01761X0032	PIERREPONT	404606	2435747	50	50	Limons	Calcaire

Annexe 3 : Liste des communes présentant une anomalie uranium

Liste des communes présentant au moins une anomalie uranium supérieure à 1 eppm avec un fond uranium supérieur à 3 eppm.

L'anomalie est calculée par la différence entre la teneur mesurée durant le vol aérospectrométrique et la teneur moyenne de la formation géologique. Ce calcul n'a pu être fait que sur la zone couverte par le levé. Les anomalies trop petites (< 4 pixels soit 6.25ha) ont été éliminées avant de classer les communes.

NOM	INSEE	Radon maximum	Uranium moyen	Dépt
DEPARTEMENT DU CALVADOS				
AMAYE-SUR-ORNE	14006	145	2.80	14
AUBIGNY	14025	116	2.73	14
BEAUMAIS	14053		3.27	14
BONNEMAISON	14084		2.46	14
BOULON	14090	140	2.51	14
BOURGUEBUS	14092		2.39	14
BRETTEVILLE-SUR-LAIZE	14100		2.72	14
CAMPANDRE-VALCONGRAIN	14128		2.61	14
CESNY-BOIS-HALBOUT	14150	76	2.83	14
CINTHEAUX	14160		2.46	14
CLECY	14162	81	2.74	14
CLINCHAMPS-SUR-ORNE	14164	77	2.55	14
COMBRAY	14171		2.61	14
CONDE-SUR-IFS	14173		2.82	14
CONDE-SUR-NOIREAU	14174	930	2.84	14
CORMELLES-LE-ROYAL	14181	41	2.71	14
COSESSEVILLE	14183		2.94	14
COULONCES	14187	79	3.02	14
CROCY	14206		2.96	14
CROISILLES	14207	37	2.62	14
CULEY-LE-PATRY	14211		2.70	14
CURCY-SUR-ORNE	14213		2.55	14
DAMBLAINVILLE	14216		2.34	14
DEMOUVILLE	14221	58	2.45	14
DONNAY	14226		2.58	14
ERAINES	14244		4.55	14
ESPINS	14248		2.53	14
ESTREES-LA-CAMPAGNE	14252		2.74	14
FALAISE	14258	213	3.14	14
FEUGUEROLLES-BULLY	14266	244	3.33	14
FONTENAY-LE-MARMION	14277	114	2.89	14
FOURCHES	14283		3.76	14
FRESNE-LA-MERE	14289	101	3.74	14
FRESNEY-LE-PUCEUX	14290	462	2.84	14
GOUPILLIERES	14307	172	2.59	14

GOUVIX	14309		2.52	14
GRENTHEVILLE	14319		2.56	14
GRIMBOSQ	14320		2.46	14
HAMARS	14324		2.64	14
HUBERT-FOLIE	14339		2.95	14
IFS	14341		2.35	14
JUVIGNY-SUR-SEULLES	14348		2.60	14
LA HOGUETTE	14332		2.43	14
LAIZE-LA-VILLE	14349		3.12	14
LE BO	14080		2.70	14
LE BU-SUR-ROUVRES	14116		2.70	14
LE DETROIT	14223		2.67	14
LE VEY	14741		3.06	14
LES ISLES-BARDEL	14343		2.72	14
LES MOUTIERS-EN-CINGLAIS	14458		2.63	14
MAIZIERES	14394	70	2.95	14
MARTIGNY-SUR-L'ANTE	14405	110	3.11	14
MAY-SUR-ORNE	14408	174	3.37	14
MONT-EN-BESSIN	14449		2.59	14
MORTEAUX-COULIBOEUF	14452	33	2.44	14
MOUEN	14454	49	2.79	14
NORON-L'ABBAYE	14467		2.66	14
OUILLY-LE-TESSON	14486	110	2.56	14
PARFOURU-SUR-ODON	14491		2.58	14
PERRIERES	14497		2.54	14
PERTHEVILLE-NERS	14498		3.87	14
PLACY	14505		2.99	14
PONT-D'OUILLY	14764	58	2.62	14
PREAUX-BOCAGE	14519		2.49	14
PROUSSY	14523		2.53	14
ROUVRES	14546		2.61	14
SAINT-DENIS-DE-MERE	14572	314	2.79	14
SAINT-GERMAIN-DU-CRIOULT	14585	41	2.59	14
SAINT-MARTIN-DE-MIEUX	14627	36	2.77	14
SAINT-MARTIN-DE-SALLEN	14628		2.50	14
SAINT-OMER	14635		2.78	14
SAINT-PIERRE-CANIVET	14646		2.56	14
SAINT-PIERRE-DU-BU	14649	18	3.01	14
SAINT-REMY	14656		3.09	14
SASSY	14669		2.84	14
SOIGNOLLES	14674		2.83	14
SOLIERS	14675		2.44	14
SOULANGY	14677	101	2.95	14
TILLY-LA-CAMPAGNE	14691		2.68	14
TROIS-MONTS	14713		2.47	14
VACOGNES-NEUILLY	14721		2.66	14

VERSAINVILLE	14737		2.74	14
VERSON	14738		2.71	14
VIGNATS	14751		2.73	14
VILLERS-CANIVET	14753	39	2.67	14
VILLY-LEZ-FALAISE	14759		4.12	14
DEPARTEMENT DE LA MANCHE				
ISIGNY-LE-BUAT	50256	64	2.54	50
SAINT-BRICE-DE-LANDELLES	50452		2.64	50
SAINT-JAMES	50487	252	2.41	50
SAINT-NICOLAS-DES-BOIS	50529		2.55	50
SAVIGNY-LE-VIEUX	50570	224	2.64	50
VIREY	50644	59	2.67	50
DEPARTEMENT DE L'ORNE				
ALENCON	61001	1661	2.42	61
AUNOU-LE-FAUCON	61014		2.34	61
BAILLEUL	61023	235	2.89	61
BAZOCHE-SUR-AU-HOULME	61028	82	2.70	61
BELFONDS	61036		2.77	61
BERJOU	61044		2.75	61
CAHAN	61069		2.82	61
CARROUGES	61074	482	2.53	61
CHAHAINS	61080		2.43	61
CHAMBOIS	61083	118	2.38	61
CHAMP CERIE	61084		3.03	61
COLOMBIERS	61111		3.10	61
CONDE-SUR-SARTHE	61117	247	2.59	61
CRAMENIL	61137		2.69	61
CUISSAI	61141	69	3.21	61
DOMPIERRE	61146		2.50	61
ECORCHES	61152		2.51	61
ECOUCHE	61153	110	2.48	61
FLERS	61169	601	2.52	61
FLEURE	61170		2.46	61
FONTENAI-LES-LOUVETS	61172		2.42	61
FONTENAI-SUR-ORNE	61173		3.02	61
FORGES	61175		2.98	61
GIEL-COURTEILLES	61189	75	2.96	61
GUEPREI	61197	201	3.33	61
HABLOVILLE	61199		3.16	61
HELOUP	61203	43	2.72	61
LA BELLIERE	61039		2.55	61
LA CHAPPELLE-D'ANDAINE	61096	120	2.58	61
LA COULONCHE	61124	184	2.48	61
LA FERRIERE-BECHET	61164		2.47	61
LA FERRIERE-BOCHARD	61165	133	2.82	61
LA LANDE-DE-GOULT	61216		2.32	61

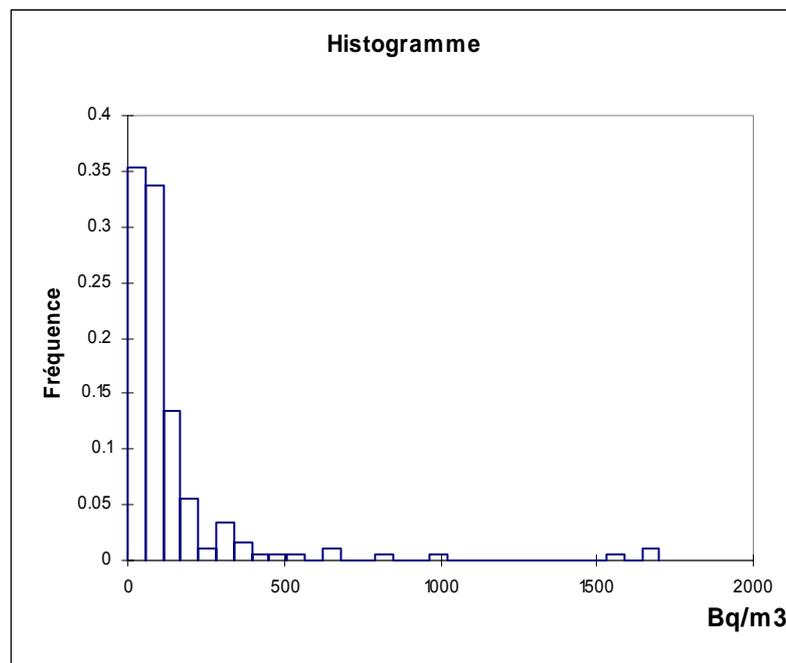
LARRE	61224		2.80	61
LE BOUILLON	61056		2.37	61
LE BOURG-SAINT-LEONARD	61057		2.24	61
LE CERCUEIL	61076		2.56	61
LES ROTOURS	61354	170	2.78	61
LES YVETEAUX	61512		2.86	61
LIVAIE	61228		2.38	61
LONLAY-L'ABBAYE	61232	91	2.73	61
LOUGE-SUR-MAIRE	61237	297	2.71	61
MACE	61240	25	2.69	61
MAGNY-LE-DESERT	61243	76	2.64	61
MEDAVY	61256		2.59	61
MERRI	61276		3.44	61
MIEUXCE	61279	268	2.72	61
MONTGAROULT	61285		2.61	61
MONTILLY-SUR-NOIREAU	61287	1028	2.77	61
MONTMERREI	61288	206	2.69	61
MORTREE	61294	37	2.93	61
NEAUPHE-SUR-DIVE	61302	25	2.35	61
NECY	61303	220	2.98	61
NEUVY-AU-HOULME	61308		2.99	61
OCCAGNES	61314	168	2.35	61
OMMEEL	61315		2.82	61
OMMOY	61316		3.28	61
RADON	61341	257	2.87	61
RANES	61344	230	2.55	61
RI	61349		3.01	61
RONAI	61352		2.90	61
SAINT-ANDRE-DE-BRIOUZE	61361		2.63	61
SAINT-AUBERT-SUR-ORNE	61364		2.75	61
SAINT-BOMER-LES-FORGES	61369	184	2.54	61
SAINT-BRICE-SOUS-RANES	61371	104	2.58	61
SAINT-CHRISTOPHE-LE-JAJOLET	61375	555	2.71	61
SAINTE-HONORINE-LA-GUILLAUME	61408	232	2.54	61
SAINT-ELLIER-LES-BOIS	61384	296	2.56	61
SAINT-GERMAIN-DU-CORBEIS	61397	160	2.58	61
SAINT-GERVAIS-DU-PERRON	61400	153	2.46	61
SAINT-HILAIRE-DE-BRIOUZE	61402	98	2.76	61
SAINT-HILAIRE-LA-GERARD	61403		3.37	61
SAINT-LOYER-DES-CHAMPS	61417	371	2.41	61
SAINT-MARTIN-L'AIGUILLON	61427		2.83	61
SAINT-MICHEL-DES-ANDAINES	61431		2.52	61
SAINT-PATRICE-DU-DESERT	61442	113	2.36	61
SAINT-PIERRE-DU-REGARD	61447	348	2.89	61
SAINT-SAUVEUR-DE-CARROUGES	61453	37	2.67	61
SEES	61464	170	2.60	61

SEMALLE	61467		2.71	61
SEVIGNY	61472		2.12	61
SILLY-EN-GOUFFERN	61474		2.18	61
TANQUES	61479		2.52	61
TANVILLE	61480	211	2.71	61
TOURNAI-SUR-DIVE	61490		2.76	61
TRUN	61494	90	2.32	61
VALFRAMBERT	61497	70	3.10	61
VILLEDIEU-LES-BAILLEUL	61505	989	2.57	61
VRIGNY	61511	109	2.65	61

**Annexe 4 : Illustration de la variabilité des
mesures radon (exemple de la commune
d'Alençon)**

Sur la commune d'Alençon, 274 mesures radon ont été effectuées dans des bâtiments recevant du public et 179 mesures sont supérieures au seuil de détection. Si des mesures de contrôles ont été effectuées, les plus faibles valeurs ont été retenues.

Les paramètres statistiques calculés sur ce jeu de données montrent l'extrême variabilité de celles-ci (pour mémoire, la valeur moyenne de l'uranium issu du levé aéroporté est de 2.42 eppm sur cette commune).



Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence
0.00	56.67	63	0.354
56.67	113.33	60	0.337
113.33	170.00	24	0.135
170.00	226.67	10	0.056
226.67	283.33	2	0.011
283.33	340.00	6	0.034
340.00	396.67	3	0.017
396.67	453.33	1	0.006
453.33	510.00	1	0.006
510.00	566.67	1	0.006
566.67	623.33	0	0.000
623.33	680.00	2	0.011
680.00	736.67	0	0.000
736.67	793.33	0	0.000
793.33	850.00	1	0.006
850.00	906.67	0	0.000
906.67	963.33	0	0.000
963.33	1020.00	1	0.006
1020.00	1076.67	0	0.000
1076.67	1133.33	0	0.000
1133.33	1190.00	0	0.000
1190.00	1246.67	0	0.000
1246.67	1303.33	0	0.000
1303.33	1360.00	0	0.000
1360.00	1416.67	0	0.000
1416.67	1473.33	0	0.000
1473.33	1530.00	0	0.000
1530.00	1586.67	1	0.006
1586.67	1643.33	0	0.000
1643.33	1700.00	2	0.011

Si 81% des effectifs ont une teneur inférieure à 170 Bq/m³ (en éliminant les teneurs inférieures au seuil) on a quand même 5.6% des teneurs supérieures au seuil de 400Bq/m³.

Cette dispersion des mesures est très bien illustrée par l'édition des paramètres statistiques de base qui montrent l'écart important entre la médiane et la moyenne et un écart-type supérieurs à 230 Bq/m³.

Statistiques	Toutes mesures (si Rn < seuil alors 0)	Mesures radon supérieures au seuil
Nb. d'observations	274.00	179.00
Minimum	0.00	2.00
Maximum	1661.00	1661.00
Amplitude	1661.00	1659.00
1er Quartile	0.00	46.95
Médiane	46.10	75.50
3ème Quartile	90.00	137.35
Somme	25597.00	25597.00
Moyenne	93.42	143.00
Ecart-type (n)	202.57	236.06
Coefficient de variation	2.17	1.65



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Basse-Normandie
Citis Odysée
4 avenue de Cambridge
14209 Hérouville Saint Clair - France
Tél. : 02.31.06.66.40