



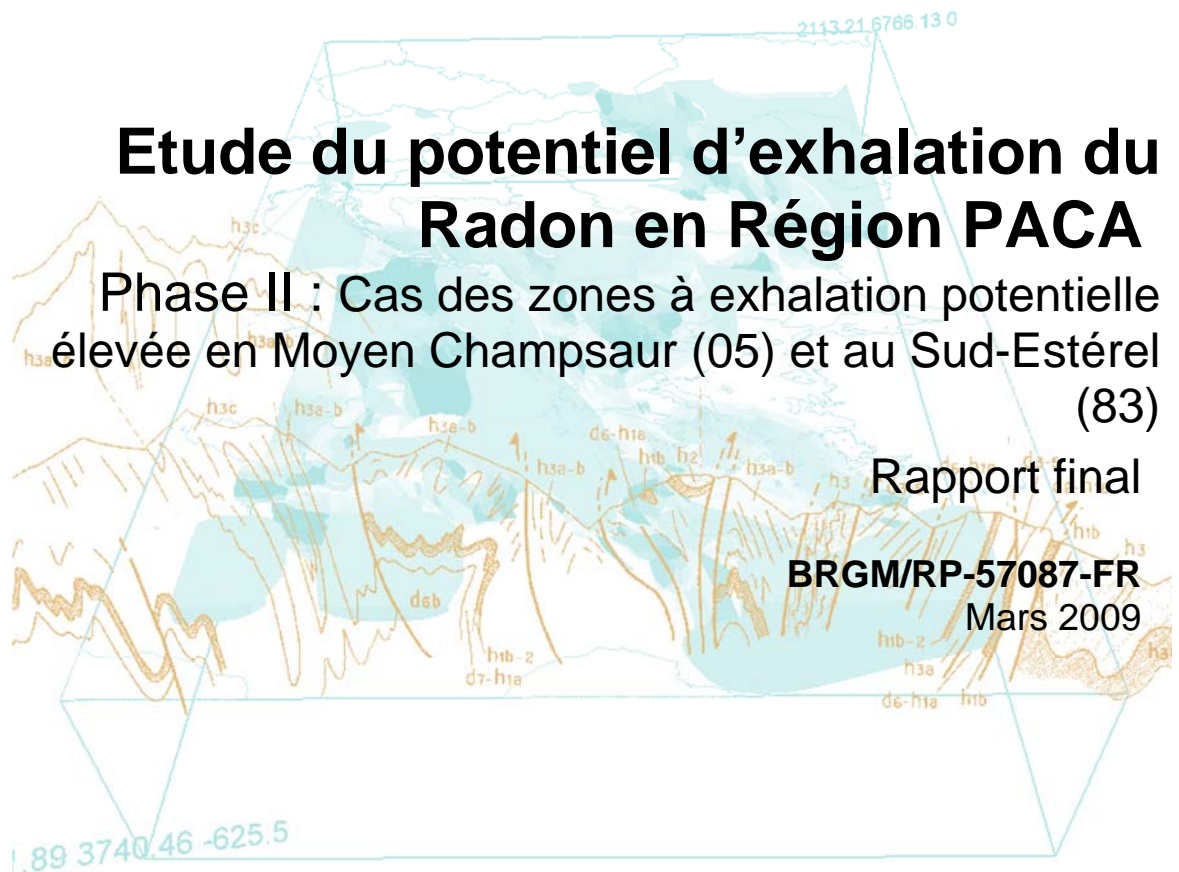
Etude du potentiel d'exhalation du Radon en Région PACA

Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et au Sud-Estérel (83)

Rapport final

BRGM/RP-57087-FR

Mars 2009



Etude du potentiel d'exhalation du Radon en Région PACA

Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et au Sud-Estérel (83)

Rapport final

BRGM/RP-57087-FR

Mars 2009

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public 08POLE08

F. Gal, A. Galaria et G. Gonzalez

Avec la collaboration de

**M. Brach, G. Braibant, D. Dessandier, J. Didez, P. Dufour, F. Jouin, J.
Lions, H. Paya**

Vérificateur :

Original signé par D. Maton

Date : 10 mars 2009

Approbateur :

Original signé par D. Dessandier

Date : 10 mars 2009

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Mots clés : Champsaur, émanation, Estérel, exhalation, lithogéochimie, radon, thorium, uranium,

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

F. Gal, A. Gadal et G. Gonzalez (2009) - *Etude du potentiel d'exhalation du radon en Région PACA - Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et Sud-Estérel (83)* – Rapport BRGM/RP-57087-FR , 169 pages, 29 figures, 15 Tab., 6 annexes.

Synthèse

A la demande de la DRASS Provence-Alpes-Côte d'Azur, le BRGM (Service Géologique Régional PACA) a mené en 2001 dans le cadre de ses missions de Service Public, une étude dont l'objectif était de déterminer à l'échelle de la Région PACA, les zones géographiques où le risque de concentration en radon pouvait atteindre ou dépasser les normes admises. Cette étude (rapport BRGM RP-53240-FR) a abouti à la production d'une carte de « susceptibilité à l'émanation » du radon en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. celle-ci s'est appuyée à la fois sur les niveaux de potentialité émissive en radon des formations géologiques et sur les conditions de son transfert vers la surface. En outre, elle a mis en évidence deux zones ayant un potentiel élevé : le sud de l'Estérel dans le département du Var et le Moyen Champsaur dans le département des Hautes-Alpes.

En 2007-2008, la DRASS et la DRE Provence-Alpes-Côte-d'Azur ont donc à nouveau sollicité le Service Géologique Régional PACA afin d'étudier plus en détail les deux zones géographiques précitées et mesurer précisément leur exhalation en Radon.

Dans un premier temps, une note technique intermédiaire (référéncée SGR/PAC/08.275, intitulée « Etude du potentiel d'exhalation du radon en Région PACA - Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et Sud-Estérel (83) - Synthèse bibliographique et plan d'échantillonnage » et remise le 2 Décembre 2008) a donc fait le point sur l'état des connaissances concernant l'influence de la concentration en uranium pour l'activité radon des terrains, Cette note établit également un plan d'échantillonnage des formations géologiques et des gaz des sols.

Dans un deuxième temps, les campagnes de mesure et d'échantillonnages ont été menées en mai et juin 2008, de même que les analyses en laboratoire. Ce rapport synthétise les résultats obtenus en évaluant leur contribution à répondre au problème posé.

Quelques difficultés méthodologiques ont été rencontrées sur le terrain :

- la profondeur requise n'a pas toujours pu être atteinte dans les terrains de l'Estérel, souvent dépourvus de sol et où les roches dures affleurent,
- la sur-représentation des formations détritiques en général et en particulier en Champsaur où, en raison du fort relief, la campagne s'est déroulée essentiellement dans le fond des vallées.
- l'influence, difficilement quantifiable, de la pluviométrie abondante ayant précédé la campagne en Champsaur.

Cependant, les conséquences de ces difficultés n'ont pas été jugées rédhibitoires mais introduisent des biais dont il a fallu tenir compte dans l'interprétation.

L'analyse des teneurs en uranium des formations géologiques a conduit à une gamme plus large de valeurs dans la zone Estérel que dans le Champsaur.

Dans les deux zones, les activités radon sont bien corrélées aux concentrations en uranium. La gamme de variation de ces activités est plus large dans les formations détritiques que dans les autres roches. Dans chacune des deux zones, et encore davantage en Champsaur, il semble difficile d'expliquer ces activités radon par la seule concentration en uranium. Un linéament tectonique à l'est de la vallée du Reyran, déjà mis en évidence dans une étude précédente, se trouve exprimé par une série de mesures d'activité radon et de concentration en CO₂ plus élevées. Le rôle de la tectonique est probablement encore plus significatif en Champsaur.

Si les deux zones choisies pour cette étude ont en commun des activités radon dans les sols moyennement élevées, l'origine et la structuration de cette activité diffèrent significativement d'une zone à l'autre.

Dans l'Estérel, l'origine dominante est liée au rôle prépondérant de la composition des roches notamment en uranium. A l'affleurement, plusieurs formations présentent un enrichissement relatif en uranium conduisant à des anomalies radon. En profondeur, un stock granitique constitue un réservoir de radon inépuisable et son émission dépend de la densité de drains.

En Champsaur, le rôle de la composition des formations géologiques n'est pas négligeable. Cependant, il semble que l'activité radon soit principalement due à d'autres facteurs. Les drains tectoniques sous-jacents aux formations détritiques des vallées semblent jouer un rôle clé.

L'étude précédente (Terrier *et al.*, 2004) avait tenu compte d'autres facteurs que de la seule concentration en uranium des formations géologiques et ses conclusions sont relativement conformes à ce qui est obtenu par les mesures réalisées lors de cette étude (analyse de la concentration en uranium et mesure de l'activité radon dans les sols). Néanmoins, et dans les deux zones, il a pu être mis en évidence, ponctuellement en Estérel et de façon plus étendue en Champsaur, une sous-estimation des facteurs autres que lithogéochimique.

Sur cette base une révision de l'exposition aux risques paraît être justifiée, notamment dans les vallées du Champsaur.

Des études complémentaires sont proposées dans cette optique afin, en particulier, de mieux cerner les facteurs (tectonique,...) à l'origine des valeurs d'activité radon significatives et sans lien apparent avec la concentration en uranium des formations géologiques.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	11
1.1.1. Rappel de la Phase I : <i>Identification des zones à forte potentialité d'émanation en radon dans la région Provence – Alpes – Côte d'Azur</i> ...	11
1.1.2. Phase II : <i>Etude du potentiel d'exhalation du radon en Région PACA - Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et Sud-Estérel (83)</i>	12
2. Méthodologie	17
2.1. ANALYSES URANIUM ET THORIUM SUR ROCHE TOTALE	17
2.2. MESURE DES ACTIVITES EN RADON-222 DANS LES GAZ DES SOLS	17
2.3. MESURE DU RAYONNEMENT GAMMA.....	20
3. Influence des teneurs en uranium des roches sur l'exhalation du radon (Synthèse bibliographique)	21
3.1. QUELQUES DEFINITIONS	21
3.1.1. Isotope.....	21
3.1.2. Isotope radioactif	21
3.1.3. Radiation α	22
3.1.4. Radiation β	22
3.1.5. Radiation γ	22
3.1.6. Unité de mesure	22
3.2. PHENOMENES PHYSIQUES ET CONTEXTES NATURELS CONTROLANT LE TRANSPORT DU RADON	23
3.2.1. Pouvoir d'émanation.....	23
3.2.2. Exhalation.....	23
3.2.3. Advection, convection.....	24
3.2.4. Influence des conditions atmosphériques	24
3.2.5. Rôle des failles et de la géomorphologie.....	26
3.3. RAPPELS SUR LE RADON	26
3.3.1. Isotopes du radon.....	26
3.3.2. Chaînes de désintégration des isotopes du radon	27

3.3.3. Spécificités du thoron.....	29
3.4. RAPPELS SUR LA GEOCHIMIE DE L'URANIUM.....	30
3.4.1. Roches éruptives et plutoniques	30
3.4.2. Roches métamorphiques	31
3.4.3. Roches sédimentaires.....	32
3.4.4. Mesure de l'influence de la concentration en uranium sur l'activité volumique et l'exhalation radon.....	32
3.4.5. Cas de la Corse	34
3.4.6. Géochimie du Thorium.....	38
4. Zone Sud Estérel	39
4.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES	39
4.1.1. Conditions météorologiques avant et pendant la campagne de terrain	39
4.1.2. Influence sur les mesures	43
4.2. TENEURS EN RADON 222 DANS LES SOLS	44
4.2.1. Analyse statistique	44
4.2.2. Définition de seuils d'activité en radon.....	46
4.3. TENEURS EN URANIUM ET THORIUM DES FORMATIONS GEOLOGIQUES.....	47
4.4. INFLUENCE DE LA NATURE ET DE LA REPARTITION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES SUR L'ACTIVITE RADON	52
4.4.1. Influence de la lithogéochimie.....	52
4.4.2. Répartition dans l'espace.....	57
4.4.3. Autres facteurs influants.....	62
4.4.4. Bilan par rapport aux estimations de la phase 1 et exposition aux risques.....	64
4.4.5. Structure profonde et potentiel d'exhalation radon	64
4.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE ESTEREL.....	65
5. Zone Moyen Champsaur.....	67
5.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES	67
5.1.1. Conditions météorologiques avant et pendant la campagne de terrain	67
5.1.2. Influence sur les mesures	70
5.2. TENEURS EN RADON 222 DANS LES SOLS.....	71
5.3. TENEURS EN URANIUM ET THORIUM DES FORMATIONS GEOLOGIQUES.....	72
5.3.1. Evaluation du rayonnement gamma des formations échantillonnées	75
5.3.2. Répartition statistique.....	75

5.4. INFLUENCE DE LA NATURE ET DE LA REPARTITION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES SUR L'ACTIVITE RADON.....	77
5.4.1. Influence de la lithogéochimie	77
5.4.2. Répartition dans l'espace	80
5.4.3. Autres facteurs influant.....	85
5.4.4. Bilan par rapport aux estimations de la phase 1 et exposition aux risques.....	87
5.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE CHAMPSAUR.....	88
6. Conclusions	89
7. Bibliographie.....	91

Liste des figures

Figure 1 : Répartition de l'échantillonnage – zone Estérel.	14
Figure 2 : Répartition de l'échantillonnage – zone Moyen Champsaur.	15
Figure 3: Dispositif de mesure sur le terrain	19
Figure 4: Position du radon (^{222}Rn) dans la chaîne de désintégration de l'uranium 238	27
Figure 5: Position du thoron (^{220}Rn) dans la chaîne de désintégration du thorium 232.....	28
Figure 6: Position de l'actinon (^{219}Rn) dans la chaîne de désintégration de l'uranium 235.....	29
Figure 7: Carte des teneurs moyennes en uranium des principales formations géologiques de Corse (d'après Baubron, 2000).....	35
Figure 8: Mesures des concentrations en radon dans les habitations en Corse.....	37
Figure 9 : Position des différentes stations météorologiques référencées dans le texte	40
Figure 10 : Données météorologiques de mai-juin 2008 (stations de Fréjus et Draguignan) échantillonnage du 19 au 23 et du 26 au 30 mai.....	42
Figure 11 : Evolution des activités radon mesurées dans les sols en fonctions des conditions météorologiques externes – Estérel.	43
Figure 12 : Relations entre les activités radon et la profondeur d'échantillonnage (haut), et les mesures par scintillomètre SPP2 (bas).....	45
Figure 13: Teneurs en U et Th des formations de l'Estérel	51
Figure 14 : Répartition de la gamme d'activité Radon en fonction des formations géologiques.....	55
Figure 15: Corrélation entre l'activité radon et les teneurs en uranium en fonction des formations géologiques.....	57
Figure 16 : Estérel, activités en radon dans les sols et teneurs en uranium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000 ^{ème} (feuille de Fréjus)	58

Figure 17: Estérel, activités en radon dans les sols et teneurs en thorium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000 ^{ème} (feuille de Fréjus).....	59
Figure 18 : Interpolations par krigeage des activités radon (haut), des mesures par scintillomètre SPP2 (milieu) et des profondeurs d'échantillonnage (bas)	60
Figure 19: Carte néotectonique du pliocène à l'actuel (M. Dubar in Toutin-Morin et al, 1994)...	62
Figure 20 : Répartition des concentrations en CO ₂ et en radon.....	63
Figure 21 : Données météorologiques de mai-juin 2008 (stations de Sisteron et d'Orcières) – échantillonnage du 02 au 06 et du 09 au 12 juin.....	69
Figure 22 : Evolution des activités radon mesurées dans les sols en fonctions des conditions météorologiques externes – Champsaur.....	70
Figure 23 : Relation entre rayonnement gamma mesuré et teneurs en uranium et thorium des formations du Champsaur	75
Figure 24: Teneurs en U et Th des formations du Champsaur.....	77
Figure 25: Répartition de l'activité radon en fonction des formations géologiques.....	79
Figure 26: Corrélation entre l'activité radon et les teneurs en uranium en fonction des formations géologiques.	80
Figure 27 : Champsaur, activités en radon dans les sols et teneurs en uranium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000 ^{ème}	83
Figure 28 : Champsaur, activités en radon dans les sols et teneurs en thorium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000 ^{ème}	84
Figure 29: Interpolations par krigeage des activités radon.....	85

Liste des tableaux

Tableau 1 : Teneur moyenne estimée ou analysée (*) en uranium en fonction de la nature et de l'âge des roches endogènes et métamorphiques d'Auvergne (d'après Tourlière, 2007)	31
Tableau 2 : Synthèse des résultats obtenus après comparaison croisée des analyses de lithogéochimie et de niveaux de radon en Sud Bretagne (d'après Ielsch et al., 2001)	33
Tableau 3 : Teneurs moyennes, maximales et minimales en uranium des formations géologiques de Corse (d'après Baubron, 2000).....	36
Tableau 4: Paramètres météorologiques moyens de la station Météo-France de Fréjus	41
Tableau 5: Paramètres météorologiques moyens de la station météo personnelle de Draguignan	41
Tableau 6 : Statistiques descriptives (activité ²²² Rn, profondeur d'échantillonnage et rayonnements mesurés par scintillomètre SPP2) – Estérel.....	45
Tableau 7 : Répartition des activités radon-222 dans l'Estérel.....	46
Tableau 8 : Statistiques descriptives (teneurs en U et Th) – Estérel.....	47

Tableau 9 : Répartition des formations lithologiques échantillonnées dans l'Estérel	49
Tableau 10: Paramètres météorologiques moyens de la station personnelle de Sisteron	67
Tableau 11 : Paramètres météorologiques moyens de la station personnelle d'Orcières	68
Tableau 12 : Statistiques descriptives (activité ^{222}Rn , profondeur d'échantillonnage) – Champsaur.....	71
Tableau 13 : Répartition des activités radon-222 dans le Champsaur (seuils de coupure identiques à ceux utilisés pour les données Estérel).....	71
Tableau 14 : Répartition des formations lithologiques échantillonnées dans le Champsaur	73
Tableau 15 : Statistiques descriptives (teneurs en U et Th) – Champsaur.	76

Liste des annexes

Annexe 1 : Localisation des échantillons de roches en Sud-Estérel	95
Annexe 2 : Localisation des échantillons de roches en Moyen-Champsaur	115
Annexe 3 : Activités radon mesurées sur le terrain - Parti 1 - données Estérel	139
Annexe 4 : Activités radon mesurées sur le terrain – Partie 2 – données Champsaur	149
Annexe 5 : Teneurs en uranium, thorium mesurées sur roche totale.....	159
Annexe 6 : Données Météo-France	163

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le prolongement des campagnes de mesure d'exposition au risque de l'exhalation du radon entreprises par l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) et la Direction Générale de la Santé (DGS) de 1982 à 1999 puis des cartographies prédictives du radon dans les départements français initiées par les circulaires DGS/DGUHC du 27/01/1999 et du 02/07/2001.

A la demande de la Direction Régionale de l'Équipement (DRE) et de la Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales (DRASS) de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), le BRGM a été chargé de cartographier et quantifier cette exhalation naturelle de radon au niveau régional.

Il est en effet considéré que l'importance du risque sanitaire lié à la remontée du radon en surface dépend principalement de facteurs d'ordre géologique à savoir :

- la capacité des formations lithologiques à émettre de grandes quantités de radon, est directement fonction de la teneur en uranium des roches qui les constituent,
- la faculté qu'aura par la suite ce radon à migrer suffisamment rapidement vers la surface par les failles, fissures et fractures qui affectent les formations géologiques.

La phase I de l'étude a abordé globalement la question de la « susceptibilité à l'émanation en radon » au niveau régional tandis que la phase II s'est focalisée à la fois :

- géographiquement sur deux zones sélectionnées précédemment pour présenter une plus forte susceptibilité
- et sur l'origine même de cette « émanation » en radon, à savoir la teneur des roches en uranium.

1.1.1. Rappel de la Phase I : *Identification des zones à forte « potentialité d'émanation » en radon dans la région Provence – Alpes – Côte d'Azur*

Une première phase d'étude (rapport BRGM/RP 53240-FR de Terrier *et al.*, 2004) a permis de **définir à l'échelle régionale les zones où le risque de concentration en radon pourrait atteindre ou dépasser les normes admises** (seuils de 400 Bq/m³ et 1 000 Bq/m³). Le résultat de ce travail (carte de « susceptibilité à l'émanation » du radon en région PACA) a été obtenu à partir :

- des mesures de radon disponibles (1715 mesures effectuées par l'IPSN et par les DDASS entre 1997 et 2000, **réparties inégalement** sur l'ensemble de la région PACA et localisées selon une **précision variable**),
- de **l'estimation de la teneur en uranium** des formations endogènes et métamorphisées (analysée pour seulement 11% des formations à l'affleurement). Cette teneur a cependant été estimée sur la base de lithologies types et répartie en 4 classes. Pour les formations sédimentaires, représentant 90% du territoire de la région PACA, par contre, aucune donnée de concentration en uranium n'a été trouvée. L'estimation de la « susceptibilité à l'émanation » du radon s'est donc faite à partir des mesures d'activité volumique et d'une typologie des formations associées.
- de la **pondération par des facteurs « aggravants » facilitant ou non la migration de ce radon vers la surface** : profondeur du socle, état de fracturation des roches, niveau de sismicité, présence de sources hydrothermales, concentrations importantes d'uranium, perméabilité, présence de failles, de conduits karstiques et / ou de galeries.

Cette carte constitue donc un outil permettant d'ajuster les futures campagnes de mesures du radon dans les habitats au niveau régional.

1.1.2. Phase II : Etude du potentiel d'exhalation du radon en Région PACA - Phase II : Cas des zones à exhalation potentielle élevée en Moyen Champsaur (05) et Sud-Estérel (83)

Pour la deuxième phase, l'objectif est d'aboutir à une connaissance plus précise des causes de l'exhalation radon en s'appuyant davantage sur :

- des **mesures *in situ* de l'activité volumique du radon dans les sols**,
- des **analyses en laboratoire de la concentration en uranium des roches**.

Les résultats de la phase I ont permis de sélectionner deux zones d'étude de la Région Provence – Alpes – Côte d'Azur qui présentent une **plus forte « susceptibilité à l'émanation » radon**:

- le **Moyen Champsaur** (Hautes-Alpes) qui présente les mesures de radon les plus fortes, notamment sur les territoires communaux de : Aspres lès Corps (6)¹, Saint Firmin (6,4), Saint Jacques en Valgaudemard (6,9), Les Costes (7,3), Les Infournas (5,8), Bénévent et Charbillac (6,8), Saint-Michel de Chaillol (7),

¹ Entre parenthèses sont indiquées les valeurs de susceptibilité moyenne à l'émanation radon. Pour le calcul de cette grandeur, se reporter à Terrier et al., 2004.

Saint Jean – Saint Nicolas (6), Saint Bonnet (5,9), Saint Julien en Champsaur (6,3), Buissard (5,2), Chabottes (5,4), Saint Léger les Mélèzes (6,7), La Motte en Champsaur (8,1) et Saint Eusèbe en Champsaur (7,5) ;

- le **Sud de l'Estérel** (Var) qui possède les indices les plus importants de roches uranifères sur les communes de Saint Raphaël (10,3), Fréjus (8,5) et Puget sur Argens (9,4).

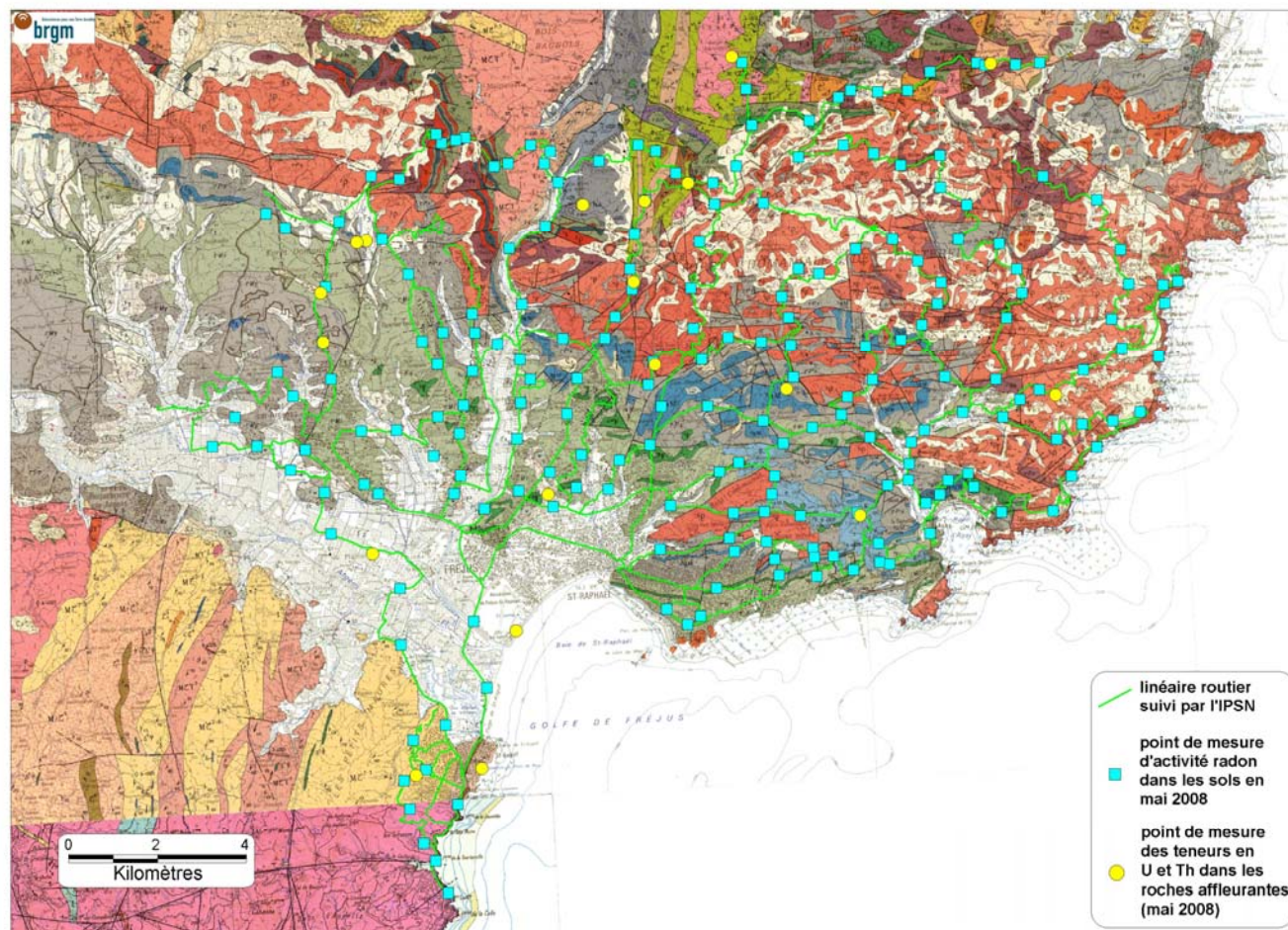
La phase II du programme se propose donc d'examiner, à partir d'un jeu de 438 mesures (212 mesures pour l'ensemble « Estérel » et 219 pour l'ensemble « Champsaur ») la variation naturelle de l'activité radon dans les sols à une profondeur voisine de un mètre². Elle comprend comme complément naturel un échantillonnage des horizons lithologiques principaux existants dans chacun des deux massifs, pour déterminer en laboratoire les teneurs en uranium et thorium de ces formations. Un objectif majeur de cette étude est **d'établir la relation existant entre l'activité volumique du radon mesuré dans les sols et les teneurs en uranium des roches**.

Par ailleurs, au cours de la campagne menée dans l'Estérel ont été adjointes des mesures de rayonnements gamma et d'émission de particules bêta par balayage surfacique au scintillomètre SPP2 des formations géologiques voisines du point de mesure .

Enfin, rappelons que les mesures de terrain ayant permis la détermination des activités en radon à un mètre de profondeur sont réputées refléter les activités réelles dans le sol **selon les conditions météorologiques et d'humidité/température du sol à la date d'échantillonnage**. La campagne de mesure du radon dans les sols s'est déroulée entre le 19 et le 30 mai 2008 dans l'Estérel et entre le 02 et le 13 juin 2008 pour le Champsaur.

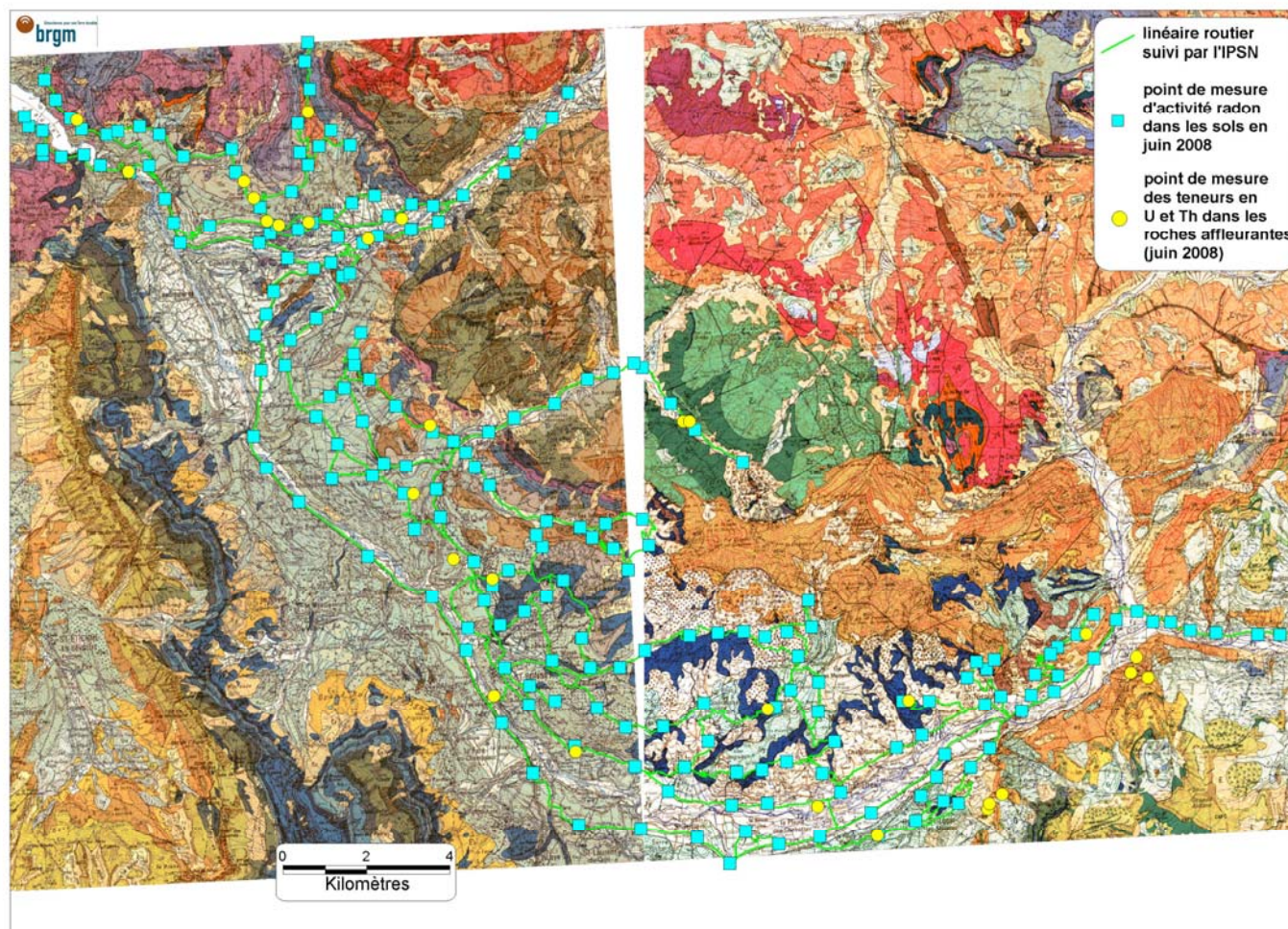
Une cartographie récapitulative des prélèvements et mesures effectués dans l'Estérel et le Champsaur est présentée en pages suivantes (figures 1 et 2).

² Compte tenu d'épaisseurs de sols très variables, cette profondeur n'a pas toujours pu être atteinte.



(Fond : carte géologique de Fréjus-Cannes, Edit. BRGM),

Figure 1 : Répartition de l'échantillonnage – zone Estérel.



(Fond : cartes géologiques de Saint Bonnet et Orcières, Edit. BRGM),

Figure 2 : Répartition de l'échantillonnage – zone Moyon Champsaur.

2. Méthodologie

2.1. ANALYSES URANIUM ET THORIUM SUR ROCHE TOTALE

Le rapport BRGM de 2004, *Identification des zones à forte potentialité d'émanation en radon dans la région Provence – Alpes – Côte d'Azur*, (Terrier et al., 2004) s'est appuyé sur les travaux conjoints du BRGM et de l'IRSN montrant la corrélation entre les anomalies d'émission radon (dans les milieux air, habitations, sols) et les teneurs en uranium des formations rocheuses. Le seuil de 7 ppm d'uranium est mentionné dans ce document comme la limite au-delà de laquelle une roche est susceptible d'émettre du radon en quantité supérieure à 400 Bq/m³.

Les annexes 1 et 2 décrivent en détail les zones de prélèvement de roche. L'objectif de mener de front les campagnes de mesure de l'activité radon dans les sols et les prélèvements de formations géologiques pour analyse chimique de l'uranium et du thorium, n'a pu être mis en place pour des raisons de disponibilité des intervenants.

La préparation des échantillons de roche et les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire du BRGM. Les échantillons ont été séchés à 105°C, puis broyés grossièrement et quartés. Ils ont ensuite été broyés à 80 µm (selon le Mode Opérateur 215 interne du laboratoire BRGM) et mis en solution par attaque tri-acide (nitrique, sulfurique et perchlorique). L'analyse a été effectuée au moyen d'un Spectromètre ICP (Inductively Coupled Plasma) couplé à un spectromètre de masse de type Thermo Plasma- Quad 3 (Mode Opérateur 080 du laboratoire BRGM). Le seuil de détection pour l'uranium est de 0,1 mg/kg et de 1 mg/kg pour le thorium.

2.2. MESURE DES ACTIVITES EN RADON-222 DANS LES GAZ DES SOLS

L'analyse dans les sols de certains gaz libres tels que le radon, l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'hélium, permet de détecter des anomalies de fuite associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre (failles, points d'émissions magmatiques et de fumerolles) et à des flux d'énergie (Baubron et Sabroux, 1984 ; Klusman et Jaccks, 1987). Le radon ²²²Rn, gaz rare quasi inerte chimiquement, ne diffuse en effet pas latéralement, contrairement à l'hélium et au CO₂. La méthode de prélèvement utilisée est celle utilisée au BRGM depuis près d'une trentaine d'années (ex. Toutain et Baubron, 1999) : dans un premier temps un micro-forage (1 m de profondeur, 1 cm de diamètre) est réalisé à l'aide d'un perforateur, permettant la mise en place d'une canne de prélèvement en cuivre dans l'orifice ainsi réalisé. Le respect de cette quasi-constance de la profondeur de forage permet donc de comparer des jeux de données acquises dans des conditions identiques. De plus à cette profondeur l'influence de l'atmosphère (pression, température, hygrométrie,...) s'atténue (ex. Beaubien et al., 2003; Flechard et al., 2007; Hamada and Tanaka, 2001; Vodnik et al.,

2006). Suite à la mise en place de la canne de prélèvement, un analyseur de gaz (CO₂, CH₄, O₂) par absorption infrarouge non dispersive de type LFG20 (ADC Gas Analysis Limited, UK) est connecté (figure 3). Ici ce n'est pas la mesure de ces trois gaz qui a été recherchée, mais l'appareil a été utilisé comme dispositif actif de pompage (débit régulé de la pompe interne du LFG20 : 200 ml par minute), permettant également de s'assurer d'un échantillonnage sous conditions stabilisées en régime permanent (atteinte d'une lecture pérenne des teneurs en CO₂ et O₂). Dans des conditions normales, l'atteinte de cette stabilité intervient environ au bout de 60 secondes. De plus, le faible débit de pompage autorise un échantillonnage à la pression atmosphérique, excluant de fait des calculs de corrections sur les mesures obtenues.

Cette procédure permet donc un échantillonnage reproductible du radon ²²²Rn, isotope radioactif produit naturellement par la désintégration du radium, lui-même provenant de la chaîne de désintégration de l'uranium 238. La détection de ²²²Rn peut alors indiquer la présence d'un flux de différents gaz provenant de la profondeur et migrant vers l'atmosphère par phénomène d'advection. Etant donné sa courte période radioactive (3,82 jours), le radon détecté dans les sols lors des mesures a une origine de proche surface, mais indique la présence d'une zone marquée par des processus d'advection forts. De plus, les roches n'ont naturellement pas les mêmes teneurs en uranium (cf § 3.4). L'émission de radon est fonction de la nature du substratum, son transport vers la surface étant plus ou moins rapide selon la perméabilité des terrains traversés (fissuration, fracturation), la nature et le flux du fluide porteur (gaz, eau, vapeur d'eau).

Les prélèvements, réalisés à profondeur quasi constante, peuvent donc permettre de détecter une "anomalie radon", zone à exhalation plus importante que le bruit de fond local en surface. Pour ce faire, les échantillons sont collectés (Figure 1) dans une fiole scintillante sous vide tapissée de sulfure de zinc dopé à l'argent (volume 120 ml). Compte tenu de la période extrêmement faible du ²²²Rn, le comptage par scintillation doit impérativement se dérouler entre 3 et 6 heures après le prélèvement, selon un cycle de 180 secondes. Ce délai est nécessaire d'une part pour atteindre l'équilibre dans la fiole et d'autre part pour permettre la disparition d'autres isotopes du radon émetteurs alpha à très courte période (²²⁰Rn, T_{1/2} = 55,6 secondes; ²¹⁹Rn, T_{1/2} = 3,96 secondes).

La méthode de comptage employée est basée sur la scintillation : les particules alpha, générées par la désintégration du radon et de ses descendants, cèdent leur énergie au milieu scintillant sous forme de photons, qui sont détectés grâce à un photomultiplicateur (compteur alpha de type "Calen" – Algade®). La mesure de concentration en ²²²Rn se traduit par un comptage des particules alpha présentes dans un certain volume de gaz du sol. Ramenée à un volume unitaire, elle s'exprime en Bq/m³. Le bruit de fond du photomultiplicateur est inférieur à 0,2 coups par heure, la reproductibilité des mesures étant meilleure que 0,1%.

L'expression des résultats se fait selon la formule suivante :

$$A = \frac{(N - B)}{60} \times \frac{1}{3} \times \frac{100}{60} \times \frac{1}{V}$$

avec A = activité volumique en Bq/m^3 ;

N = résultat du comptage de la fiole, exprimé en impulsions par minute ;

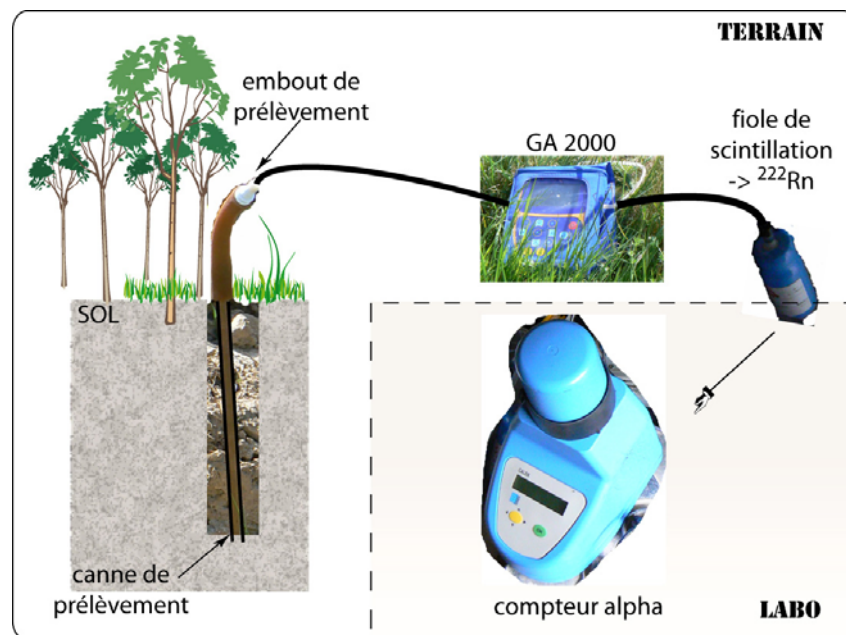
B = résultat du comptage du bruit de fond de la fiole, en impulsions par minute ;

$1/3$ = après 3 heures, présence de 3 émetteurs alpha dans la fiole pendant le comptage ;

$100/60$ = rendement pratique moyen des fioles scintillantes ;

V = volume de la fiole en m^3 , soit $120 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.

Il est à noter que malgré la profondeur requise pour le micro-forage, les résultats liés à ces procédures d'échantillonnage peuvent être perturbés par des fluctuations rapides de la pression atmosphérique et par des variations brutales de la teneur en eau des sols sous l'effet des pluies. En outre cette méthode est prévue pour l'échantillonnage des sols ; en l'absence de sol (roche brute), des biais peuvent se produire.



Canne de prélèvement, analyseur infrarouge portable (GA2000 ou LFG20), dispositif de prélèvement pour collecte et analyse postérieure du radon (fiole et compteur alpha).

Figure 3: Dispositif de mesure sur le terrain

2.3. MESURE DU RAYONNEMENT GAMMA

Un scintillomètre (compteur de photons) γ et X de terrain, de type SPP2NF a été utilisé

- dans l'Estérel sur les sols et les affleurements en proche voisinage des points de prélèvement de gaz (donc de radon)
- en Champsaur sur les roches analysées pour leurs concentrations en uranium et thorium

Une gamme de 0 à 150 coups/seconde a été utilisée dans les deux cas (sauf exceptions pour lesquelles une gamme plus large de 0-500 c/s a été nécessaire).

3. Influence des teneurs en uranium des roches sur l'exhalation du radon (Synthèse bibliographique)

3.1. QUELQUES DEFINITIONS

3.1.1. Isotope

L'atome est constitué d'un noyau composé de protons, chargés positivement, et de neutrons, électriquement neutres. Autour de ce noyau gravitent des électrons, particules chargées négativement. Chaque atome se distingue donc par son nombre de protons, également appelé numéro atomique Z , le nombre de neutrons N et le nombre de nucléons (protons + neutrons) A . Le nombre de protons est égal au nombre d'électrons, ce qui assure la neutralité de l'atome. L'ensemble des atomes dont le noyau possède le même couple (Z , A) est appelé un nucléide ; un élément chimique correspond à l'ensemble des atomes de même numéro atomique Z . La cohésion des nucléons dans les noyaux atomiques est assurée par les forces nucléaires (interaction forte) qui sont attractives, intenses, indépendantes de la charge électrique et de faible portée. Au sein du noyau atomique, ces forces nucléaires attractives l'emportent sur les forces coulombiennes répulsives qui existent entre les protons.

Le mot isotope fait référence à la classification de Mendeleïev, présentée par son auteur en 1869, car pour un même élément chimique, il peut exister différents noyaux. En effet, si le nombre de protons est toujours égal à Z , le nombre de neutrons peut varier et on parle alors d'isotopes de l'élément chimique. Les isotopes sont caractérisés par le nombre de nucléons (protons + neutrons) A . On différencie les isotopes d'un élément X par la notation AX .

Les propriétés chimiques des isotopes d'un même élément sont identiques car ces isotopes ont le même nombre d'électrons. Par contre selon la configuration du noyau (c'est-à-dire la valeur de A et le rapport Z/A) les noyaux atomiques peuvent être stables s'ils contiennent un nombre suffisant de neutrons pour compenser la forte concentration de charges positives issues des protons.

3.1.2. Isotope radioactif

L'activité A_i d'un nucléide « i » est définie par :

$A_i = N_i \cdot \lambda_i$ où N_i est son nombre d'atomes et λ_i sa constante de désintégration, avec

$\lambda_i = \text{Log}2 / T_i$ où T_i est la demi-vie

La période de désintégration, période radioactive ou demi-vie est le temps nécessaire pour que la moitié de l'élément radioactif ait disparu par désintégration.

3.1.3. Radiation α

Il s'agit de l'émission d'un atome d'hélium (2 protons + 2 neutrons) accompagné de la libération d'une quantité donnée d'énergie. Ce rayonnement est arrêté par quelques centimètres d'air ou quelques μm de solide.

3.1.4. Radiation β

Les radiations bêta sont comparables, au niveau de la masse et de l'énergie, aux électrons mais peuvent avoir une charge positive ou négative (transformation d'un proton en neutron ou inversement). Les particules sont plus petites que les particules alpha et peuvent voyager jusqu'à un mètre dans l'air.

3.1.5. Radiation γ

Contrairement aux radiations alpha et bêta, il s'agit d'une radiation purement électromagnétique sans masse ni charge électrique. Les radiations gamma sont formées par des photons de haute énergie à fort potentiel de pénétration (des centaines de mètres dans l'air et 50 cm dans un solide).

3.1.6. Unité de mesure

L'unité de mesure de l'activité volumique de radon qui sera mesurée *in situ* est le Béquerel par mètre cube (Bq/m^3) représente la désintégration d'un atome (par exemple de radon) par seconde. On peut également trouver le pCi/l (soit $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

3.2. PHENOMENES PHYSIQUES ET CONTEXTES NATURELS CONTROLANT LE TRANSPORT DU RADON

3.2.1. Pouvoir d'émanation

L'élément source du radon, l'uranium, est constitutif de certains cristaux des roches. Dans le milieu clos de la roche la chaîne de désintégration de ^{238}U conduit au ^{226}Ra , l'élément père du ^{222}Rn . Celui-ci étant un gaz, il peut s'échapper du grain où se trouve le radium dont il provient. Cette sortie du grain, ou émanation, peut se faire par deux mécanismes :

- l'énergie de recul direct (ou indirect) lors de la désintégration ; cette énergie est de 10 keV et correspond à une distance de 3.10^{-6} cm dans un solide : il est alors éjecté du grain
- la diffusion : la différence de concentration est alors le mécanisme induisant le déplacement (loi de Fick). Il s'échappe lentement du grain parce qu'il y a une plus forte concentration de radon dans le grain que dans l'espace « libre » entre les grains. C'est la fraction la plus importante de l'émanation.

Ce pouvoir (ou coefficient) d'émanation (rapport de la quantité de radon sortant du grain sur la quantité de radon produit) est de l'ordre de 5% pour le radon mais varie en fonction des roches (jusqu'à 50%). Deux facteurs vont principalement l'influencer :

- la concentration en uranium de la formation géologique
- la taille du grain dont l'effet sera inverse : plus le grain est de grande taille moins le radon parviendra à sortir facilement (Baixeras *et al.*, 2001)

Le taux de production, lui, représente le nombre d'atomes de ^{222}Rn produits par unité de temps et de volume d'espace interstitiel, et libres de migrer dans le milieu poreux.

3.2.2. Exhalation

Ce terme a souvent été confondu, y compris dans des rapports BRGM, avec l'« émanation » (voire avec l'émission) comme cela a été noté par l'IPSN (Ielsch, 2005).

Après la sortie du grain quantifiée par l'émanation, le radon va poursuivre sa migration dans l'espace interstitiel du sol, rempli de gaz ou de liquide, par diffusion moléculaire, et par écoulement du fluide interstitiel vers l'extérieur. Si les pores sont en continuité, il s'échappera complètement de la roche. C'est au niveau de l'interface roche - atmosphère ou à faible profondeur que s'effectue la plupart des mesures. L'exhalation est assimilable à un flux où ce serait l'activité des atomes de Rn qui est rapportée à l'unité de temps et de surface. Son unité est le en Ci ou le $\text{Bq}/\text{cm}^2.\text{sec}$.

En toute rigueur, ce qui sera mesuré dans les sols, lors de cette phase II de l'étude, ne sera ni l'émanation, ni l'exhalation mais l'activité volumique (pCi/l ou Bq/m³). L'activité volumique peut être considérée comme une valeur instantanée d'exhalation ramenée à une unité de volume (et non de surface) au niveau du sol où s'effectue la mesure. L'émanation restera une caractéristique de la formation lithologique (en réalité du minéral) sous-jacente aux sols en place. Nous conserverons donc ce terme d'émanation quand il concerne l'effet direct de la concentration en uranium de la roche (susceptibilité d'émanation,...).

3.2.3. Advection, convection

Dans le sol, le mécanisme de transport du radon sera le même que dans la roche. La quantité de radon qui atteint l'atmosphère ne représente cependant qu'une infime partie du radon émis par les grains des roches. L'essentiel a disparu par désintégration radioactive pendant le parcours.

Le dégazage naturel de la terre produit un flux permanent, plus ou moins intense selon l'endroit, de gaz profonds (gaz carbonique, mais aussi méthane, hélium, etc.) vers l'atmosphère. Le radon est un gaz dense et inerte qui n'a pas de mobilité propre. Il ne peut être transporté de manière significative que par des vecteurs tels que l'eau ou les gaz des sols (y compris la vapeur d'eau dans la zone non saturée). Cette circulation par **advection** se fera dans des drains vers la surface du sol : zones fissurées, failles, conduits karstiques, galeries souterraines des anciennes mines, ... La température peut jouer un rôle en mobilisant les fluides depuis des zones plus chaudes vers les terrains superficiels par des **mouvements convectifs**.

Les vitesses de transport par ces moyens sont d'un à plusieurs ordres de grandeur supérieures à celle obtenue par seule diffusion (plusieurs dizaines de centimètres par heure à plusieurs dizaines de mètres).

3.2.4. Influence des conditions atmosphériques

L'étude de la **variation journalière** d'activité volumique de radon (et de thoron) montre que les valeurs les plus élevées sont obtenues dans l'intervalle diurne 2h – 7h. Selon Baciú *et al.*, 2005 et Kataoka *et al.*, 1992, il s'agit de la période de la journée où, en moyenne, la terre atteint son minimum thermique, notamment par rapport aux couches d'air supérieures qui sont alors plus stables et stratifiées. Avec le lever du soleil, le réchauffement plus rapide de la terre et les mouvements de convection thermique de l'air les valeurs mesurées d'activité volumique diminuent.

A l'**échelle saisonnière**, c'est en fin de saison sèche, quand l'humidité du sol est au minimum et pendant une période où les inversions thermiques de l'atmosphère sont longues et fréquentes que les activités volumiques de radon (et de thoron) sont les

plus élevées (en automne pour Bucarest selon Baciú *et al.*, 2005). La plus faible activité volumique du radon est enregistrée au printemps et en été lorsque la turbulence atmosphérique est élevée et que l'humidité du sol est grande. Pour le thoron l'activité minimum est enregistrée en hiver lorsqu'une couche significative de neige recouvre le sol pendant de nombreuses journées. Une épaisse couche de neige diminue les concentrations en radon et en thoron de l'atmosphère.

Des corrélations inverses ont été trouvées entre la **vitesse du vent** et la concentration en radon, thoron et leurs descendants près du sol (Baciú *et al.*, 2005) ; la densité de flux, quant à elle, augmente avec la vitesse du vent (Schery *et al.*, 1984). Inversement, la stabilité de l'atmosphère favorise l'élévation de la concentration en radon, thoron et leurs descendants.

La **couverture nuageuse** induit aussi une corrélation négative par rapport à la concentration en descendants du radon et du thoron en toute saison et en particulier de nuit. Ceci s'explique par le flux thermique réduit en provenance de la terre quand il y a des nuages et donc la moindre production d'inversions thermiques (Baciú *et al.*, 2005).

L'augmentation de la **pression atmosphérique** devrait provoquer une baisse du transfert des gaz des sols vers l'atmosphère (Schery *et al.*, 1982). Cependant Baciú *et al.* (2005) ne notent pas de corrélation très significative entre les descendants du radon et thoron et la pression atmosphérique.

Des corrélations statistiques inverses sont produites dans la documentation entre l'activité volumique du radon et la **température atmosphérique** (notamment pour la période de jour par rapport à la nuit).

Des corrélations positives significatives ont été trouvées entre les concentrations en descendants du radon et l'**humidité relative** de l'air. En effet il semble que l'augmentation de l'humidité tende à favoriser la liaison entre les particules aérosols et les descendants du radon (Baciú *et al.*, 2005).

Une synthèse bibliographique sur l'influence des paramètres hydroclimatologique a été réalisée par A. David (1990). Celle-ci soulignait l'importance de ces facteurs sur les mesures de concentration et de flux de radon. Les résultats des mesures présentés alors dans la documentation pouvaient présenter des fluctuations :

- de 10 à 200% selon la pression atmosphérique,
- 15% suivant la vitesse du vent,
- 15 à 20% selon la température,
- 50% suivant le taux d'humidité du sol.

Toute campagne de prospection radon doit tenir compte de ces variations pour l'identification d'éventuelles anomalies.

3.2.5. Rôle des failles et de la géomorphologie

L'influence du contexte géologique, en tant que facteur contrôle de la source du radon et de sa migration vers l'atmosphère, a été largement étudiée par les auteurs (cf. synthèse présentée par Ielsch et al. (2001)). Nous reviendrons plus en détails sur l'aspect « source » (teneur en uranium). Pour les autres paramètres géologiques, nous nous limiterons à la tectonique et à la géomorphologie. En réalité d'autres facteurs interviennent comme les circulations d'eau souterraine et les émergences d'eau minérale, les indices miniers, les galeries souterraines et autres conduits karstiques,...

Les **failles** sont les principaux drains qui permettent le dégazage de la terre. En outre, certaines d'entre elles ont déjà été utilisées par des circulations de fluides au cours de l'histoire géologique. Les zones faillées sont donc relativement enrichies en uranium, et possèdent un pouvoir d'émission de radon plus important que les roches encaissantes. Ainsi, à l'aplomb des failles, le flux de radon émis par le sol est d'un à plusieurs ordres de grandeur supérieur aux zones voisines, et forme donc une anomalie géochimique. La recherche de ces anomalies d'activité volumique (ou d'exhalation) du radon est précisément une méthode de détection des failles cachées. Le radon ne diffusant pas latéralement, contrairement à l'hélium et surtout au CO₂, il s'exprime en surface par des anomalies sous forme de bandes très étroites (Baubron et Sabroux, 1984). Il est donc tout indiqué comme moyen de repérage des failles.

La **géomorphologie** peut avoir un rôle significatif, notamment en terrain accidenté et montagneux comme cela a été signalé par Baubron (2000) pour la Corse. Le haut des pentes, leurs parties convexes et les crêtes constituent des zones où les échanges entre les sols (ou les formations lithologiques) et l'atmosphère sont facilités (phénomène de ventilation). L'activité radon aura donc tendance à y être diluée alors qu'inversement, dans les vallées et parties concaves des pentes, le flux de radon sera relativement concentré.

L'intérêt des mesures de radon dans les sols réside dans la recherche des variations significatives plus représentatives des anomalies que les valeurs en elles-mêmes.

3.3. RAPPELS SUR LE RADON

3.3.1. Isotopes du radon

Le radon est un gaz rare (ou noble) donc chimiquement inerte. Il est incolore, inodore, et lourd (sa densité est de 9,73 à 273°K).

C'est un gaz radioactif existant à travers trois isotopes dont l'abondance respective dépend de l'abondance des éléments sources.

- Le **radon 219** (^{219}Rn) ou **actinon** (figure 6): provenant de la chaîne de désintégration de l'isotope radioactif de l'uranium ^{235}U , négligeable car peu abondant et période radioactive très courte (4 s).
- Le **radon 220** (^{220}Rn) ou **thoron**: provient de la chaîne du ^{232}Th , plus abondant mais de période radioactive courte (55 s).
- Le **radon 222** (^{222}Rn): provient de la chaîne de ^{238}U , de période radioactive plus longue (3,82 j) lui permettant de migrer des sols vers l'atmosphère.

3.3.2. Chaînes de désintégration des isotopes du radon

L'uranium 238 (^{238}U) est l'isotope majeur de l'élément U (plus de 99% de U naturel). Sa radioactivité conduit à sa désintégration progressive, avec une demi-vie de l'ordre de 4,5 milliards d'années. Comme ses descendants radiogéniques sont eux aussi radioactifs, il se crée une chaîne de désintégration, qui aboutit finalement à l'isotope stable ^{206}Pb .

Le radon (222) est un des descendants radioactifs de ^{238}U (figure 4), et se désintègre en une série d'autres éléments, qui sont des métaux. Du fait de sa période radioactive, tout le radon créé à un instant donné aura disparu au bout de 30 jours.

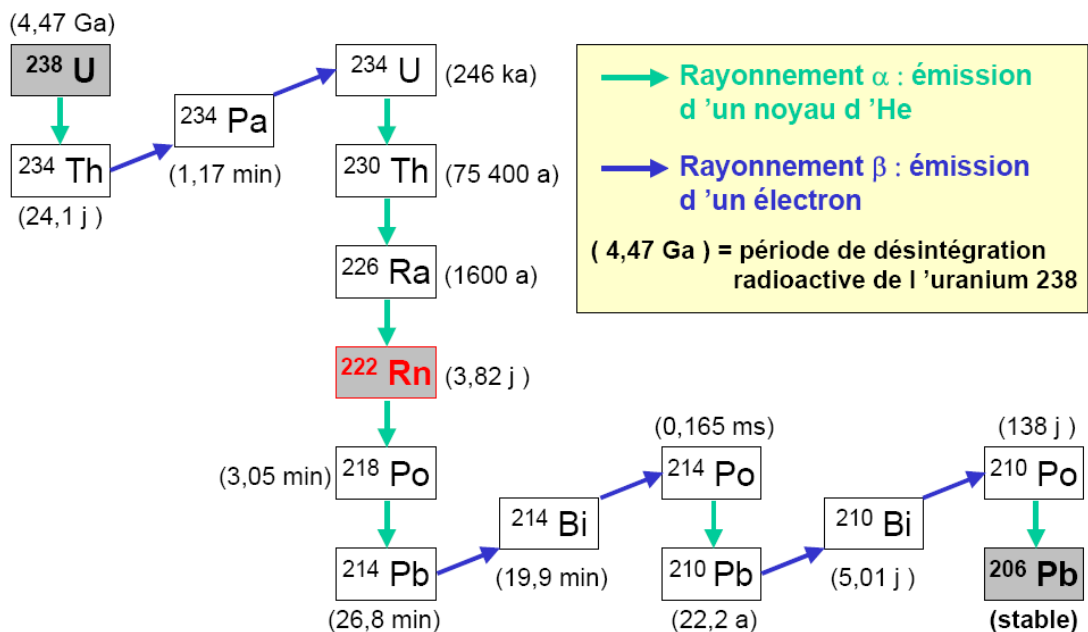


Figure 4: Position du radon (^{222}Rn) dans la chaîne de désintégration de l'uranium 238

Les isotopes radioactifs de la chaîne de ^{238}U les plus étudiés sont : ^{234}U (demi-vie $T = 246\,000$ ans), ^{230}Th ($T = 75\,400$ ans) et ^{226}Ra ($T = 1\,600$ ans). ^{230}Th est un isotope extrêmement minoritaire, la quasi-totalité du Th naturel étant représenté par l'isotope 232 (figure 5)

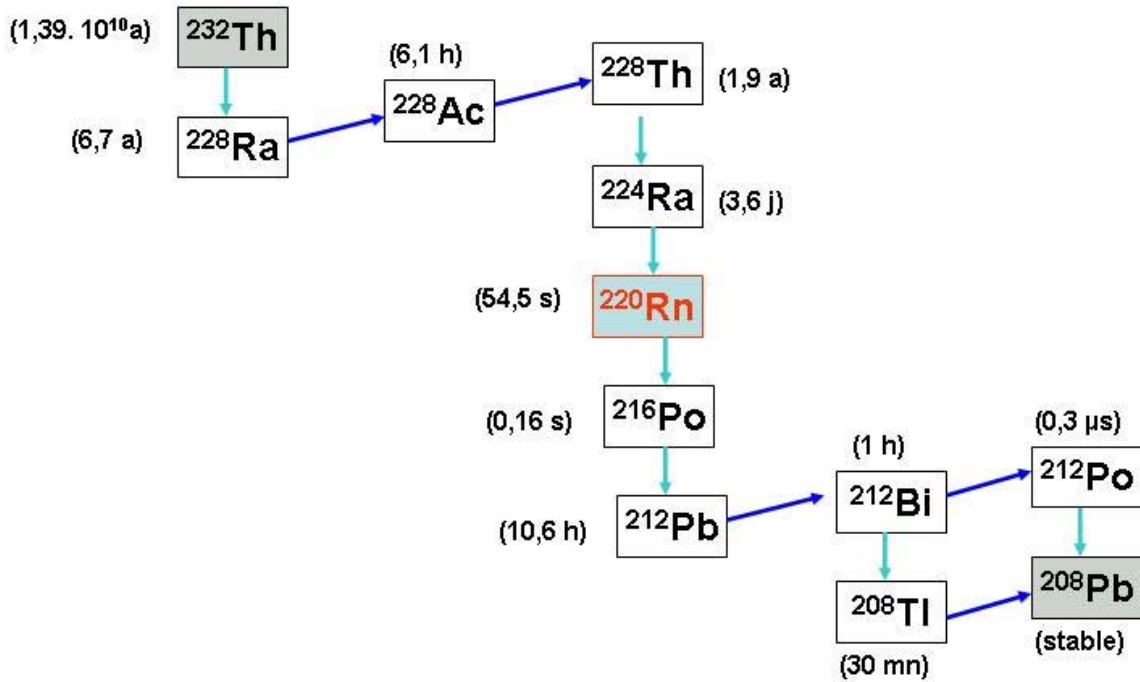


Figure 5: Position du thoron (^{220}Rn) dans la chaîne de désintégration du thorium 232

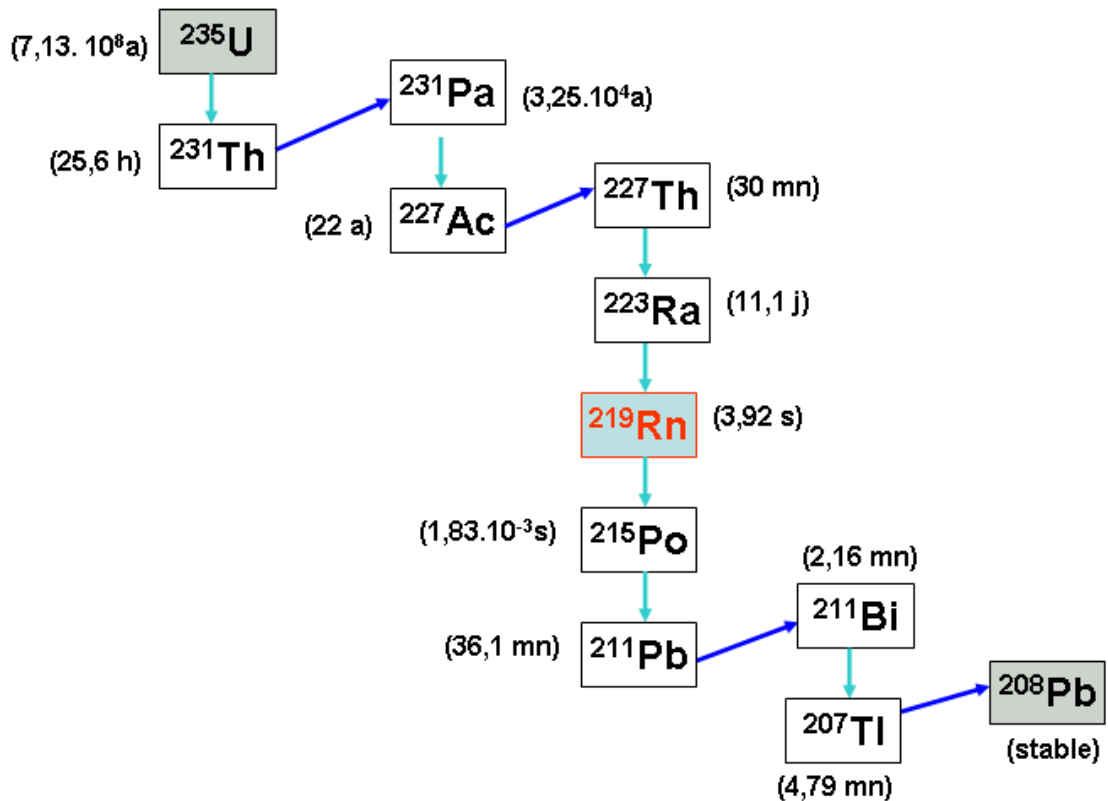


Figure 6: Position de l'actinon (^{219}Rn) dans la chaîne de désintégration de l'uranium 235

3.3.3. Spécificités du thoron

Le thoron ou ^{220}Rn ne sera pas mesuré dans cette étude et de manière générale son activité volumique est rarement mesurée. Cependant les études de dosimétrie effectuée sur le thoron et ses descendants (Schery, 1990) montrent que sa concentration potentielle d'énergie de particule alpha (CPEA) n'est pas négligeable (entre 1/3 et 1/5) par rapport à celle du ^{222}Rn . Le thoron est émis à partir du ^{224}Ra , lui-même issu de la chaîne de désintégration du ^{232}U (figure 5) et les concentrations en ^{226}Ra (parent du ^{222}Rn) et en ^{224}Ra sont comparables dans les sols mais deux facteurs vont limiter l'exhalation du thoron :

- sa durée de vie, 56 s, qui va limiter aux quelques cm supérieurs du sol la source potentielle de thoron dans l'atmosphère,
- la faible solubilité du thorium qui va freiner sa migration dans les eaux interstitielles.

On estime à 1/3 le coefficient d'émanation (part des atomes de thoron atteignant l'espace des pores). Le flux moyen de radon vers l'atmosphère étant de $1 \text{ atome.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, celui du thoron est estimé à $0,014 \text{ atome.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Mais cette estimation des flux ne reflète pas la réalité de l'activité volumique du thoron qui est plus importante au niveau du sol (Schery, 1990). Baciú *et al.* (2005) font état à Bucarest entre 1994 et 1999, d'une activité volumique moyenne de thoron de $0,72 \text{ Bq/m}^3$ (contre 10,4 pour l'activité volumique moyenne du radon). Ils signalent, en outre, qu'un ordre de grandeur sépare la concentration en thoron à 1 m du sol et celle mesurée à quelques cm du sol. Le gradient vertical de concentration du thoron est donc encore plus marqué que celui du radon.

Par conséquent, même sans mesure directe de l'activité volumique du thoron, les concentrations en thorium seront analysées afin d'estimer cette composante de l'aléa.

3.4. RAPPELS SUR LA GEOCHIMIE DE L'URANIUM

On a vu que l'uranium 238 était l'isotope radioactif source du radon 222. On trouvera donc du radon dans des milieux et matériaux naturels contenant de l'uranium. Cette corrélation permet ainsi de donner un ordre de grandeur : le seuil de 7 ppm d'uranium est considéré par Terrier *et al.* (2004) comme la limite au-delà de laquelle une roche est susceptible d'émettre du radon en quantité supérieure au minimum prescrit par les autorités sanitaires (400 Bq/m^3).

3.4.1. Roches éruptives et plutoniques

L'uranium se concentre dans les liquides magmatiques résiduels lors de la différenciation des magmas, accompagnant l'accroissement de leur teneur en silice. Ainsi, on trouvera plus d'uranium dans les granites, les rhyolites et autres roches endogènes différenciées que dans des gabbros ou des basaltes (tableau 1). Il y a beaucoup plus d'uranium dans la croûte terrestre, notamment continentale, soit les trente premiers kilomètres qui forment l'extérieur de la terre, que dans le manteau qui se trouve en dessous (où la concentration n'excède pas 0,5 ppm).

Il se concentre également dans les fluides hydrothermaux accompagnant ou prolongeant l'activité magmatique, comme ceux qui ont formé les minéralisations des filons (*cf* minéralisations en Pb, Zn, Cu, Ba de la faille cévenole *in* Lanini *et al.*, 2000).

Lithologie	Âge	Teneur en U moyenne (ppm)
Rhyolite	Pleistocène sup., Holocène	14,93*
Monzogranites, granodiorites	Viséen sup., Namurien	12,29
Monzogranites, granodiorites	Namurien, Westphalien, Stéphaniens	12,24
Leucogranites peralumineux	Stéphaniens	11,65
Grès, conglomérats, schistes, charbons	Permien	9,28
Rhyodacites, tuffites acides, ignimbrites	Viséen sup., Namurien	7,99
Rhyodacites, tuffites acides, ignimbrites	Stéphaniens	7,90
Monzogranites, granodiorites	Tournaisien, Viséen inf.	7,32
Phonolites	Pleistocène sup., Holocène	7,25*
Métagranites, orthogneiss	Briovérien sup., Cambrien	6,52
Paragneiss, Leptynites, Amphibolites	Briovérien, Cambrien	5,63
Basanites, hawaiites, benmoréites, téphrites	Pleistocène sup., Holocène	5,37
Rhyodacites, andésites, ignimbrites	Tournaisien, Viséen inf.	5,3
Trachyte	Pleistocène sup., Holocène	4,94*
Granodiorites, tonalites, quartzdiorites	Dinantien, Namurien, Westphalien	4,28
Trachyandésite	Pleistocène sup., Holocène	4,2*
Orthogneiss granitiques	Cambrien, Ordovicien inf. à moyen	4,1
Monzogranites, granodiorites	Dévonien moyen sup.	3,78
Migmatites paradérivées	Cambrien, Ordovicien	3,69
Ultrabasites, pérodotites, serpentinites	indéterminé	3,61
Micaschistes, paragneiss, quartzites	Briovérien, Cambrien, Ordovicien	3,49
Trachyandésite basaltique	Pleistocène sup., Holocène	2,74
Leptynites, amphibolites, élogites	Cambrien, Ordovicien	2,53
Basalte	Pleistocène sup., Holocène	2,12*
Basanite	Pleistocène sup., Holocène	2,09
Trachybasalte	Pleistocène sup., Holocène	1,9

Légende :

Roches magmatiques différenciées
Roches magmatiques basiques
Roches métamorphiques
Roches sédimentaires

Tableau 1 : Teneur moyenne estimée ou analysée (*) en uranium en fonction de la nature et de l'âge des roches endogènes et métamorphiques d'Auvergne (d'après Tourlière, 2007)

Enfin, comme le montre le tableau 1 et les mesures aéroportées dans le massif Armoricaïn (Tourlière, 2006), pour un même type de roche la concentration peut dépendre de la période géologique (âge).

3.4.2. Roches métamorphiques

D'après le tableau 1, la concentration en uranium des roches métamorphiques va dépendre à la fois :

- de leur origine : roche basique (amphibolite, ...) ou différenciée (orthogneiss,...),
- et de leur âge.

Cette différenciation en fonction de l'âge se retrouve également dans les formations lithologiques de Basse Normandie (Tourlière, 2006) et est également signalée au niveau de la France par Laville, 1999.

3.4.3. Roches sédimentaires

L'uranium, localisé dans certains minéraux lourds, peut se concentrer dans les produits d'altération proches des affleurements de roches endogènes différenciées (sables, grès, conglomérats,...)

L'uranium présent sous la valence IV dans les roches non altérées en profondeur est peu soluble dans les milieux peu oxygénés, réducteurs (concentration entre 0,1 ppb et 1 ppm).

Il aura alors tendance à précipiter dans des vasières, avec les argiles des parties les plus profondes des bassins sédimentaires,... et peut être associé à des minéraux sulfurés. En outre il est facilement piégé par la matière organique (acides humiques) et peut donc se concentrer dans des roches sédimentaires riches en matière organique (schistes bitumineux, psammites, ampélites,...). De faibles anomalies en radon ont ainsi été observées en Basse Normandie dans des grès et schistes riches en matière organique (Tourlière, 2002) et dans les Pays de Loire dans des schistes noirs ardoisiers (Béchenec, 1999).

Dans les milieux oxydants, l'uranium (IV) fait place à la forme plus stable de valence VI (ion uranyl, UO_2^{2+}). La tendance de l'uranium (VI) à constituer des complexes, en particulier avec les ions carbonates, hydroxydes, phosphates, fluorures et sulfates, augmente considérablement sa solubilité et sa mobilité dans les conditions supergènes (cf e.g. Langmuir, 1978)., La forte affinité de l'uranium pour les ions phosphates le conduit à se trouver associé aux concentrations des minéraux phosphatés.

Il y a, en général, très peu d'uranium dans les roches sédimentaires carbonatées, comme les calcaires, qui se sont formés en pleine mer. Par contre les argiles de décalcification des karsts peuvent atteindre une certaine concentration: activité radon comprise entre 100 et 400 Bq/m³ dans certains endroits du Lot (Delpont et Souchal, 2002) ou de la Haute-Garonne (Delpont, 2002). Andjelov (1996) signale des valeurs de plus de 30 000 Bq/m³ dans les sols de régions karstiques sans relation avec des valeurs élevées de la concentration en uranium. Cette anomalie est alors interprétée comme le signal d'un transport de radon dans les conduits karstiques. Des observations semblables sont reportées en Irlande.

3.4.4. Mesure de l'influence de la concentration en uranium sur l'activité volumique et l'exhalation radon

L'étude réalisée par Ielsch *et al.*(2001) présente plusieurs intérêts majeurs de notre point de vue :

- il s'agit d'un des rares cas d'étude à l'échelle régionale de mise en relation systématique de la teneur en uranium des roches et de l'activité volumique du radon dans l'atmosphère (voire de l'exhalation radon au niveau du sol)
- cette étude se fonde sur des analyses chimiques de roches et des mesures du radon. Si les secondes sont obtenues *in situ*, les premières proviennent d'une base de données et de la documentation. Cette approche se distingue des mesures aéroportées s'appuyant essentiellement sur une spectrométrie gamma d'où est déduite une « concentration équivalente d'uranium »,
- les terrains où ont été réalisés les mesures (granites hercyniens et leur cortège métamorphique et sédimentaire) n'est pas sans liens avec les zones sélectionnées dans notre étude (tant l'Estérel que le Champsaur ont été marqués par les formations hercyniennes).

Type de roche	Gamme de concentration moyenne en U (ppm)	Activité volumique du radon à 2m au-dessus du sol (Bq/m ³)			Densité de flux moyenne de radon au niveau du sol (mBq/m ² .s ¹)				
		Gamme	valeurs ≥ 100	Nb. de mesures	Gamme	Moyenne géométrique	Ecart-type	valeurs ≥ 100	Nb. de mesures
Granites hyperalumineux leucogranites	3-21	8-191	24%	10715	9-827	72,3	135,1	27,5 %	40
Granodiorites hyperalumineuses granites	2-8,5	6-81	0%	2873	27-69,5	43	13,5	0%	6
Orthogneiss et métagranitoides riches en U	0,5-14,5	19-156	20,5 %	3698	28-166,5	69,7	44,1	33%	15
Métasédiments	0-4,5	3-140	3,5 %	10574	11-194	28,2	43,3	6%	17
Dépôts quaternaires superficiels	0-4,5	2-185	13%	4192	9-86	36,8	25,1	0%	9
Roches sédimentaires tertiaires	0-4,5	8-72	0%	1051	13-31	20,3	9	0%	2
Amphibolites	0,1-1,5	51-104	11%	209					

Tableau 2 : Synthèse des résultats obtenus après comparaison croisée des analyses de lithogéochimie et de niveaux de radon en Sud Bretagne (d'après Ielsch et al., 2001)

Les conclusions de cette étude soulignent que la forte concentration en uranium est une condition nécessaire à l'obtention de niveaux de radon élevés. C'est le cas, ici, des granites hyperalumineux et des leucogranites dont la teneur en uranium dépasse 8 ppm. S'y ajoutent des granites subalcalins et, en Corse, un monzogranite leucocrate calco-alcalin. Les deux premiers groupes de granites sont assez répandus en France (Massif Central, Massif Armoricain, Vosges, Corse occidentale, et plus rarement dans les Pyrénées Orientales et dans les Alpes). Des niveaux très variés de radon sont cependant associés aux roches uranifères. Ceux-ci peuvent être reliés à

- des variations de faciès dans les corps granitiques,
- des zones faillées,

- la présence d'altérites associées à la fissuration du granite,
- l'influence des sols, en particulier l'horizon de subsurface.

Cette étude de Ielsch *et al.* (2001) présente néanmoins certaines différences avec l'approche que nous avons suivie.

Certaines d'entre elles peuvent provenir de la région étudiée elle-même : en Bretagne méridionale, les failles n'apportent pas une contribution significative à l'exhalation radon vis-à-vis de celle des formations lithologiques tandis qu'il est permis de penser que leur rôle sera plus significatif en tout cas dans le Champsaur. D'autres différences viendront de la méthode de mesure du radon :

- dans notre étude l'activité volumique sera mesurée dans le sol et sur un maillage ponctuel,
- elle l'a été dans l'atmosphère, à 2 m du sol, et en continu sur deux profils à partir d'un laboratoire mobile, pour l'approche de Ielsch *et al.* (2001). Ces mesures atmosphériques expliquent aussi pourquoi elles ont été menées de nuit.

Enfin, nous devrions éviter les données indirectes (base de données ou documentation) mais privilégier des analyses d'échantillons prélevés sur les terrains - mêmes où sera mesuré le radon.

3.4.5. Cas de la Corse

La partie hercynienne de la Corse présente des formations lithologiques du même type et du même âge que celles rencontrées dans l'Estérel. Il est donc intéressant de prendre les valeurs obtenues comme élément de comparaison.

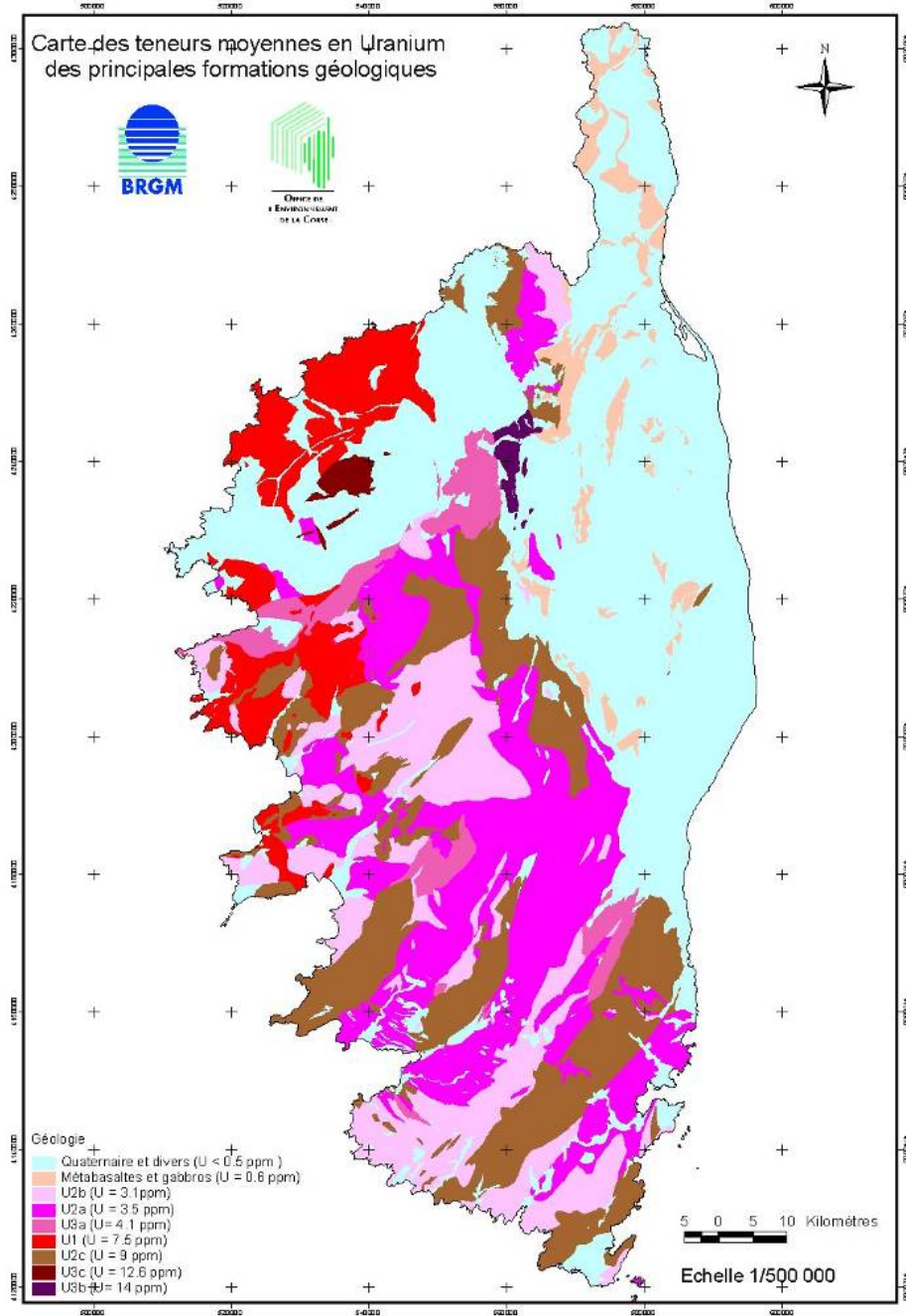


Figure 7: Carte des teneurs moyennes en uranium des principales formations géologiques de Corse (d'après Baubron, 2000).

Formation	Concentration (ppm) moyenne en uranium	Concentration (ppm) max. en uranium	Concentration (ppm) min. en uranium
Quaternaire, miocène et divers alpin	<0,5		
Métabasaltés et gabbros	0,6		
Monzogranite à grain moyen à gros (U2b)	3,1	7,2	2,4
Granodiorites à macrocristaux (U2a)	4,1	7,5	3,1
Granites hyperalcalins (U3a)	4,1	7,5	3,1
Plutonisme magnésio-potassique (U1)	7,5	16	3,6
Monzogranites leucocrates (U2c)	9	14,2	6,7
Granites perthitiques hyperalcalins (U3c)	12,6	15,5	7
Volcanisme différencié alcalin (U3b)	14	15,3	12,7

Tableau 3 : Teneurs moyennes, maximales et minimales en uranium des formations géologiques de Corse (d'après Baubron, 2000)

Les valeurs disponibles concernant l'activité volumique du radon mesurées dans les habitations au cours de plusieurs campagnes différentes (menées par au moins deux équipes différentes) ont subi sans doute quelques transformations par rapport à des mesures « homogènes » effectuées dans les sols par exemple.

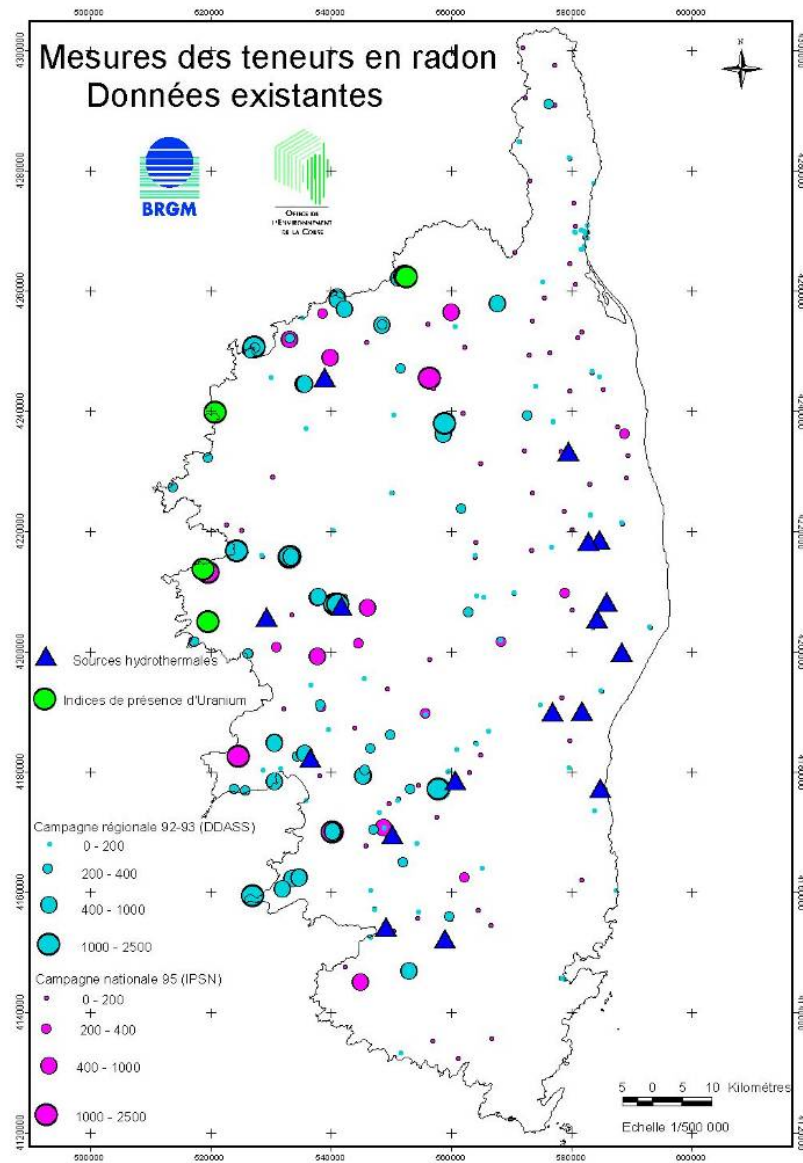


Figure 8: Mesures des concentrations en radon dans les habitations en Corse

Données DDASS1992-1993 et IPSN 1995, d'après Baubron, 2000.

Cependant la répartition spatiale obtenue (figure 8) correspond bien à la répartition des formations lithologiques classées selon leurs teneurs en uranium (figure 7). Les roches les plus uranifères (roches volcaniques différenciées, granites hyperalcalins, monzogranites,...) sont celles sur lesquelles les activités volumiques du radon sont les plus élevées. Inversement les sédiments quaternaires et tertiaires, les schistes et roches endogènes basiques de la partie alpine présentent à la fois de faibles teneurs en uranium et de faibles activités volumiques de radon. Les autres paramètres pris en

compte pour évaluer la « susceptibilité à l'émanation » radon ne semblent pas jouer un rôle déterminant. Il convient de noter néanmoins que plusieurs valeurs élevées mesurées coïncident avec des émergences d'eau minérale et que des alignements de fortes valeurs se retrouvent sur des failles (Baubron, 2000).

3.4.6. Géochimie du Thorium

Le thorium est, du point de vue géochimique, très proche de l'uranium. Tous deux

- appartiennent à la série des actinides,
- ont une configuration électronique similaire ($Z_{Th}=90$ et $Z_U=92$),
- sont sous un état d'oxydation tétravalent dans la nature,
- ont des rayons ioniques semblables (U^{4+} : 1,05 Å et Th^{4+} : 1,10 Å) et peuvent donc se substituer l'un à l'autre,
- sont concentrés dans les magmas différenciés par fusion partielle ou cristallisation fractionnée et incorporés dans les roches les plus enrichies en silice.

Le rapport Th/U reste assez constamment proche de 4 des basaltes aux granites.

Ces deux éléments sont en faibles concentrations dans les principaux minéraux silicatés (quelques ppm) constitutifs des roches. Par contre ils se trouvent concentrés dans des minéraux accessoires tels que les oxydes uraninite (UO_2) et thorianite (ThO_2), les silicates zircon ($Zr[SiO_4]$), thorite ($Th, U[SiO_4]$), sphène ($CaTi[OSiO_4]$) et allanite ($\{CaCe\}\{Al_2Fe^{2+}\}[O|OH|SiO_4|Si_2O_7]$), les phosphates monazite ($Ce, La, Nd, Th)PO_4$, apatite ($Ca_5[Cl|(PO_4)_3]$) et xénotime ($Y(PO_4)$).

Néanmoins tandis que l'uranium, dans des conditions oxydantes s'associe à d'autres ions solubles dans l'eau (*cf supra*), devient mobile, le thorium reste sous sa forme tétravalente dont les composés sont généralement insolubles. Le rapport Th/U des roches sédimentaires est similaire à celui des roches endogènes sauf dans les roches carbonatées où il s'abaisse vers 0,7. Cet enrichissement en U est dû à la coprécipitation de l'ion uranyl avec les carbonates (Faure, 1986).

Des analyses de thorium dans un contexte alpin – méditerranéen ont été réalisées en Slovénie (Andjelov *et al.*, 1996). Les concentrations varient entre 0,3 et 22 µg/g (ppm) avec une valeur moyenne à 8,47 µg/g. A titre de comparaison, les concentrations en uranium, faiblement corrélées à celles de thorium, se situent dans la gamme 0,11 à 17 µg/g avec une moyenne à 3,23 µg/g.

4. Zone Sud Estérel

4.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

4.1.1. Conditions météorologiques avant et pendant la campagne de terrain

Comme signalé ci-avant, il est important de se référer aux conditions météorologiques ayant prévalu lors des échantillonnages. En effet, l'exhalation des gaz est un phénomène dépendant des caractéristiques intrinsèques du sol mais également de facteurs extérieurs (pression atmosphérique, température, humidité du sol ; ex. Toutain et Baubron, 1999). En zones non actives, les processus d'émanation de CO₂ sont contrôlés par des processus de diffusion plutôt que par des processus actifs d'advection (ex. Jassal *et al.*, 2005), mais restent toujours sensibles au degré d'humidité des sols (Hinkle, 1991). Dans le présent cas, il n'a pas été procédé à des mesures de l'humidité des sols, seulement à des évaluations suite au percement des micro-forages, qui permettent uniquement de constater le caractère non saturé en eau des horizons de sols traversés lors du percement du micro-forage. En conséquence, une autre approche permettant d'évaluer indirectement le degré d'humidité des sols consiste en la consultation des banques de données météorologiques locales. En effet, une quantité non négligeable de précipitations est nécessaire pour changer de manière notable les concentrations de gaz dans les sols. Hinkle (1994) cite la valeur de 50 mm nécessaire pour modifier les teneurs en CO₂ à 70 cm de profondeur dans des sols hawaïens naturellement assez humides. L'échantillonnage peut donc être perturbé par les fluctuations de la pression atmosphérique et surtout par les variations brutales de la teneur en eau des sols sous l'effet des pluies.

Pour la zone Sud Estérel, des données météorologiques journalières suivantes ont été acquises auprès de Météo-France pour la station de Fréjus (tableau 4 ; position GPS WGS84 : 43°25'24" Nord ; 6°44'12" Est ; altitude 7m). Cette station ne disposant pas d'enregistrements permettant un calcul de l'évapotranspiration (ETP)⁴, il a paru opportun d'adjoindre, afin de cerner au mieux les évolutions orographiques rapides de cette zone, des données provenant d'une autre station Météo-France (Le Luc, figure 9, annexe 6) ainsi que d'une station amateur située à Draguignan (figure 9, tableau 5). Une représentation graphique des variations mensuelles des paramètres température, pression, humidité relative et pluviométrie est présentée en figure 10 (Fréjus, Draguignan) ainsi qu'en annexe 6 (Le Luc). Les températures moyennes relevées sont proches de la normale (moyenne sur trente ans sur la période 1971-2000), la fin du mois de mai (période d'échantillonnage) se révélant toutefois un peu plus chaude que

⁴ Par exemple l'ETP calculée selon la formule de Monteith (retenue par la FAO – United Nations Food and Agricultural Organization) nécessite la détermination conjointe des paramètres : radiations solaires nettes reçues en surface, flux de chaleur du sol, température moyenne de l'air, vitesse du vent.

la normale (annexe 6). L'ensoleillement est faible (80% de la normale), et les précipitations conformes à la moyenne sur 30 ans (proche de 65 mm). Le premier épisode pluvieux significatif est un événement d'environ 10 mm les 15 et 16 mai, faisant suite à un début de mois très sec. La première semaine de terrain n'est pas marquée par une pluviométrie significative (1 à 2 mm). Par contre, la seconde semaine est plus arrosée avec 27 mm mesurés à Fréjus.

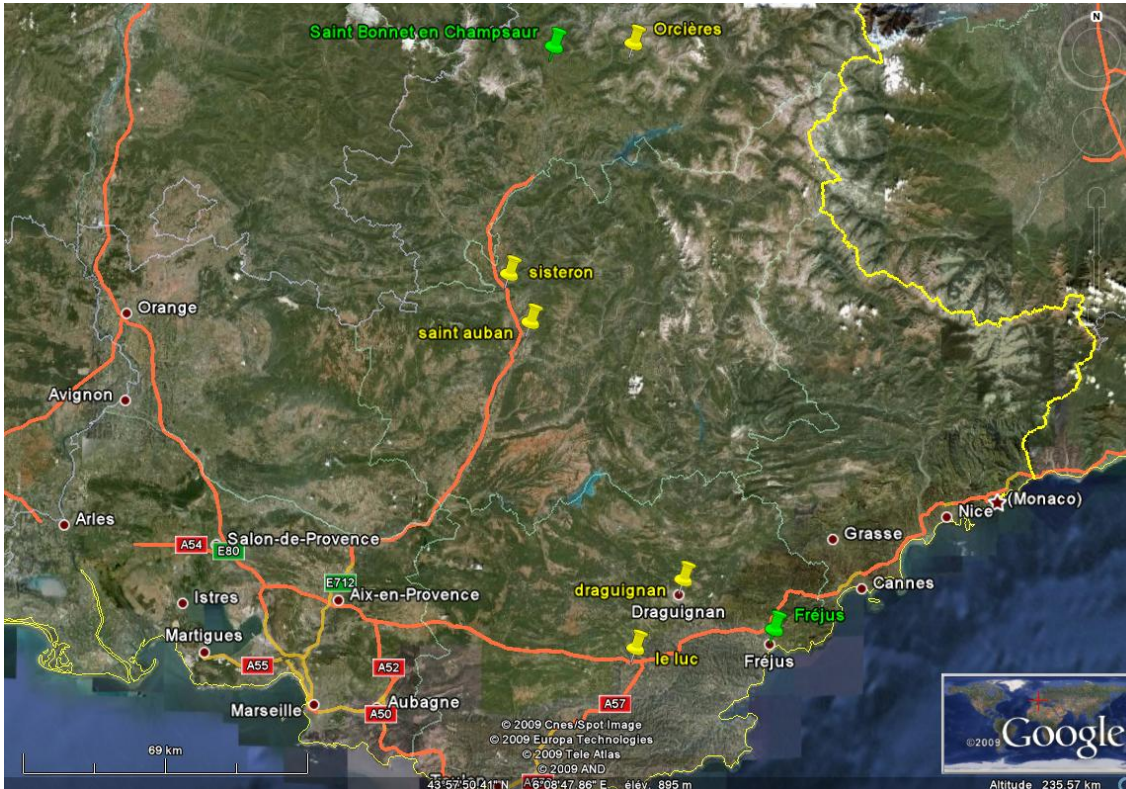


Figure 9 :Position des différentes stations météorologiques référencées dans le texte

(en jaune) ; en vert sont indiquées les principales localités appartenant aux zones Estérel (Fréjus) et Champsaur (Saint-Bonnet-en-Champsaur).

FREJUS	TN	TX	HR	RR
Nb. d'observations	31	31	26	31
Minimum	7,8	18,4	41	0
Maximum	21	27,4	86	20
1^{er} Quartile	11,65	21,4	63,75	0
Médiane	13,6	22,4	70,5	0
3^{ème} Quartile	15,5	23,4	76,75	1
Somme				65,6
Moyenne	13,69	22,58	69,38	2,11
Ecart-type	3	1,85	11,24	4,45
Coefficient de variation	0,22	0,08	0,16	2,1

Tableau 4: Paramètres météorologiques moyens de la station Météo-France de Fréjus

(43°25'24"N ; 6°44'12"E ; 7m) – période du 01 au 31/05/08 – TN, TX : températures minimale et maximale, en °C – HR : humidité relative en % – RR : précipitations en mm.

DRAGUIGNAN	TN	TX	HR_{min}	HR_{max}	P_{min}	P_{max}
Nb. d'observations	31	31	31	31	31	31
Minimum	7	17	29	44	999	1003
Maximum	22	26	83	94	1020	1025
1^{er} Quartile	13	20	42	77	1008,5	1012
Médiane	15	21	49	88	1012	1014
3^{ème} Quartile	16	21,5	68	88	1015	1016
Moyenne	15	20,9	54,7	81,4	1011,3	1013,6
Ecart-type	3,1	1,58	16	13	5	4,78
Coefficient de variation	0,21	0,07	0,29	0,16	0,005	0,005

Tableau 5: Paramètres météorologiques moyens de la station météo personnelle de Draguignan

(43,53°N ; 6,50°E ; 215m ;

<http://french.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp?ID=IDRAGUIG1>) – TN, TX : températures minimale et maximale, en °C – HR_{min}, HR_{max} : humidités relatives minimale et maximale, en % – P_{min}, P_{max} : pressions barométriques minimale et maximale, extrapolées au niveau de la mer, en hPa.

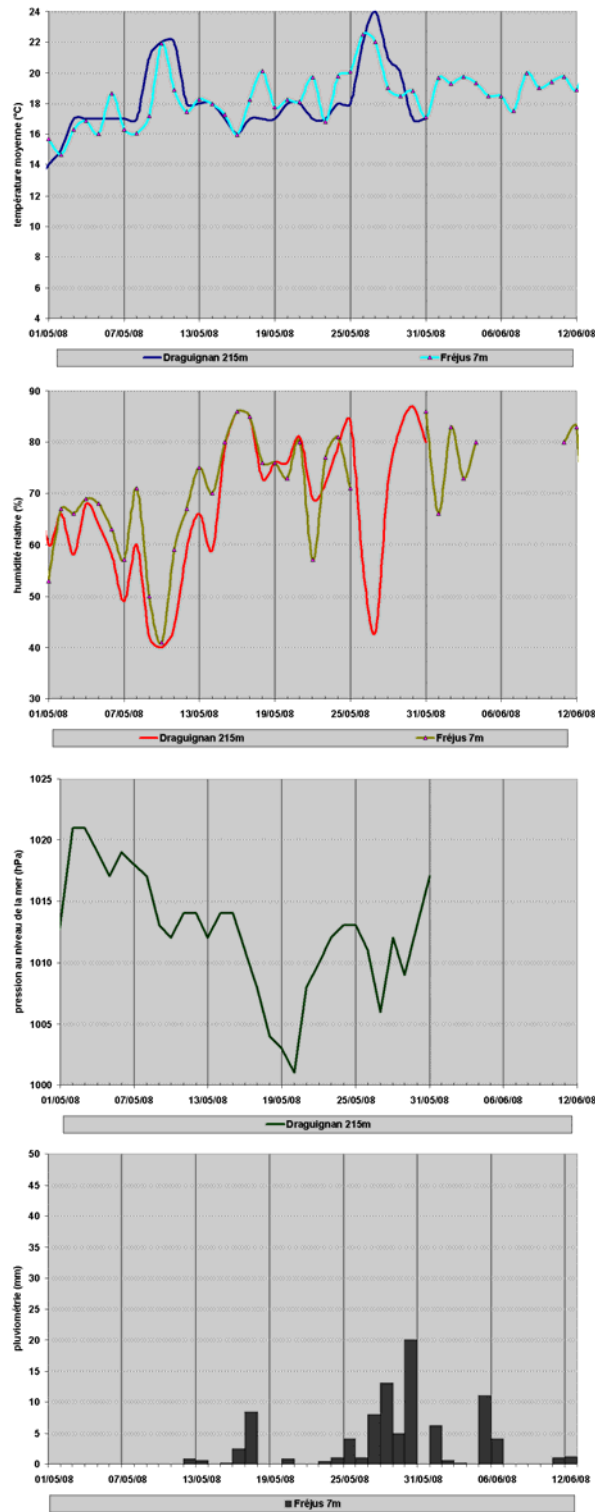


Figure 10 : Données météorologiques de mai-juin 2008 (stations de Fréjus et Draguignan) échantillonnage du 19 au 23 et du 26 au 30 mai.

4.1.2. Influence sur les mesures

Les données décrites précédemment indiquent donc une faible pluviométrie jusqu'au 25 mai. Même en l'absence de données d'ETP, il est donc possible d'affirmer que cette quantité d'eau n'est pas à même d'affecter significativement les mesures au cours de la première semaine de mesure.

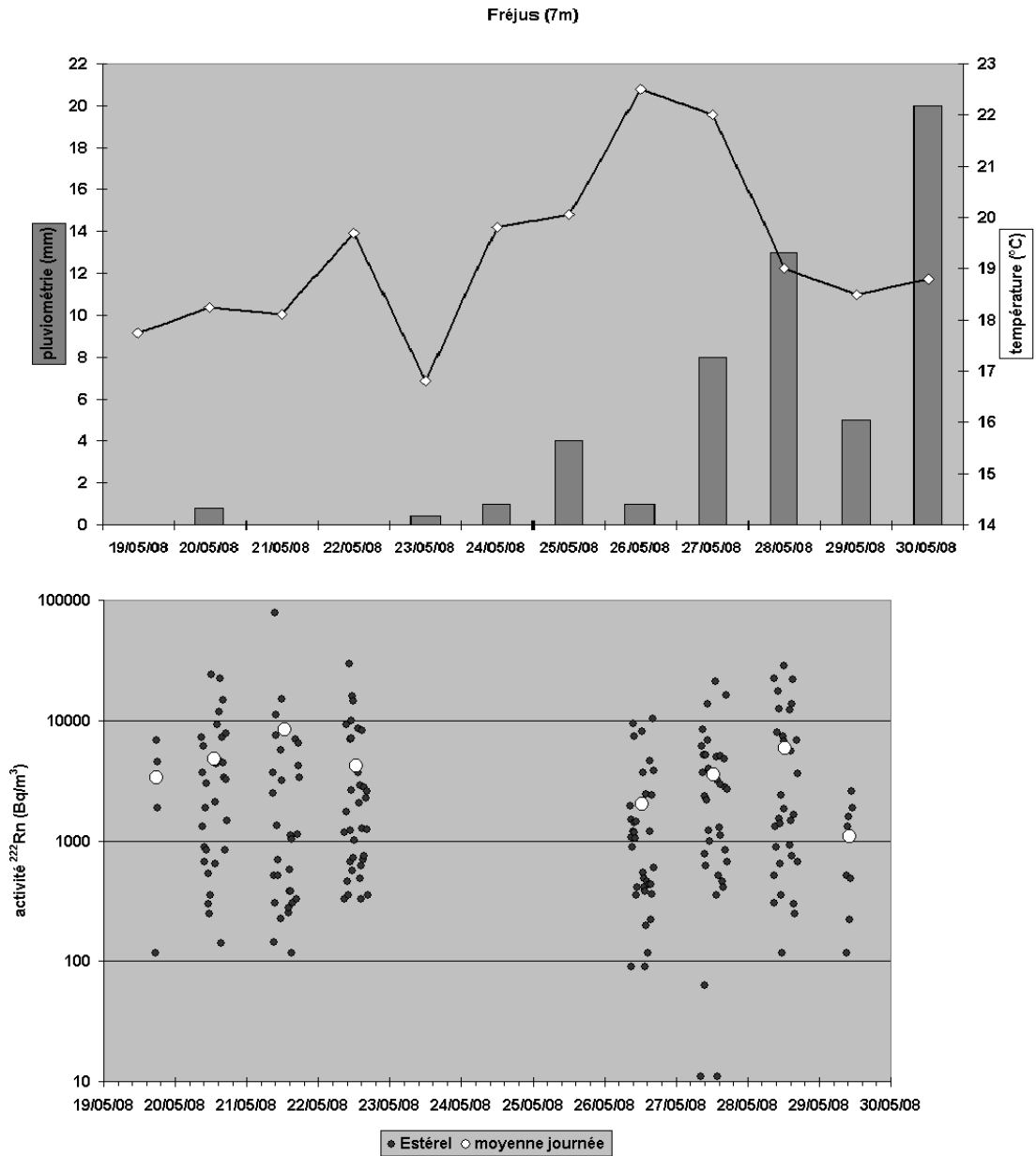


Figure 11 : Evolution des activités radon mesurées dans les sols en fonctions des conditions météorologiques externes – Estérel.

Pour la seconde semaine, le cumul, bien que plus significatif, reste inférieur aux 50 mm précédemment cités. Si une tranche d'eau a alors été disponible à l'infiltration, il paraît toutefois très hypothétique de considérer qu'elle puisse s'être infiltrée vers 1 mètre de profondeur, compte tenu de la nature fort sèche des sols rencontrée durant la première semaine. Une traduction de ce faible impact des conditions météorologiques sur les prélèvements réalisés transparait dans la figure 11, où ni l'amplitude ni la moyenne des activités radon mesurées dans les sols n'apparaissent directement liées aux variations de température et pluviométrie en surface. La variabilité des activités radon doit donc être préférentiellement attribuée à la nature du substratum rocheux et du sol sus-jacent, comme il sera vu dans les § suivants.

4.2. TENEURS EN RADON 222 DANS LES SOLS

4.2.1. Analyse statistique

Les activités en radon 222 s'étalent de 0 à 104 483 Bq/m³ (Tableau 3), la valeur moyenne étant proche de 4 500 Bq/m³. Cette activité moyenne est comparable à celle enregistrée au dessus du réservoir de CO₂ de Montmiral dans la Drôme (4 000 Bq/m³ ; Gal *et al.*, 2008a), et inférieure à celle mesurée à l'aplomb du champ pétrolifère de Pechelbronn (7 800 Bq/m³ ; Le Pierrès *et al.*, 2009) ou dans l'agglomération nancéenne (9800 Bq/m³ ; Gal et Fourniguet, 2008). Cette valeur moyenne n'apparaît donc pas anormale en regard d'autres sites, de surcroît situé en contextes sédimentaires *a priori* moins favorables à une genèse importante de radon. Rappelons que cette même valeur moyenne a été obtenue à partir de mesures effectuées généralement à une profondeur d'investigation de 1m sous l'interface atmosphère – sol. Les valeurs ainsi mesurées ne peuvent donc être comparées aux seuils de 400 et 1 000 Bq/m³ en vigueur pour les habitations et mesurées dans l'atmosphère.

Compte-tenu de la dureté des roches étudiées, près d'un quart des mesures n'ont pu être faites qu'à partir d'une profondeur d'échantillonnage inférieure ou égale à 50 cm. L'examen de la figure 12 montre que la profondeur d'échantillonnage a pu avoir une influence sur les mesures en dessous de 50 cm. Pour des profondeurs supérieures il n'est pas possible de conclure à partir de cette seule figure ; ce paramètre sera discuté plus loin (§ 4.4.1 et figure 18) en tenant compte de la nature des terrains traversés.

Enfin, les rayonnements quantifiés au moyen d'un compteur de photons SPP2, au voisinage des points de prélèvement en gaz n'apparaissent pas non plus comme indicateurs fiables des activités radon (figure 12). Le scintillomètre SPP2 ne prend pas en compte les particules alpha mais les rayonnements gamma. La figure 12 montre que le balayage surfacique « gamma » n'est pas un outil pertinent pour repérer les anomalies radon.

ESTEREL	Activité ²²² Rn (Bq/m ³)	Profondeur (cm)	SPP2 (coups)
Nb. d'observations	212	212	210
Minimum	0	20	35
Maximum	104 483	120	200
1^{er} Quartile	505	50	75
Médiane	1 357	70	100
3^{ème} Quartile	4 837	100	130
Moyenne	4 537	71,2	105
Ecart-type	10 084	25,6	35,4
Coefficient de variation	2,22	0,36	0,34

Tableau 6 : Statistiques descriptives (activité ²²²Rn, profondeur d'échantillonnage et rayonnements mesurés par scintillomètre SPP2) – Estérel.

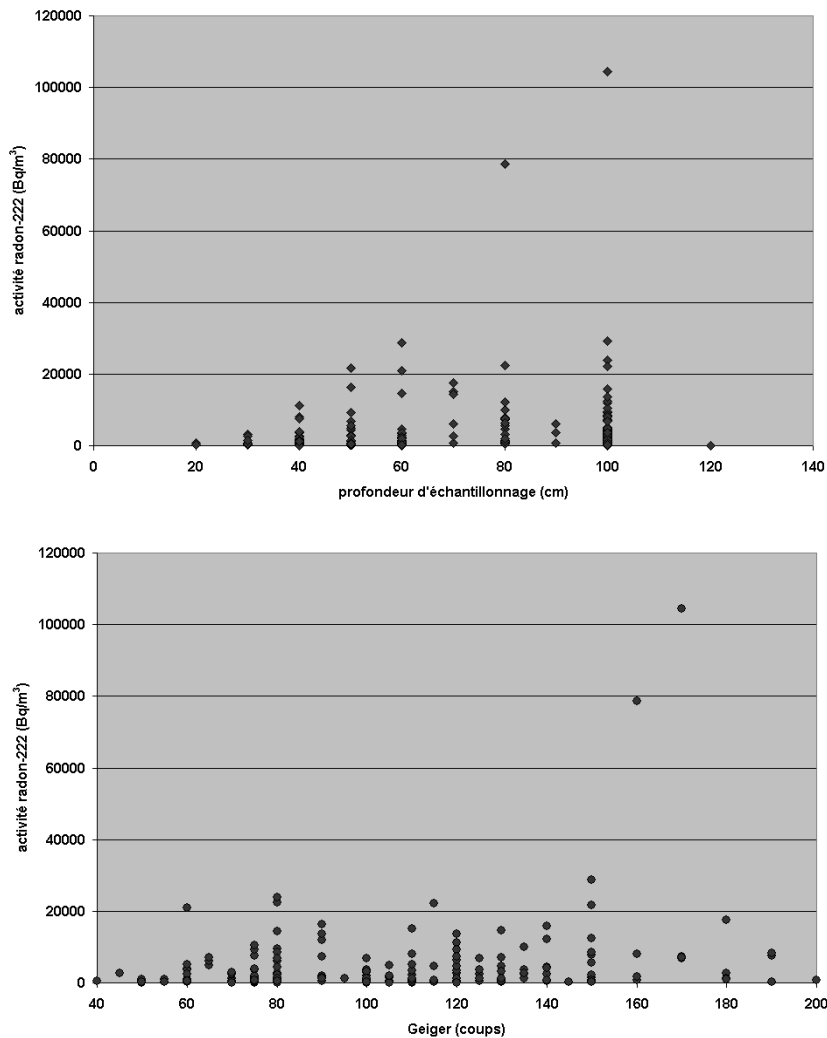


Figure 12 : Relations entre les activités radon et la profondeur d'échantillonnage (haut), et les mesures par scintillomètre SPP2 (bas).

4.2.2. Définition de seuils d'activité en radon

Pour le radon, il existe deux seuils légaux inscrits au code de la santé publique (Code de la Santé Publique – Partie Réglementaire – Surveillance des expositions au radon [article R.1333-15] et arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public) : l'un d'avertissement (400 Bq/m^3) et l'autre d'alerte ($1\ 000 \text{ Bq/m}^3$), mais uniquement pour des teneurs en atmosphère libre dans des lieux recevant du public. Dans le cas présent, les mesures étant effectuées dans l'atmosphère des sols si possible à 1 m de profondeur, ces seuils sont indicatifs et ne présagent pas des teneurs mesurables en atmosphère libre (pas de prise en compte des mécanismes de transfert profondeur – surface ; ex. Mäkeläinen et al., 2001).

La définition d'un seuil à partir duquel une activité radon sera considérée comme reflétant une "anomalie" peut s'obtenir en recourant à des calculs statistiques de fréquence de distribution. La définition d'une anomalie s'entend uniquement pour individualiser certains secteurs géographiques ou formation géologiques présentant des activités supérieures à celles mesurées alentour, et n'a aucune vocation à être transposée pour les seuils d'alerte pouvant potentiellement être atteints dans une atmosphère d'un patrimoine bâti. Cette précision faite, l'ensemble des activités radon mesurées ont donc été traitées sous le logiciel statistique XLSTAT (tableau 7). Il apparaît que 40% des mesures sont inférieures au seuil d'alerte de 1000 Bq/m^3 , et ce bien que les mesures soient faites dans les sols. Mieux, les trois quarts des activités sont inférieures à $4\ 000 \text{ Bq/m}^3$, ce qui range les sols de l'Estérel dans des formations peu riches en radon⁵. Seuls 2 points peuvent être qualifiés de nettement anomaux, présentant des activités supérieures à $40\ 000 \text{ Bq/m}^3$.

Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence (%)
0	400	42	19,81%
400	1 000	43	20,28%
1 000	4 000	67	31,6%
4 000	10 000	38	17,92%
10 000	20 000	13	6,13%
20 000	40 000	7	3,3%
40 000	80 000	1	0,47%
80 000	110 000	1	0,47%

Tableau 7 : Répartition des activités radon-222 dans l'Estérel.

⁵ Une nuance doit être apportée à ce constat, car nombre de prélèvements sont effectués à des profondeurs inférieures à 1 m, en raison de la faible épaisseur des sols dans l'Estérel. Ainsi ces mesures sont plus à rapporter à des mesures faites à l'interface sol/roche qu'à des mesures faites dans un sol.

4.3. TENEURS EN URANIUM ET THORIUM DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Les formations géologiques échantillonnées dans le massif de l'Estérel et ses zones limitrophes pour analyse en laboratoire des teneurs en uranium et thorium sont rappelées dans le tableau 8 et localisées sur la figure 1. Les résultats sont détaillées en annexe 5 et synthétisées dans le tableau 9.

Tous les échantillons récoltés ont donné un signal mesurable.

Statistique	Th (ppm)	U (ppm)
Nb. d'observations	19	19
Minimum	1,5	1,1
Maximum	23	6
1^{er} Quartile	4	2,2
Médiane	7	3,2
3^{ème} Quartile	11	4,85
Moyenne	8,53	3,34
Ecart-type	5,98	1,52
Coefficient de variation	0,7	0,46

Tableau 8 : Statistiques descriptives (teneurs en U et Th) – Estérel.

Les informations géologiques sur lesquelles nous nous sommes appuyées proviennent de la notice et de la carte géologique au 50 000ème de Fréjus – Cannes - 2^{ème} édition (Toutin-Morin et al, 1994).

Etude du potentiel d'exhalation du radon en en Moyen Champsaur (05) et Sud-Estérel (83)

Regroupement	Intervalle Radon	Intervalle Uranium	Notation 1/250 000 ème	Notation 1/60 000 ème	Lithologie	Type de roche	Age	Evaluation Rn Phase 1	Activité Rn moyenne (Bq/m ³)	Rn (min)	Rn (Max)	U (ppm)	Th (Thorium)	
Détritique récent	0 - 104 463	1,3 - 3,5	Ms	non représenté	Sables	formation superficielle		3, pas ou peu émettrice				1,3	3,7	
				Ez	Eboulis récents	formation superficielle	post-Würm		6300	116	104483			
			Fz	Fz	Alluvions, colluvions et dépôts marins récents	formation superficielle	post-Würm	3, pas ou peu émettrice	3979	0	16187	2,6	7	
			Fy	Fy	Alluvions, colluvions et dépôts marins	formation superficielle	Würm	3, pas ou peu émettrice	4504	987	8022	3,5	11	
			Fx	Fx	Alluvions de la moyenne terrasse	formation superficielle	Riss		37	11	63			
			Fw	Fw	Haute terrasse	formation superficielle	Mindel		8592	3682	13612			
			C	colluvions d'âge indéterminé	formation superficielle	Quaternaire								
Marnes zancloennes	3 962	3,2	p	p1	Argiles et marnes bleues marines	sédimentaire	Pliocène inférieur	1, pas ou peu émettrice	3962			3,2	11	
Microdiorite oligocène	117 - 1 222	1,2	EEg	à	Estérelite	volcanique	Oligocène	7, faiblement à moyennement émettrice	631	117	1222	1,2	1,8	
Volcanisme basique permien	117 - 9 923	2		F-a	Filons et autres roches basiques indifférenciées	volcanique	non situées stratigraphiquement		1383					
				1F	Filon de basalte doléritique	volcanique			516					
				3F	Filon de dolérite	volcanique			2430	300	9923			
			Dr	3AM	Dolérite (coulee de mugearite)	plutonique	Pemlien	5, faiblement émettrice	766	117	2685	2	9,4	
Rhyolites permiennes	90 - 28 632	3,6 - 4,9	Rr	110	Rhyolite fluidale aphyrique à sphérolites	volcanique	Pemlien	99, fortement émettrice	3026	142	9316	3,6	23	
			Rht	70	Rhyolite	volcanique	Stéphanois à Trias	99, fortement émettrice				4,9	12	
				80	Coulee de rhyolite	volcanique	Pemlien		236	90	382			
				60	Coulee de rhyolite ignimbritique	volcanique	Pemlien		5535	221	26632			
Volcano-détritique permien	0 - 78 610	1,1 - 2,8	r (1)	rMy	Arkoses, pélites, grès, calcaires lacustres (Fn du Muy)	sédimentaire	Pemlien	5, fortement émettrice				2,8	7,8	
			r (2)	rMl	Arkoses, pélites, grès, calcaires lacustres (Fn du Milan)	sédimentaire	Pemlien	5, fortement émettrice	2444	0	10410	1,1	19	
			r (3)	rPX	Arkoses, pélites, grès, calcaires lacustres (Fn des Pradineaux)	sédimentaire	Pemlien	5, fortement émettrice	6927	11	78610	2,4	19	
			r_Ba		Formation de Bayonne, ensemble de grès rosâtres; tufs volcaniques, cinérites				3118	143	17456			
			r_Am		Formation d'Ambon, brèche, grès feldspathique et tuffites, puis argiles rouges à septaria		Pemlien		3528	196	11187			
Détritique carbonifère	513	4,8	h	hA	Ensemble grés-schisteux, boghead, conglomérats (série d'Auriasque)	sédimentaire	Carbonifère	7, faiblement à moyennement émettrice	513			4,8	8,3	
			Maa3(b)(2)		Orthogneiss migmatitique (du Fournel et du Rioutard)	métamorphique	Primaire		3704					
Métamorphisme hercynien	248 - 22 183	1,7 - 6	Zae-a	Mra6	Gneiss supérieurs du Tanneron, domaine des migmatites (d'Auribeau)	métamorphique	Primaire	7, faiblement à moyennement émettrice	1013	696	1331	5,4	4,3	
			Zae	aa2 (non échantillonné)	Gneiss supérieurs du Tanneron	métamorphique	Primaire	7, faiblement à moyennement émettrice						
			Zae-B	aa2	Gneiss supérieurs du Tanneron (plagioclase à 2 micas). Gneiss du valon du Chemin Chametier	métamorphique	Primaire	7, faiblement à moyennement émettrice	6813	2487	14625	1,7	1,5	
				aa6(1)	Gneiss sombre à biotite et grenat	métamorphique	Primaire		11744	1305	22183			
				aaa(2)	Gneiss tantôt micaschisteux tantôt très feldspathique	métamorphique	Primaire		2587	248	7292			
			Al	aaA	Ortho-leptynites à grenats (des Adrets)	métamorphique	Primaire	5, fortement émettrice				5,2	3,3	
			1ae	myaa3	Gneiss ocellés, très micacés et illés de La Moure	métamorphique	Primaire	8, faiblement à moyennement émettrice mais à susceptibilité forte	2464	302	4526	6	6,9	
			1ae-a	myaa3	Gneiss ocellés, très micacés et illés de La Moure -St Aygulf	métamorphique	Primaire	8, faiblement à moyennement émettrice mais à susceptibilité forte				2,5	5,5	
			1ae-aB	myaa3	Gneiss ocellés, très micacés et illés de La Moure,	métamorphique	Primaire	8, faiblement à moyennement émettrice mais à susceptibilité forte				5,2	4,7	
			Zae-aB	Maa2-3	Gneiss supérieurs du Tanneron (des petites Maures), micacé à sillimanite	métamorphique	Primaire	7, faiblement à moyennement émettrice				4	2,8	
			D	non échantillonné	Amphiboïtes	métamorphique	Primaire	5, faiblement émettrice						

Tableau 9 : Répartition des formations lithologiques échantillonnées dans l'Estérel.

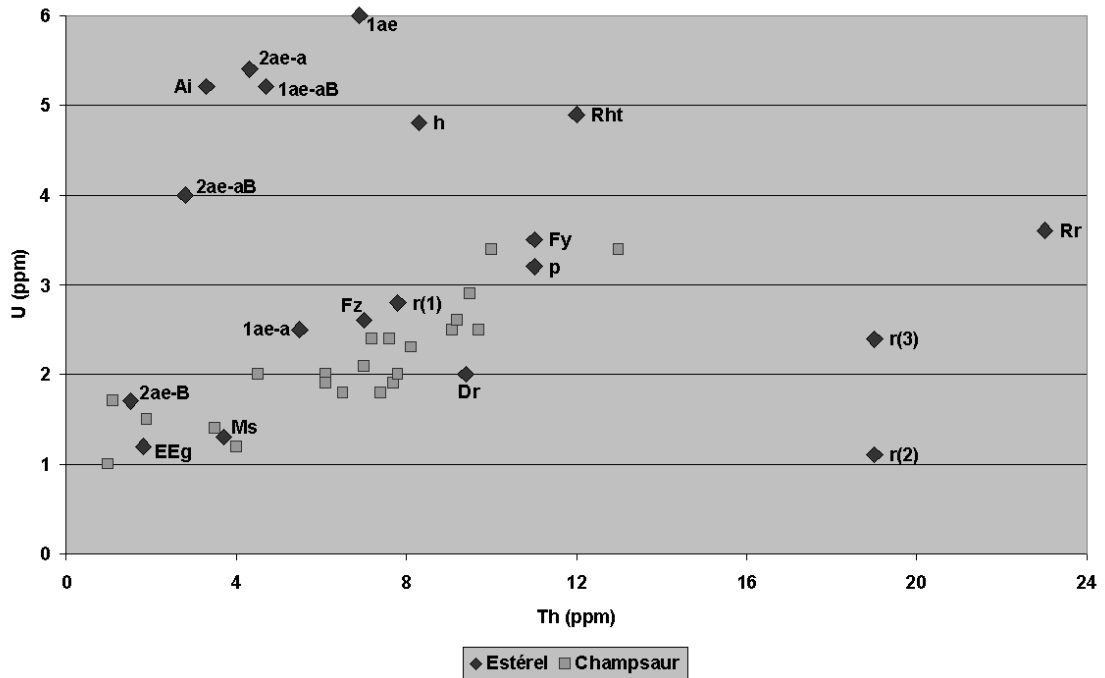


Figure 13: Teneurs en U et Th des formations de l'Estérel

Les étiquettes renvoient à la notation indicielle de la formation géologique (cf. annexe 5) ; les carrés grisé représentent, pour information, les valeurs déterminées dans le Champsaur.

La figure 13 met en évidence qu'une partie des formations conserve un rapport Th/U et des teneurs en U et Th intermédiaires, voisines de celles qui ont été analysées en Champsaur (cf figure 20): formations détritiques récentes et des termes magmatiques permien s.l. (dolérites et rhyolites).

Pour finir, signalons qu'aucune des formations de l'Estérel ne dépasse la teneur de 7 ppm en uranium, identifiée par Terrier et al. (2004) comme seuil pouvant conduire à l'existence en atmosphère d'habitation d'une activité radon supérieure à 400 Bq/m³ (cf. paragraphe 2.1).

Les teneurs en thorium analysées recouvrent une gamme très proche de celle (0,3-22 ppm) obtenues en Slovénie dans un contexte lithologique assez différent (Andjelov et al., 1996). Une évaluation des risques vis-à-vis de l'exhalation thoron (²²⁰Rn) et des teneurs limites en thorium reste à faire.

4.4. INFLUENCE DE LA NATURE ET DE LA REPARTITION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES SUR L'ACTIVITE RADON

4.4.1. Influence de la lithogéochimie

Formations du socle hercynien

Les formations de socle hercynien (gneiss du Tanneron [2ae-a, 2ae-B, 2ae-aB], gneiss de La Moure [1ae-aB] et leptynites [Ai]) présentent un rapport Th/U inférieur à 2 (figure 13). Cette faible concentration en thorium ne se retrouve pas dans les données fournies par Lucazeau et Mailhe (1986).

Les formations gneissiques, dont la plupart ont été reconnues comme clairement orthodérivées, ont des teneurs en U compatibles à celles que l'on trouve dans les orthogneiss d'Auvergne (Tableau 1) et du Sud Bretagne (Tableau 2).

La relation entre concentration en uranium (1,7 – 6 ppm) et activité radon (248 – 22 183 Bq/m³) est cohérente en gros : intervalle de valeurs plutôt élevées dans les deux cas. Plus en détail, cette relation devient plus complexe : la concentration la plus faible en uranium (1,7 ppm) correspond à l'intervalle d'activités radon le plus fort – 2 487 – 14 625 Bq/m³. Ce paradoxe s'explique sans doute en partie (mais pas seulement) par le nombre limité de coïncidences (3) entre mesure d'activité et analyse d'uranium.

Ensemble grésoschisteux carbonifère

L'ensemble grésoschisteux carbonifère du bassin du Reyran, intimement lié aux gneiss hercyniens, enrichi en matière organique (quelques veines de charbon) et comprenant des niveaux volcaniques à quartz, a pu préserver des conditions réductrices favorables (mise en place en milieu lacustre) à la concentration de l'uranium (*cf* § 3.4.3). La seule analyse réalisée donne une concentration en uranium de 4,8 ppm.

Cette valeur plutôt élevée en uranium correspond à une valeur plutôt basse de l'activité radon (513 Bq/m³). On peut attribuer cette valeur basse à la nature *a priori* peu perméable de ce niveau détritique.

Volcanisme basique permien

La dolérite (ou coulée de mugéarite) a une teneur en U relativement élevée par rapport aux autres roches magmatiques basiques examinées au § 3.4 (métabasalte de Corse ou amphibolite de Sud Bretagne) mais compatible avec d'autres basaltes alcalins d'Auvergne. La seule analyse réalisée donne une concentration en uranium de 2 ppm.

Les résultats obtenus sur la coulée de mugéarite (dolérite) associent sa concentration plutôt basse en uranium à une activité radon moyenne (117 à 2 685 Bq/m³).

Rhyolites permienes

Les rhyolites permienes se sont mises en place dans un contexte généralement distensif et appartiennent à une série alcaline sursaturée. Nos analyses mettent en évidence des concentrations en uranium et thorium relativement élevées mais variables, respectivement de 3,6 à 4,9 ppm (U) et de 23 à 12 ppm (Th). Lucazeau et Mailhe (1986) produisent des résultats très proches pour les teneurs en thorium (25 à 12 ppm) mais plus élevés pour l'uranium (respectivement 5,89 à 7,17 ppm).

Les deux rhyolites analysées se distinguent notamment par leur structure (annexe 1) : Rr est à dominante aphyrique, présentant des sphérolites (pyromérides) typiques d'une trempe en milieu aquatique tandis que les phénocristaux de quartz et de feldspaths alcalins sont bien exprimés dans Rht. Comme il l'a déjà été rappelé plus haut (*cf* § 3.4.6), l'uranium est plus mobile que le thorium en milieu aquatique oxydant. La structure de Rr et son mode de mise en place sont cohérents avec un appauvrissement relatif en U par lessivage. Les rapports Th/U contrastés (Rr appauvrie en U et pas Rht) pourraient donc s'expliquer, au moins en partie, par des phénomènes d'altération.

Les rhyolites voisines et contemporaines de Corse, également alcalines, sont d'ailleurs nettement plus riches en U (14 ppm en moyenne, *cf* Tableau 3). Quant aux granites subalcalins corses, de composition identique, Lucazeau et Mailhe (1986) indiquent des teneurs respectives de 7,6 et 38 ppm pour U et Th. Ces auteurs, constatant cette différence de composition des magmas entre Estérel et Corse, la relie à une différence de flux thermique mesurée (76 mW / m², en Corse contre 58,2 dans les Maures et l'Estérel).

La concentration en uranium de deux types de rhyolite a été analysée et l'activité radon a été mesurée dans trois sols à l'aplomb de formations volcaniques siliceuses permienes. Les deux opérations n'ont convergé que sur la rhyolite aphyrique et les résultats sont cohérents : valeurs moyennement élevées dans les deux cas (3,6 ppm et 142 – 9 316 Bq/m³).

Formations détritiques permienes

Ces formations rassemblées ont des concentrations en uranium comprises entre 1,1 et 2,8 ppm. Deux échantillons se détachent par leur rapport Th/U plus élevé (> 6, figure 13) : ils appartiennent aux formations détritiques permienes du Miton et des Pradineaux (r2, r3). Les formations à dominante gréseuses comprennent également, outre des dépôts d'origine volcanique, des argiles (parfois carbonatées) supposant une sédimentation en milieu aquatique, plus ou moins oxydant. Le lessivage qui l'accompagne a pu provoquer le départ préférentiel de l'uranium par rapport au thorium (*cf* §3.4.6). La formation du Muy (r1) se distingue des deux autres par sa plus faible teneur en Th.

La relation entre la concentration en uranium et l'activité radon, pour les mesures qui concernent les mêmes formations, n'est pas évidente en milieu détritique. La concentration en uranium analysée varie de 1,1 à 2,4 ppm, soit des valeurs plutôt

basses, tandis que le spectre des mesures d'activité radon sur les formations correspondantes, va de 0 à 78 610 Bq/m³, un des niveaux d'activité les plus élevés de la zone considérée.

Estérellite

L'estérellite (EEg) est aujourd'hui datée autour de 30 Ma (oligocène) et serait une expression magmatique calco-alkaline reliée à un épisode d'ouverture à l'arrière d'une subduction (Savelli., 2002). Ces différences d'âge, de contexte de mise en place et de chimisme expliquent sans doute que la microdiorite quartzifère, possède les teneurs en U (et Th) les plus faibles (1,2 ppm) non seulement parmi les 19 échantillons analysés dans cette étude mais aussi (pour U) parmi les roches magmatiques différenciées des régions considérées (Auvergne, Sud Bretagne et Corse).

L'activité radon qui a été mesurée à l'aplomb de l'estérellite (117 – 1 222 Bq/m³) correspond à sa concentration assez faible en uranium.

Marnes zancléennes

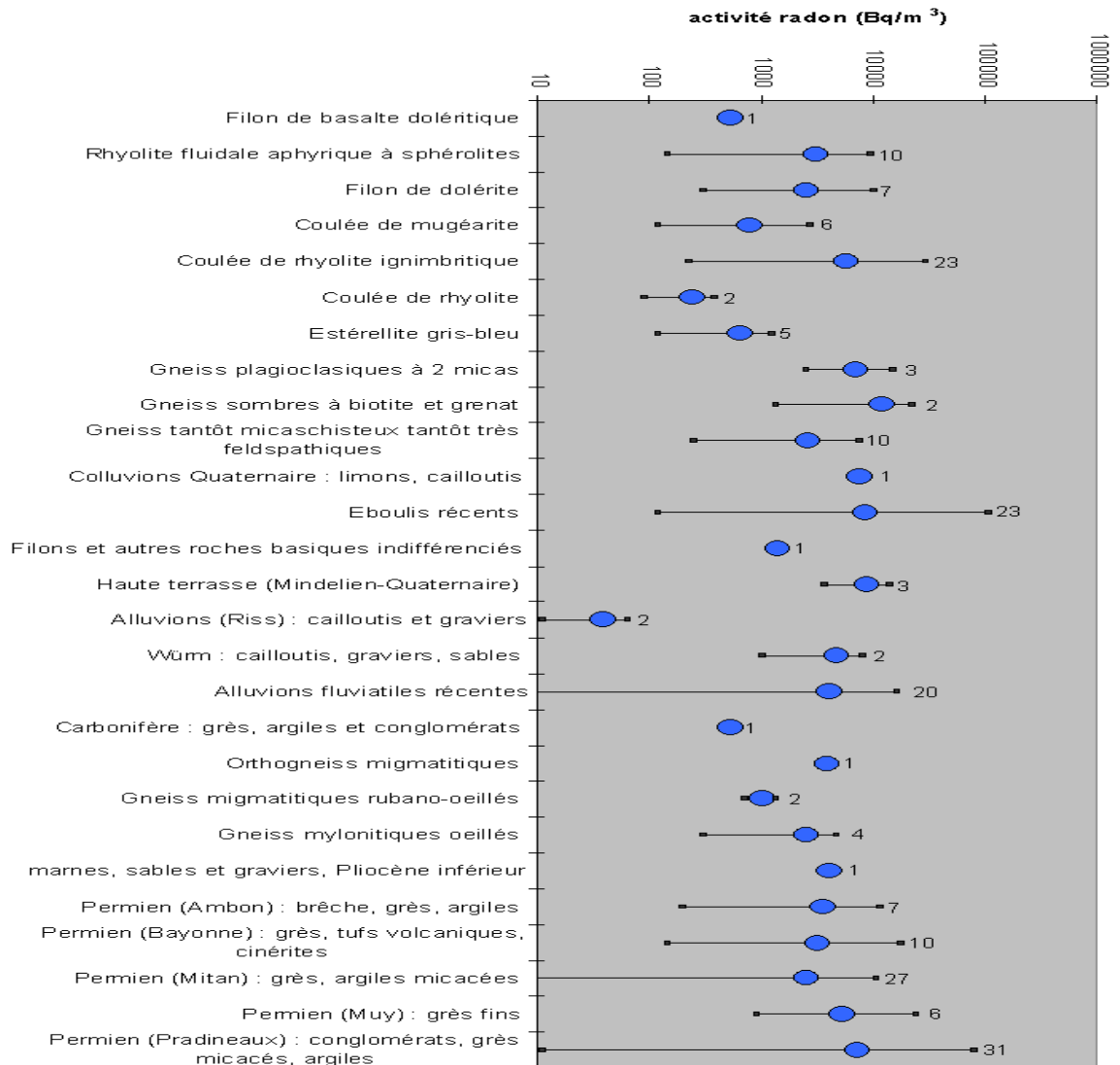
La teneur moyennement élevée en U (3,2 ppm) et Th (11 ppm) de ces sédiments marins reflète le contexte général de l'Estérel.

La seule mesure d'activité radon (3 962 Bq/m³) correspondante est cohérente avec la valeur de la concentration en uranium

Détritique récent

Ces formations de terrasses fluviales (Fz et Fy), d'éboulis et de colluvions récents rassemblent des éléments des différentes formations rocheuses précédentes et sont donc *a priori* chimiquement assez hétérogènes. En dehors des sables (Ms), leur niveau de concentration en uranium (1,3 – 3,5 ppm) est assez voisin des marnes zancléennes. Les sables résultant déjà d'un tri durant leur transport fluvial, éolien et marin, il est permis de penser que les minéraux lourds concentrant U et Th ont été séparés en plus grande partie de la phase sableuse.

Dans ces formations détritiques récentes l'activité radon atteint un spectre extrême de valeurs (0 – 104 483 Bq/m³). En se limitant aux formations où la concentration en uranium et l'activité radon ont été mesurées, la première conserve un intervalle étroit (2,6 – 3,5 ppm) quand la deuxième couvre une gamme assez large (0 – 16 187 Bq/m³).



Légende : les nombres indiqués à droite représentent le nombre de mesures radon réalisées dans les sols recouvrant la lithologie indiquée en regard. (NB : l'échelle des activités radon est logarithmique).

Figure 14 : Répartition de la gamme d'activité Radon en fonction des formations géologiques

En ne prenant en compte que la nature de la roche sous jacente et la mesure de radon du sol, on parvient (figure 14) à deux résultats peu informatifs :

- plus il y a d'échantillons plus la variabilité des activités radon est grande. Cette constatation concerne les différents types de roches et, donc, pas seulement les roches détritiques dont l'hétérogénéité est une caractéristique majeure.

Notons cependant qu'à nombre égal (et significatif) la roche détritique (éboulis récents) produit une variabilité supérieure à la roche magmatique (rhyolite ignimbritique).

- la plupart des moyennes se situent dans l'intervalle (1 000 – 10 000 Bq/m³). Comme il l'a été noté au § 4.2.1 la valeur moyenne des activités radon mesurées (4 500 Bq/m³) n'a rien d'anomale.

Au-delà de ces remarques, les activités radon les plus faibles coïncident avec les roches magmatiques basiques et certaines formations détritiques (alluvions Riss et ensemble grès-schisteux carbonifères). Les plus élevées se trouvent à l'aplomb de certaines formations détritiques (récentes ou permienne) et de grès hercyniens. Les rhyolites permienne sont reliées à des activités « intermédiaires ».

Ces observations doivent être complétées par les éléments suivants :

- nombre de profondeurs d'investigation n'ont pas pu atteindre le niveau de mesure de 1 m (figures 12 et 18), notamment dans les roches « dures », dépourvues de sol gneiss, rhyolites, basalte). Inversement dans les roches plus tendres (détritiques divers) la profondeur requise a été presque toujours atteinte. Ce biais a pu produire des mesures d'activité radon atténuées dans les roches dures (ici *a priori* davantage émettrices).

- la perméabilité du milieu rocheux joue un rôle important et les roches détritiques (en dehors des faciès schisteux et argileux) permettent mieux le transport du radon que les roches « cohérentes ».

- enfin la corrélation entre teneur en uranium et activité radon se vérifie pour toutes les formations (regroupées) non détritiques (figure 15) en relativisant par rapport au nombre de mesures considérées. En effet les formations détritiques et les sols sus-jacents ont été davantage échantillonnées que les roches « cohérentes ». Par ailleurs, au sein des formations détritiques certaines anti-corrélations peuvent s'expliquer. Les grès-schisteux carbonifères enrichis en uranium sont aussi moins perméables, donc moins favorables pour la migration du radon. Le volcano-détritique permien et le détritique récent sont souvent mis en place en milieu aquatique et sujets à altération, au départ possible d'uranium tout en restant perméables à la migration de radon.

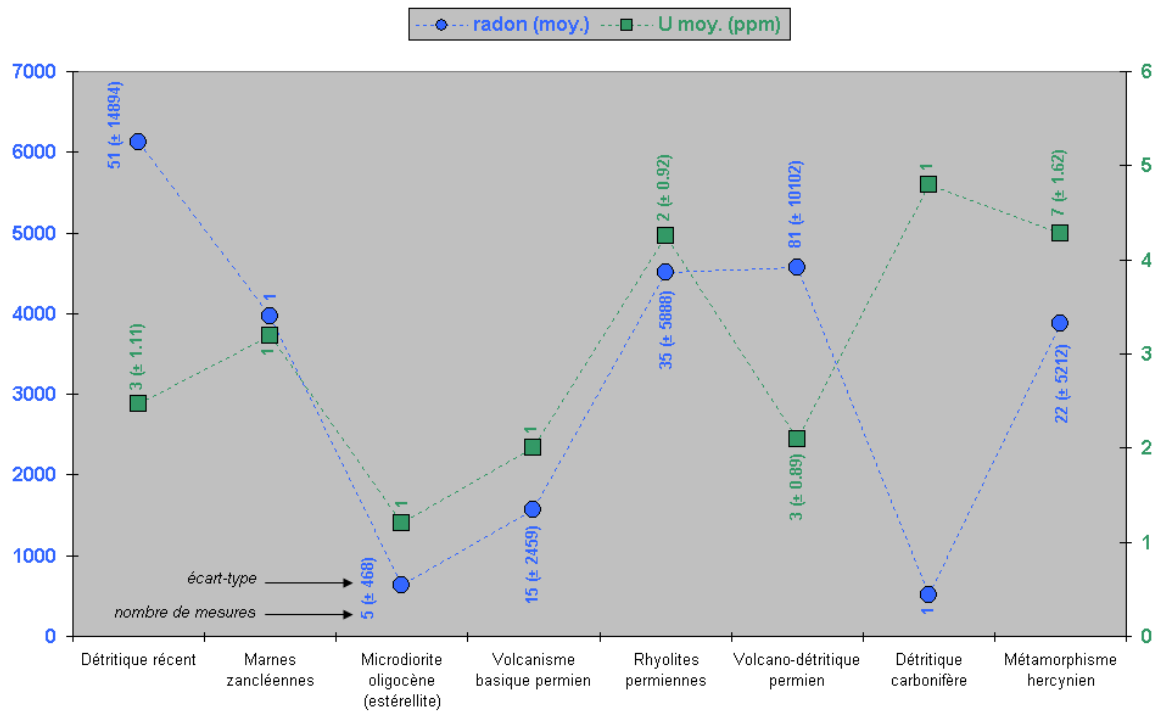


Figure 15: Corrélation entre l'activité radon et les teneurs en uranium en fonction des formations géologiques

4.4.2. Répartition dans l'espace

Deux types de représentations cartographiques sont proposés :

- le premier sur fond géologique 1/50 000^{ème} en projetant les valeurs d'activité radon dans les sols et les teneurs en uranium des roches (figure 16) ;
- le second en utilisant les calculs d'interpolation par krigeage (logiciel Surfer®) pour les données d'activité radon, de coups enregistré par scintillomètre SPP2 et de profondeur d'échantillonnage (figure 18).

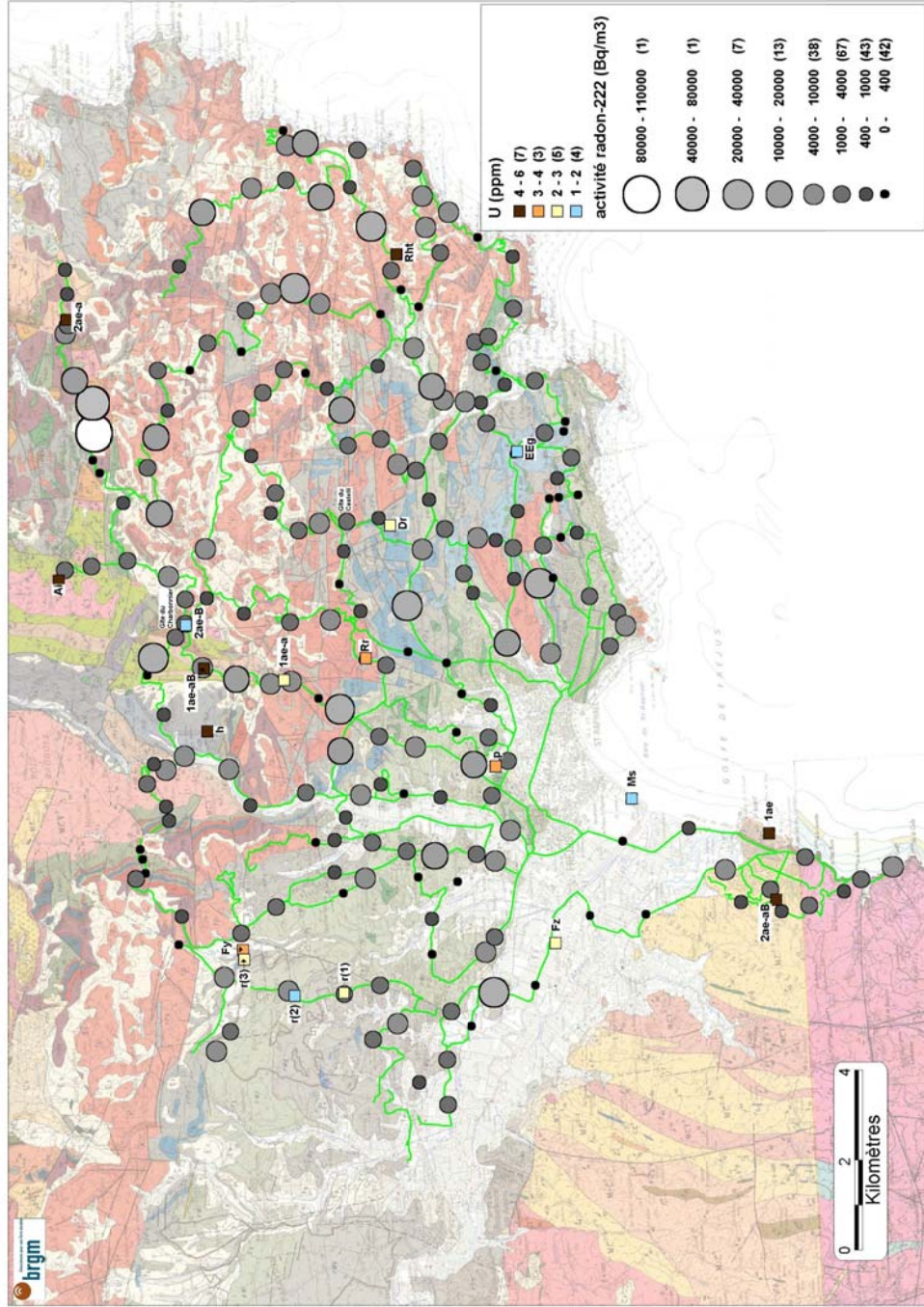


Figure 16 : Estérel, activités en radon dans les sols et teneurs en uranium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000^{ème} (feuille de Fréjus)

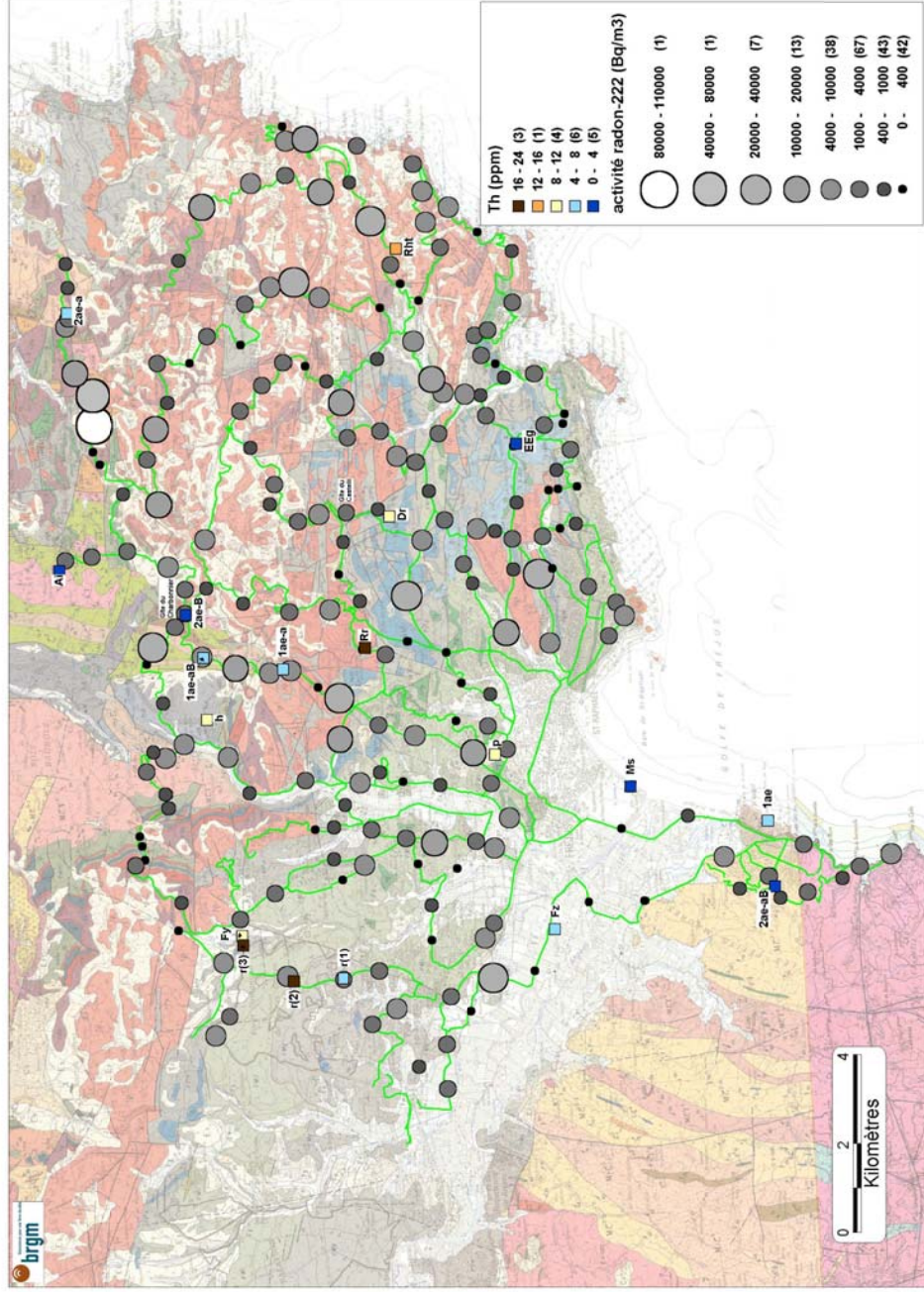
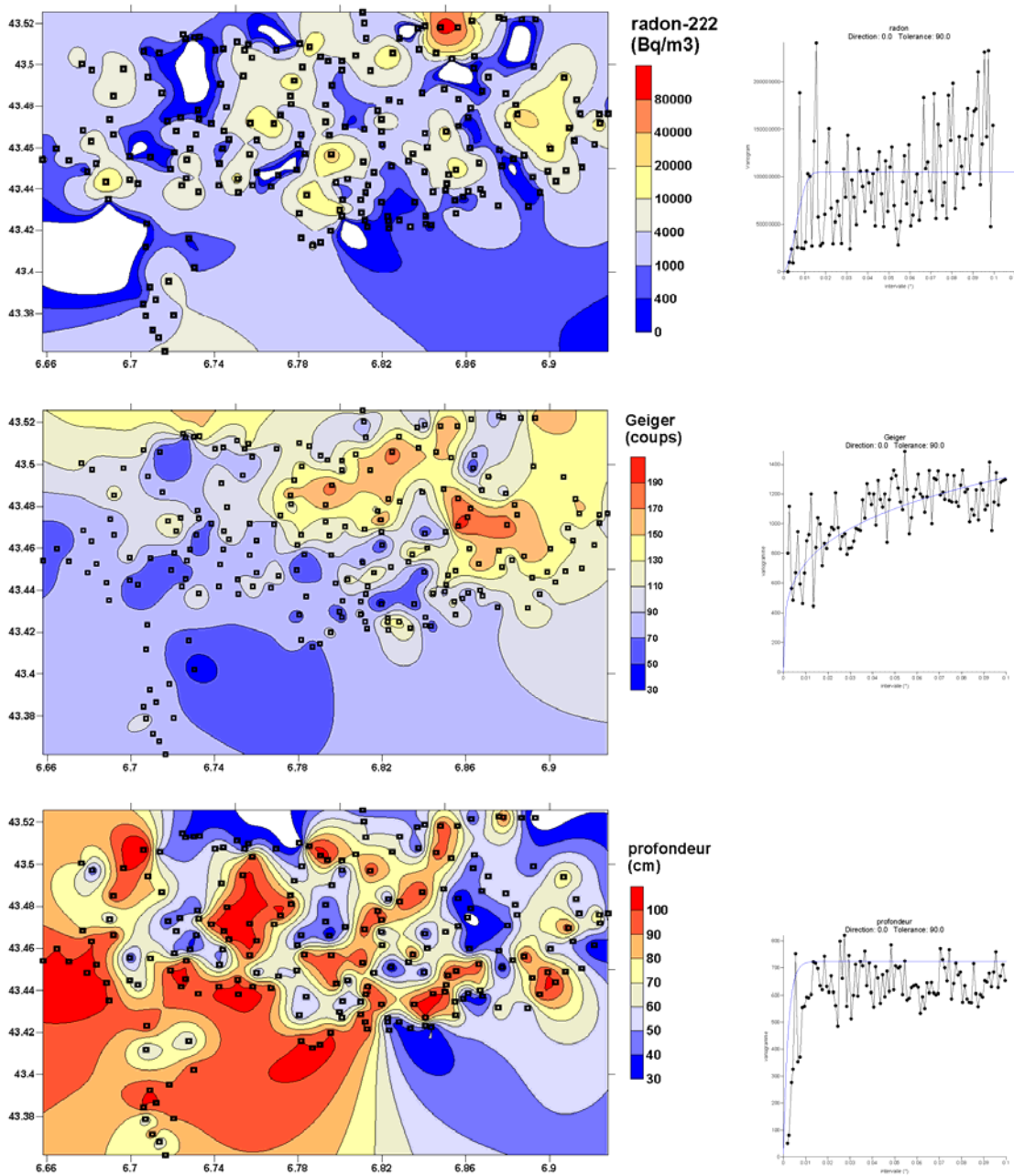


Figure 17: Estérel, activités en radon dans les sols et teneurs en thorium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000^{ème} (feuille de Fréjus)



Les axes sont gradués en longitude (°Est, WGS84) pour les abscisses et latitude (°Nord WGS84) pour les ordonnées ; les variogrammes correspondants sont reportés à droite ; les interpolations n'ont de valeur qu'en proche voisinage des points de mesures.

Figure 18 : Interpolations par krigeage des activités radon (haut), des mesures par scintillomètre SPP2 (milieu) et des profondeurs d'échantillonnage (bas)

La zone du massif des Maures, pourtant dans le groupe des teneurs en uranium supérieures à 4 ppm, mais peu riche en thorium, ne renvoie pas d'activité supérieure à 10 000 Bq/m³. Ces faibles activités ne sont pas une conséquence d'une profondeur d'échantillonnage trop faible et ne contrastent pas avec les mesures SPP2 réalisées en surface (figure 12).

De même, le débouché alluvial de la vallée de l'Argens à l'immédiat Sud-Ouest de Fréjus n'apparaît pas comme émissif en radon, pas plus que les formations échantillonnées ne renferment d'uranium ou de thorium.

En progressant vers le Nord, la situation devient plus contrastée (figure 16). A l'Ouest, sur les formations gréso-pélitiques du Muy, du Mitan et des Pradineaux, riches en thorium mais pas en uranium, les activités ²²²Rn peuvent approcher les 20 000 Bq/m³. Une grande variabilité spatiale existe cependant (figures 14 et 15), pouvant refléter la variabilité géologique intrinsèque de ces faciès détritiques. Par contre, il apparaît que les formations, toutefois non échantillonnées pour déterminations chimiques, de basalte doléritique et rhyolites ignimbrtiques proches du site de Malpasset, peuvent être très pauvres en radon.

Les quelques mesures faites à l'aplomb de la formation d'estérellite tertiaire, très pauvre en uranium et thorium, donnent des activités pouvant ponctuellement approcher les 10 000 Bq/m³. Ceci tend à favoriser soit une origine de très proche surface pour le radon (dégradation de minéralisations existant dans le sol) soit au contraire une origine plus profonde liée à la fracturation. Cependant les faibles teneurs en autres gaz (CO₂ notamment) relevées au cours de la campagne dans cette zone n'accréditent pas l'existence de drains à forte perméabilité.

Pour ce qui concerne les rhyolites permienne du massif de l'Estérel, qui occupent une bonne part du secteur Est étudié, il apparaît un relatif enrichissement en radon dans la partie orientale (secteur d'échantillonnage de Rht, figures 14 et 15) par rapport à la partie occidentale. Ceci peut être à relier avec des teneurs plus importantes en uranium et thorium dans les rhyolites que dans les formations détritiques venant en recouvrement, plus présentes en partie occidentale.

Enfin, terminons par un périmètre géographique restreint mais marquant, qui permet d'ailleurs d'observer les seules activités supérieures à 40 000 Bq/m³ (et jusqu'à 110 000 Bq/m³). Il s'agit d'une zone bordant la nationale 7, comprenant des grès micacés du Tanneron, des dépôts de pente, proche d'un filon de basalte doléritique d'Ambon et de la formation de Pradineaux. Contrairement aux zones parfois explorées à l'aplomb de ces mêmes formations mais en d'autres affleurements, ce secteur apparaît en effet comme le plus anomal du secteur d'étude.

4.4.3. Autres facteurs influants

Drains tectoniques et volcaniques

Le rôle des failles et de la géomorphologie a été évoqué au § 3.2.5 comme facteurs influant sur l'activité radon en dehors de la lithologie. La zone de l'Estérel a été compartimentée par un nombre important de failles auxquelles il convient d'ajouter les conduits d'alimentation du volcanisme. Autant de drains préférentiels d'une migration potentielle de radon. L'activité tectonique n'a pas disparu et Toutin Morin *et al*, 1994 signalent qu'une vingtaine de secousse ont atteint ou dépassé l'intensité V au cours des 5 à 6 derniers siècles. La carte néotectonique produite (Toutin Morin *et al*, 1994) synthétise les failles considérées comme encore actives (figure 19). Un alignement de valeurs $> 4\ 000\ \text{Bq/m}^3$ (figure 16) coïncide assez bien avec un linéament de direction N10 à l'est de la vallée du Reyran.

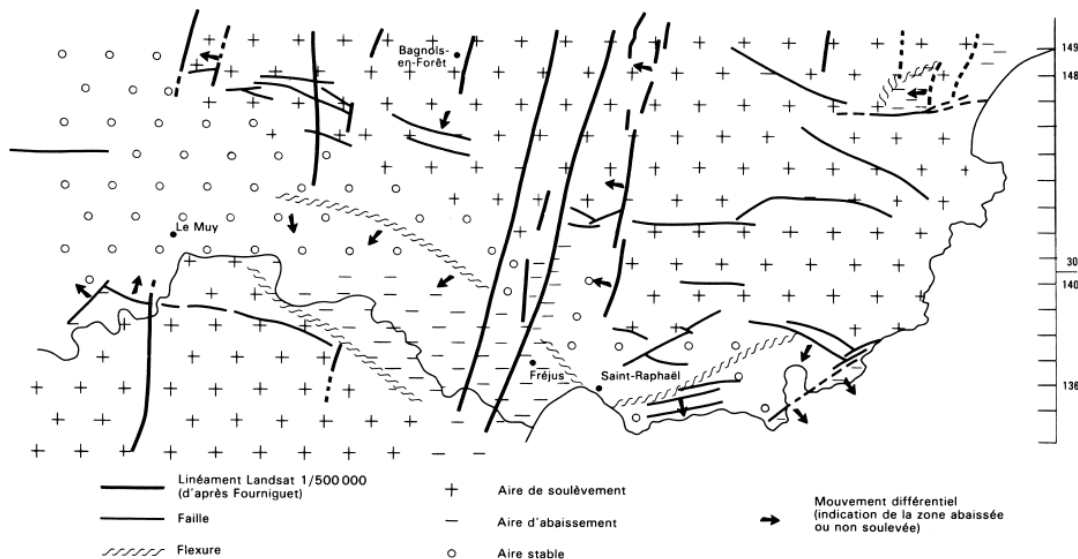


Figure 19: Carte néotectonique du pliocène à l'actuel (M. Dubar in Toutin-Morin *et al*, 1994)

La mesure des concentrations en CO_2 a été effectuée lors des prélèvements de gaz. Ce gaz, souvent considéré comme gaz vecteur du radon (*cf.* § 3.2.3), peut contribuer à mettre en évidence les drains de migration des gaz. Dans la zone considérée, aucune anomalie majeure (100%) de CO_2 n'a été mise en évidence. Par ailleurs, la faiblesse des sols dans les zones rocheuses limite l'impact de l'activité biologique. La répartition des concentrations en CO_2 montre que les points de mesure à concentrations les plus élevées (3 à 7%) coïncident tous avec des anomalies radon ($> 10\ 000\ \text{Bq/m}^3$). C'est notamment le cas pour l'alignement signalé précédemment à l'est de la vallée du Reyran. L'inverse n'est pas vérifié : nombre d'anomalies radon (et notamment les plus fortes) ne correspondent pas à des valeurs particulièrement élevées en CO_2 . Il est alors permis de supposer que dans ces cas la nature de la formation (sa teneur en uranium, sa perméabilité,...) joue un rôle prépondérant par rapport aux drains de diverses sortes.

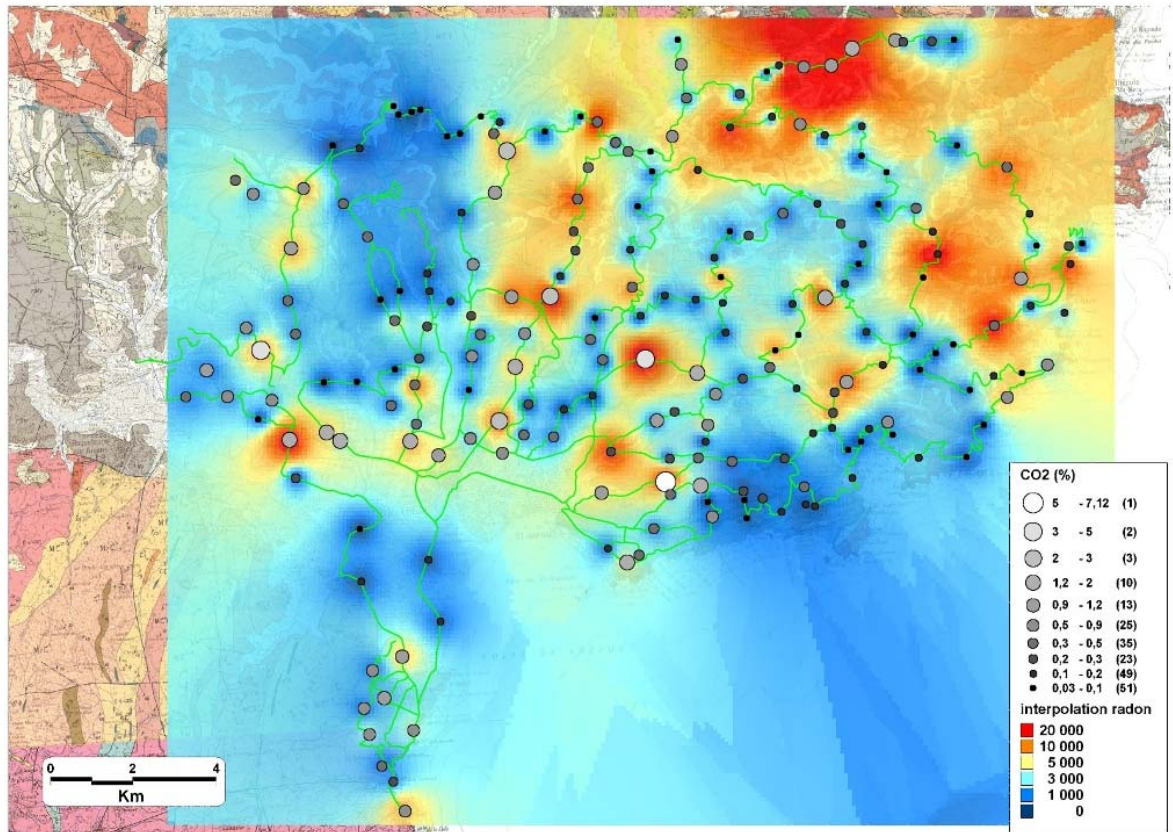


Figure 20 : Répartition des concentrations en CO₂ et en radon

Minéralisations

La région Estérel a été le siège d'importantes pré-concentrations en métaux et notamment en uranium pendant le Permien (Toutin-Morin et al, 1994). De nombreux indices ont été signalés mais ils correspondent le plus souvent à des minéralisations superficielles sans intérêt économique. Les sites les plus intéressants sont les suivants :

- Gîte du Charbonnier. Les minéralisations sont situées dans le socle et dans une cheminée d'alimentation de rhyolite permienne. L'estimation des ressources donnait 120 t d'uranium pour 200 000 t de minerai à faible teneur (500 à 750 ppm d'oxydes noirs d'uranium). Les mesures d'activité radon et l'analyse de roches échantillonnées à proximité ne présentent pas d'anomalies.

- Gîte du Castelli. Localisé dans les psammites vertes à débris de matière organique et dans les grès gris verts de la Formation des Pradineaux, l'uranium diffus est associé notamment au thorium. La partie inférieure de cette formation présente en général des indices d'uranium sous forme de chalcopite associée à d'autres minéralisations métalliques. Il n'est pas exclu que certaines de ces concentrations contribuent à

expliquer la présence d'une zone d'exhalation radon particulièrement anormale (à plus de 40 000 Bq/m³) en partie associée à la formation des Pradineaux.

- Bassin du Bas Argens. Les indices ont été trouvés par sondages dans une série de formations détritiques (Mitan, Muy, ...) et dans les gneiss du Tanneron. Il est difficile ici de relier ces minéralisations profondes à une exhalation anormale.

Circulation d'eau

En dehors du CO₂, l'eau constitue l'autre vecteur principal du radon. Dans la zone considérée, la circulation d'eau peut s'effectuer soit dans des formations détritiques perméables, soit dans des zones fissurales du socle. La notice de la carte géologique de Fréjus (Toutin Morin, 1994) signale que des circulations à des débits non négligeables peuvent avoir lieu le long des principales failles méridiennes. Cette observation est compatible avec ce qui a été noté concernant la néotectonique.

4.4.4. Bilan par rapport aux estimations de la phase 1 et exposition aux risques

Quelques écarts peuvent être observés entre les estimations de la phase 1 et les mesures de la phase 2. Ainsi les alluvions et colluvions récentes (tableau 8) qualifiées de « pas ou peu émettrices », se révèlent avoir une activité mesurée entre 0 et 16 187 Bq/m³ (moyenne à 3 979). Inversement la rhyolite fluidale et aphyrique comme la formation du Mitan sont supposées être « fortement émettrices » quand l'intervalle des mesures va de 142 à 9 300 Bq/m³ pour la première et 0 à 10 440 Bq/m³ pour la seconde (moyennes respectivement à 3 026 et 2 444). Ces différents cas ont en commun une surestimation du rôle de la lithogéochimie (teneur en uranium) quand d'autres facteurs ont dû jouer un rôle significatif pour ces mesures.

La carte de « susceptibilité à l'émanation » radon pourrait être revue à la lumière des nouvelles données fournies par cette étude. L'exposition aux risques radon dans la zone Sud Estérel n'est pas remise fondamentalement en cause mais des ajustements peuvent désormais y être apportés. Si l'uranium n'atteint jamais la limite de 7 ppm considérée comme susceptible de générer une exhalation radon anormale (seuil de 400 Bq/m³), des activités radon ponctuellement fortes ont été mesurées (> 100 000 Bq/m³ dans une formation détritique récente, > 75 000 Bq/m³ dans une formation détritique permienne) sans qu'elles correspondent à une concentration forte d'uranium.

4.4.5. Structure profonde et potentiel d'exhalation radon

Au-delà des formations à l'affleurement, les études sur l'Estérel fournissent des indications sur le soubassement de cette zone. La comparaison avec la Corse, dont l'Estérel n'a été séparé qu'il y a 20 Ma, permet de supposer qu'à l'aplomb des rhyolites permienes se trouvent des granites de même origine et de même composition (Lucazeau et Mailhe, 1986). Cette hypothèse est confirmée par la présence d'enclaves de ces granites retrouvées dans l'estérellite tertiaire. Ce stock granitique, relativement

riche en uranium, constitue donc un potentiel considérable d'exhalation radon susceptible de migrer à la faveur de drains tectoniques ou autres.

4.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE ESTEREL

La campagne de mesure de l'activité radon des sols de l'Estérel combinée à l'analyse des concentrations en uranium et thorium des formations géologiques a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- les paramètres météorologiques, par ailleurs assez favorables lors de cette campagne, ne semblent pas avoir eu d'impact sur les mesures de gaz des sols ;
- la profondeur des micro-forages de prélèvement de gaz n'a pas atteint la profondeur standard sur un nombre significatif de sites (en particulier dans les formations rocheuses massives dépourvues de sol). Ce biais a pu jouer quand la profondeur forée ne dépassait pas 40 cm ;
- les formations géologiques ont des concentrations en uranium (et thorium) variables mais relativement élevées, cohérentes avec leur origine (roches métamorphiques dérivées de granites, roches volcaniques alcalines siliceuses et roches détritiques rassemblant des éléments des deux précédentes) ;
- l'analyse du thorium a permis de mettre en évidence des phénomènes d'altération ayant pu appauvrir certaines formations volcaniques anciennes en uranium. Il en va de même pour des formations détritiques récentes et volcano-détritiques anciennes ;
- les activités radon sont assez bien corrélées avec les teneurs en uranium. Pour les roches détritiques, l'hétérogénéité des résultats peut s'expliquer soit par une perméabilité plus faible soit par l'intervention d'autres facteurs que la teneur en uranium dans l'origine du radon ;
- les estimations de « susceptibilité à l'émanation » des formations géologiques formulées lors de la phase 1 de l'étude paraissent, dans certains cas, avoir surestimé le facteur lithogéochimique (teneur en U) au détriment d'autres facteurs plus difficiles à quantifier ;
- la répartition des concentrations en CO₂, la néotectonique locale et les écarts entre teneurs en uranium et activité radon conduisent à considérer la présence de drains tectoniques (ou autres) comme responsables d'une partie des anomalies radon (linéament parallèle au Reyran) ;
- certaines minéralisations en uranium soulignent l'enrichissement de niveaux détritiques (formation des Pradineaux) coïncidant avec des activités radon élevées ;

- l'existence, en profondeur d'un stock granitique riche en uranium permet de considérer que cette zone possède une « susceptibilité d'émanation » importante.

5. Zone Moyen Champsaur

5.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

5.1.1. Conditions météorologiques avant et pendant la campagne de terrain

Tout comme pour l'examen des résultats dressé pour les mesures Estérel, il nous a paru intéressant d'examiner en premier lieu la variabilité météorologique du Champsaur durant la période de mesure. L'orographie étant ici nettement plus marquée, et les échantillonnages ayant fréquemment été positionnés en vallée, l'impact des ruissellements sur la saturation en eau des sols peut être plus fort qu'en proche bordure de la Méditerranée. Malheureusement, les données Météo-France disponibles font appel à la station de Saint-Auban – Château-Arnoux (annexe 6), implantée 65 km au Sud de Saint-Bonnet-en-Champsaur, centre de la zone d'étude. Aussi a-t-il encore une fois été choisi de compléter ces informations par celles des stations personnelles de Sisteron (55 km au Sud-Sud-Ouest de Saint-Bonnet-en-Champsaur) et d'Orcières (19 km à l'Est), cette dernière étant toute proche de certains points de mesure. Les tableaux 10 et 11 détaillent certains des paramètres enregistrés par ces deux stations. Toutefois, malgré l'éloignement géographique de certaines stations, l'évolution des champs de pression (pression normalisée au niveau de la mer) est très comparable entre Sisteron et Orcières (figure 17). De même, en prenant en compte l'existence d'une diminution graduelle avec l'altitude, les variations journalières des températures sont semblables entre ces deux localités.

SISTERON	TN	TX	HR_{min}	HR_{max}	P_{min}	P_{max}	RR
Nb. d'observations	34	34	34	34	34	34	34
Minimum	8	16	34	66	1002	1005	0
Maximum	15	26	87	91	1020	1021	37,7
1^{er} Quartile	10	20	47,25	81	1009,2	1012	0
Médiane	11,5	22	54	86	1011	1014	0,05
3^{ème} Quartile	13	23	61	89	1013	1015,7	0,3
Somme							60,4
Moyenne	11,59	21,32	55,9	84,5	1011	1014	1,77
Ecart-type	1,97	2,65	13,8	5,8	3,6	3,6	6,59
Coefficient de variation	0,17	0,12	0,25	0,07	0,004	0,004	3,71

Tableau 10: Paramètres météorologiques moyens de la station personnelle de Sisteron

(44,16°N ; 5,93°E ; 457m ;

<http://french.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp?ID=ISISTERO1>) – explication des sigles en légende des tableaux 4 et 5 – données du 10/05 au 12/06/08.

ORCIERES	TN	TX	P	RR
Nb. d'observations	34	34	34	34
Minimum	3,7	7	1001	0
Maximum	11,9	18,1	1018,1	48,8
1^{er} Quartile	5,02	11,77	1008,2	1,65
Médiane	6,5	13,6	1010,4	4,6
3^{ème} Quartile	7,27	14,85	1012,07	8,65
Somme				245,4
Moyenne	6,5	13,33	1010	7,22
Ecart-type	1,93	2,59	3,58	9,67
Coefficient de variation	0,3	0,19	0,004	1,34

Tableau 11 : Paramètres météorologiques moyens de la station personnelle d'Orcières

(44°41'08"N ; 06°19'37"E ; 1610m ; http://www.romma.fr/station_clim_an.php?id=2&year=2008)
 – explication des sigles en légende des tableaux 4 et 5 – données du 10/05 au 12/06/08.

De l'examen de ce jeu de données météorologiques ressort donc pour fin mai – début juin 2008 :

- une variation de températures minimales et maximales conforme à la moyenne sur 30 ans ;
- tout comme pour l'Estérel, un ensoleillement déficitaire ;
- la fluctuation des pressions s'effectue dans une gamme assez resserrée (10 hPa) ;
- une situation pluviométrique ici encore contrastée : pas d'évènements jusqu'au 15 mai, puis gros cumul les dix derniers jours du mois et les premiers jours de juin, conduisant à une pluviométrie de 120 mm à Saint-Auban (+ 50% par rapport à la normale 1971-2000 – annexe 6). Avec l'altitude les cumuls augmentent, 160 mm étant relevés entre le 23 mai et le 02 juin à Orcières.

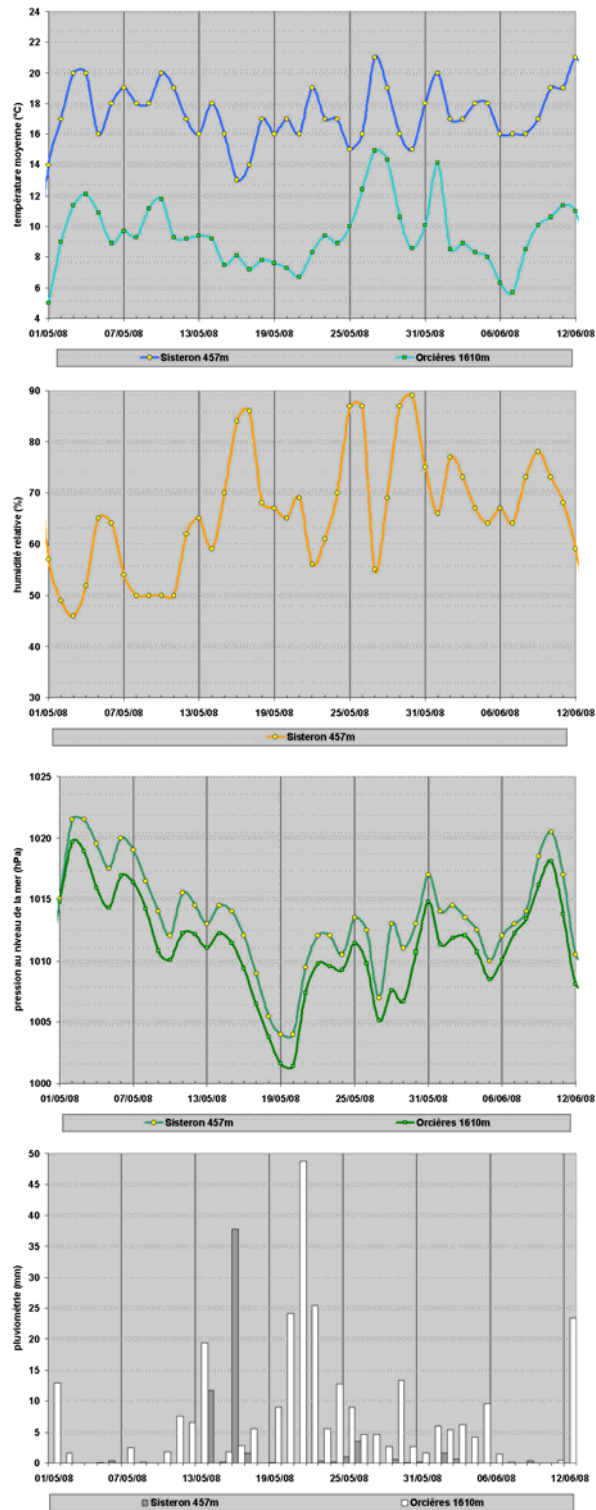


Figure 21 : Données météorologiques de mai-juin 2008 (stations de Sisteron et d'Orcières) – échantillonnage du 02 au 06 et du 09 au 12 juin.

5.1.2. Influence sur les mesures

Les conditions météorologiques ayant prévalu au cours des deux semaines d'échantillonnage dans le Champsaur se sont révélées dégradées par rapport à celles ayant régné dans l'Estérel. Les cumuls pluviométriques importants, associés à des températures conformes aux normales et à des ensoleillements faibles, ont vraisemblablement concouru à une infiltration d'eau dans les sols.

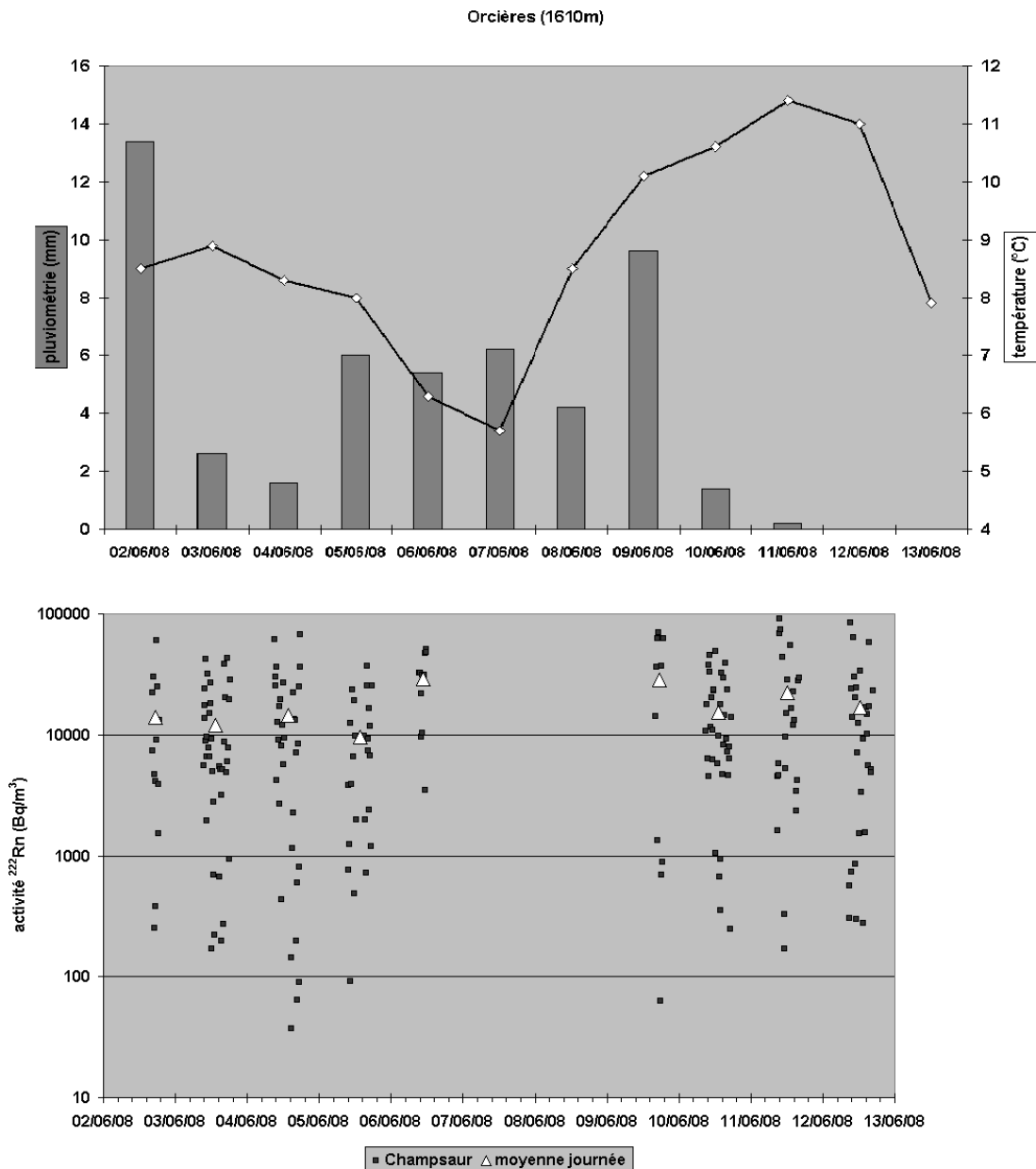


Figure 22 : Evolution des activités radon mesurées dans les sols en fonctions des conditions météorologiques externes – Champsaur.

Il n'est pas noté de déviation significative dans le temps au cours de la campagne (figure 18).

5.2. TENEURS EN RADON 222 DANS LES SOLS

Pour un nombre d'observations (219) quasi identique à celui de l'Estérel, les calculs statistiques (tableau 12) renvoient pour le Champsaur une situation différente. En effet si les activités radon varient entre 37 et 90 740 Bq/m³, soit une amplitude légèrement inférieure à celle constatée dans l'Estérel (respectivement entre 0 et 104 483), en revanche la valeur moyenne est plus forte d'un facteur 3,82, supérieure à 16 200 Bq/m³ (4 537 en Estérel).

CHAMPSAUR	Activité ²²² Rn (Bq/m ³)	Profondeur (cm)
Nb. d'observations	219	219
Minimum	37	50
Maximum	90 740	100
1^{er} Quartile	3 386	100
Médiane	9 487	100
3^{ème} Quartile	23 988	100
Moyenne	16 211	97,4
Ecart-type	17 901	10,7
Coefficient de variation	1,1	0,11

Tableau 12 : Statistiques descriptives (activité ²²²Rn, profondeur d'échantillonnage) – Champsaur.

Plus en détail, les écarts de moyenne avec l'Estérel ne sont ni liés aux faibles (environ 17%, tableau 13) ni aux fortes activités (environ 10% supérieur à 40 000 Bq/m³). C'est bien le bruit de fond moyen en radon qui est supérieur dans toute la zone, puisque plus de la moitié des activités mesurées sont comprises entre 4 000 et 20 000 Bq/m³.

Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence (%)
0	400	20	9,13%
400	1 000	16	7,31%
1000	4 000	24	10,96%
4 000	10 000	56	25,57%
10 000	20 000	35	15,98%
20 000	40 000	47	21,46%
40 000	80 000	19	8,68%
80 000	110 000	2	0,91%

Tableau 13 : Répartition des activités radon-222 dans le Champsaur (seuils de coupure identiques à ceux utilisés pour les données Estérel).

Plusieurs facteurs se conjuguent pour expliquer cette disparité entre les deux zones d'étude. Ces facteurs seront discutés au § 5.4.3.

5.3. TENEURS EN URANIUM ET THORIUM DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Les formations géologiques échantillonnées dans le Champsaur pour analyse en laboratoire des teneurs en uranium et thorium sont rappelées dans le tableau 8 et localisées sur la figure 2. Les résultats sont détaillés en annexe 5 et synthétisés dans le tableau 14.

Regroupement Géologie	Regroupement U	Analyse U (ppm)	Analyse Th (ppm)	ECHANTILLON	Notation I/SO 000	Lithologie	Type de roches	Age	Evaluation Radon phase 1	Intervalle Radon	Regroupement Rn	
Détritiques récents	1.5 - 3.4				E	Produits d'altération superficielle et éboulis actifs	formation superficielle			1 930 - 42 400	37 - 90 740	
					E(obj)	Produits d'altération superficielle et éboulis actifs - coulées boueuses	formation superficielle			37 - 61 412		
					E(tae)	Produits d'altération superficielle et éboulis actifs - glissements, tassements	formation superficielle			17067		
					EBV	Eboulis à gros blocs repris dans les glissements de versant	formation superficielle			2 682 - 12 720		
					Jz	Cônes torrentiels actuels ou récents	formation superficielle			3 156 - 5 157		
					EBy	Eboulements anciens	formation superficielle			10 269		
					EGy		formation superficielle			19 145		
					EJy	Cônes de ruissellement anciens	formation superficielle			16 977 - 33 898		
					Ey	Eboulis récents, stabilisés	formation superficielle			7 395 - 31 222		
					Jy	Cônes torrentiels anciens et Cônes de déjection récents, stabilisés	formation superficielle	Würm final		250 - 57 511		
					FGy	Alluvions fluvioglaciales würmiennes	formation superficielle			64 - 36 016		
			2,4	7,6	Fz Molines	Fz	Alluvions récentes, actuelles	formation superficielle	post-Würm	3, pas ou peu émettrice		808 - 51 249
			2	6,1	Fz	Fz	Alluvions récentes, actuelles	formation superficielle	post-Würm	3, pas ou peu émettrice		
			2,5	9,1	Fz - St Bonnet	Fz	Alluvions récentes, actuelles	formation superficielle	post-Würm	3, pas ou peu émettrice		
			2,4	7,2	Fz - Le Séchier	Fz	Alluvions récentes, actuelles	formation superficielle	post-Würm	3, pas ou peu émettrice		
					Fy	Fy	Alluvions fluviales et terrasses récentes, stabilisées					90 - 30 375
			2	4,5	FGy	Fw2	Complexe fluvi-glaciaire würmien	formation superficielle	Würm	7, faiblement à moyennement émettrice		
					Lw1	Lw1	Argiles lacustres	formation superficielle	début du Würm II			1513
					Fw1a	Fw1a	Alluvions fluviales et terrasses du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade I a			9 233 - 12 522
					gl/Fw1b	gl/Fw1b	Glissements en masse d'alluvions fluviales et terrasses du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade I b			23366
					gl/Fw-x	gl/Fw-x	Glissements en masse d'alluvions fluviales et terrasses du Würm	formation superficielle	Würm III			8 952 - 24 853
					Fw1b	Fw1b	Alluvions fluviales et terrasses du Würm ancien	formation superficielle	Würm II 6 stade I b			276 - 45 483
			3,4	10	Fy - St Bonnet	Fw-x	Alluvions würmiennes	formation superficielle	Würm	3, pas ou peu émettrice		382 - 1 515
					Fx	Fx	Alluvions fluviales et terrasses du Würm récent	formation superficielle	Würm III			6685
					Fx1	Fx1	Alluvions fluviales et terrasses du Würm récent	formation superficielle	Würm III - stade 1			32 441 - 90 740
					Fx2	Fx2	Alluvions fluviales et terrasses du Würm récent	formation superficielle	Würm III - stade 2			4610
					G	G	Moraines récentes, avec vallums, et glaciaire indéterminé	formation superficielle	Würm III - stade 2			5 573 - 23991
			1,9	7,7	Gy St-Léger-les-Mézières	Gy	Moraines würmiennes	formation superficielle	Würm	7, faiblement à moyennement émettrice		197 - 43 038
					Jx	Jx	Cônes de déjections du Würm récent	formation superficielle	Würm III			3 923 - 70 021
					Gx 2	Gx 2	Alluvions glaciaires et moraines du Würm récent	formation superficielle	Würm III - stade 2			36149
			Gx 1	Gx 1	Alluvions glaciaires et moraines du Würm récent	formation superficielle	Würm III - stade 1		60016			
			gl/Gx	gl/Gx	Glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm récent	formation superficielle	Würm III		84155			
			Gx	Gx	Alluvions glaciaires et moraines du Würm récent	formation superficielle	Würm III		5 128 - 39 154			
			gl/Gw4	gl/Gw4	Glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade IV		67456			
			Gw3	Gw3	Alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade III		1 338 - 62 934			
			gl/Gw2	gl/Gw2	Glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade II		63			

				Gw2	Alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade II		8 974 - 17 982	
				Gw1	Alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II - stade I		3 896 - 62 901	
				gl/Gw	Glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien	formation superficielle	Würm II		728 - 28 389	
				Jw	Cônes de déjection du Würm ancien	formation superficielle	Würm II		8 910 - 48 748	
	2,6	5,2	Gy Les-Hauts-de-St-Firmin	Gw	moraines würmiennes	formation superficielle	Würm	7, faiblement à moyennement émettrice	1 206 - 54 998	
	1,5	1,9	Gy Villard Saint-Pierre	Gw	moraines würmiennes	formation superficielle	Würm	7, faiblement à moyennement émettrice		
	2,9	5,6	Gx	Gv	Alluvions glaciaires et moraines	formation superficielle	Riss (ou plus anciennes)	7, faiblement à moyennement émettrice	6 798 - 27 987	
Schistes à blocs et flysch	0,3 - 2,6			e6-7	Terrains autochtones et parautochtones (couverture sédimentaire); calcachistes à Nummulites	sédimentaire	Préborien des écaillés ultradauphinoises de Pralic		6420	
		1	1	eO	eO	Schistes à blocs avec pelites et argiles	sédimentaire	Préborien	5, faiblement émettrice	
		2,5	5,7	eF	eF (3/3)	Schistes à blocs	sédimentaire	Crétacé-Paléocène	5, faiblement émettrice	
		0,3	0	eF	eC (2/3)	Schistes à blocs	sédimentaire	Crétacé-Paléocène	5, faiblement émettrice	
		1,9	0	eF	eO (1/3)	Schistes à blocs	sédimentaire	Crétacé-Paléocène	5, faiblement émettrice	
		1,4	3,5	eOC	eG	Flysch à conomie gréseuse	sédimentaire	Préborien	5, faiblement émettrice	
		1,2	4	eGDM	eG	Flysch à éléments andésitiques	sédimentaire	Préborien	5, faiblement émettrice	
Jurassique ooliteo-marneux	0,9 - 1,7			J1-2	Terrains autochtones et parautochtones (couverture sédimentaire)	sédimentaire	Bajocien-Bathonien inférieur indifférenciés : calcaires marneux		9278	
				J1b	Jurassique médio-supérieur marneux	sédimentaire	Bajocien supérieur marno-calcaire		91 - 1 240	
				J1a	Dogger calcaireo-marneux	sédimentaire	Bajocien inférieur : calcaires et marnes		364 - 8 688	
		1,7	1,1	I (Ib) (1/2)	Ib	Dogger calcaireo-marneux	sédimentaire	Aalénien supérieur	2, pas ou peu émettrice	49920
		1,1	0	I (Ia) (2/2)	Ia	Dogger calcaireo-marneux	sédimentaire	Aalénien inférieur : calcaires argileux	2, pas ou peu émettrice	170 - 12 114
		0,9	0	Ib - Le Collet	Ia	Calcaires marneux	sédimentaire	Aalénien moyen	5, faiblement émettrice	
		1	0	Ib (Ia) - St-Jacques-en-Vaigodemar	Ia	Calcaires marneux	sédimentaire	Aalénien moyen	5, faiblement émettrice	
			I7	Calcaires argileux roux et calcachistes belges	sédimentaire	Lias supérieur marneux : Toarcien inférieur et moyen		3 444 - 24 296		
Schistes et Marnes Noires	1,8 - 3,4	3,4	13	eGM	eGM	Schistes noirs	sédimentaire	Préborien		
		1,9	5,1	JN - Pisançon	J2-4	Jurassique médio-supérieur marneux : "Terres noires"	sédimentaire	Bathonien-Oxfordien inférieur marneux	4, faiblement émettrice possible	149 - 97 240
		2,4	7,6	JN - la Vilette	J2-4					
		1,8	7,4	JN	J2-4					
	2,1	7	IbC (Ib-C) - Col de l'Espacelet	Ib	Marnes noires	sédimentaire	Aalénien supérieur	4, faiblement émettrice possible		
	2	7,8	Im (I6-7a)	I6-7a	Marnes micacées	sédimentaire	Domérien et Toarcien basal	3, pas ou peu émettrice	8 088 - 28 298	
Calcaires liasiques	1,7			I5a	Calcaires gris supérieurs		Lias calcaire : Carixien inférieur		4 910 - 28 672	
		1,7	0	II - Aspres-les-Corps	I3-4a	Calcaires gris	sédimentaire	Lias calcaire : Sinémurien inférieur-Lotharingien inférieur	2, pas ou peu émettrice	858
				I4b	Calcaires à patine rouille		Lias calcaire : Lotharingien supérieur		801 - 20 929	
Volcanisme du Trias				K3	Coulées de spilles	Roches volcaniques et filoniennes	Trias		30368	
Soile métamorphique	2,3 - 1,8			A5	Lambeaux du linéament d'Aspres : Micaschistes chloriteux et sériciteux et faciès non différenciés	métamorphique			14007	
		2,3	5,1	ae2	ts	Gneiss et leptynites	métamorphique		8, faiblement à moyennement émettrice mais à susceptibilité forte possible	
		1,8	6,6	Al DD	8c	Leptynites et amphibolites	métamorphique		5, faiblement émettrice	

Tableau 14 : Répartition des formations lithologiques échantillonnées dans le Champsaur

5.3.1. Evaluation du rayonnement gamma des formations échantillonnées

Un balayage surfacique au moyen d'un scintillomètre SPP2 a été effectué sur les échantillons destinés à l'analyse. Les résultats synthétisés sur la figure 19 montrent que les corrélations entre teneurs en uranium et thorium d'une part et rayonnement gamma d'autre part sont faibles. Le comptage « gamma » constitue donc un outil médiocre pour la détection des anomalies uranium et thorium en Champsaur.

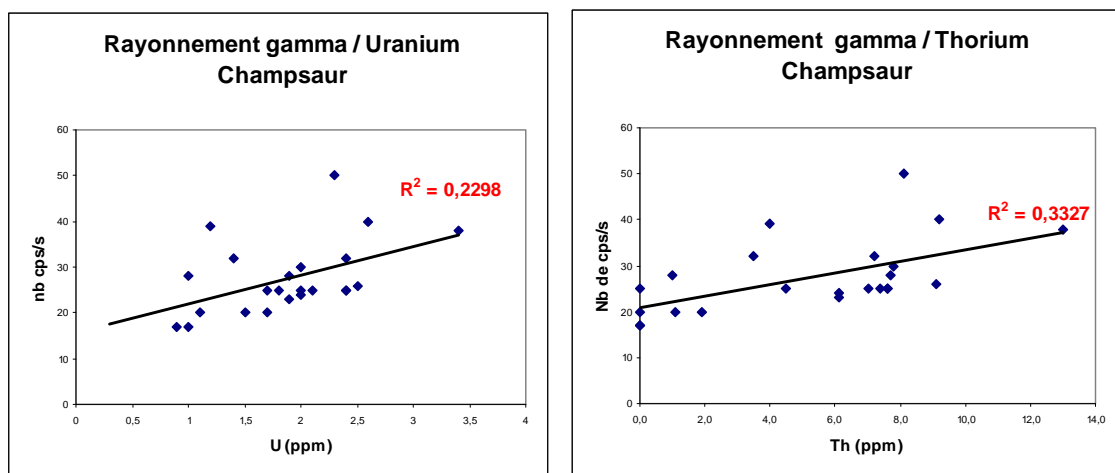


Figure 23 : Relation entre rayonnement gamma mesuré et teneurs en uranium et thorium des formations du Champsaur

5.3.2. Répartition statistique

Comme évoqué au § 3.3, les teneurs en uranium et thorium quantifiées pour les formations du Champsaur sont nettement inférieures à celles mesurées dans l'Estérel. Ici il n'est pas trouvé de contenu en uranium supérieur à 3,4 ppm (6 dans l'Estérel) et en thorium supérieur à 13 ppm (23 dans l'Estérel). Ceci est vraisemblablement lié à la nature fréquemment sédimentaire (y compris détritique) des formations échantillonnées, connues pour être moins riches en uranium (sauf présence de matière organique et/ou dépôt en milieu réducteur par exemple) que les termes magmatiques ou ceux résultant d'un métamorphisme de formations de socle. Ce constat pourrait expliquer la relative richesse en U (3,4 ppm) et Th (13 ppm) relevée dans les schistes noirs (eGM, tableau 14).

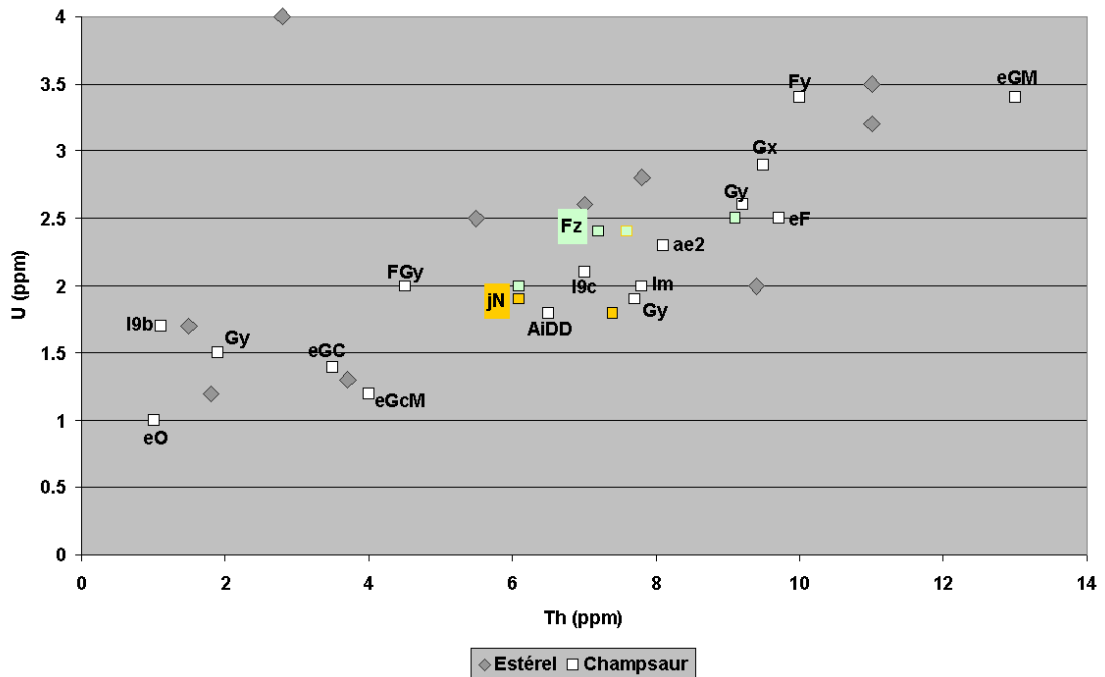
Statistique	Th (ppm)	U (ppm)
Nb. d'observations	23	29
Minimum	1	0,3
Maximum	13	3,4
1^{er} Quartile	5,3	1,5
Médiane	7,4	1,9
3^{ème} Quartile	8,6	2,4
Moyenne	6,76	1,93
Ecart-type	2,92	0,71
Coefficient de variation	0,43	0,36

Tableau 15 : Statistiques descriptives (teneurs en U et Th) – Champsaur.

Si les rapports Th/U sont plus constants et proches de la valeur standard (4) en Champsaur, dans les roches carbonatées (*cf* § 3.4.6) du Dogger et du Lias, les teneurs en Th sont particulièrement faibles (souvent non détectées) alors que l'uranium atteint des valeurs supérieures, bien que faibles (autour de 1 ppm).

Ainsi, que l'on considère les contenus en uranium ou en thorium (tableau 15), les formations échantillonnées semblent plus homogènes chimiquement, laissant à penser que les séries morainiques issues des dernières glaciations et complexes fluvioglaciers associés sont composées de termes détritiques ayant connu un transport faible (peu de termes de socle plus riches en U et/ou Th).

Enfin, tout comme cela a été signalé précédemment, le niveau seuil de 7 ppm d'uranium n'est pas franchi dans les échantillons récoltés au cours de la campagne de terrain.



Les remplissages en vert signalent les formations alluviales récentes Fz, ceux en jaune les Teres Noires (jN) ; en gris figurent pour information les valeurs déterminées dans l'Estérel (cf figure 13) ; les étiquettes renvoient à la notation indicielle de la formation géologique (cf. annexe 2).

Figure 24: Teneurs en U et Th des formations du Champsaur , les teneurs de l'Estérel sont également reportées sur le graphique

5.4. INFLUENCE DE LA NATURE ET DE LA REPARTITION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES SUR L'ACTIVITE RADON

5.4.1. Influence de la lithogéochimie

Les formations ont été regroupées par faciès lithogéochimiques et ce découpage traverse les âges des différentes formations (tableau 14, figures 25 et 26).

Formations détritiques (alluvions, colluvions, éboulis, moraines, glissements en masse, cônes de déjection) récentes (actuel, Wurm, Riss)

Si l'intervalle de concentrations en uranium (1,5 – 3,4 ppm) est assez resserré (il l'est un peu moins pour le thorium) en ce qui concerne des formations hétérogènes, les activités radon sont, elles, très diversifiées (37 – 90 740 Bq/m³).

Schistes à blocs et flysch (Crétacé supérieur à Paléocène)

Ces formations également hétérogènes (mais *a priori* moins que les précédentes) ont une gamme plus large de concentrations en uranium (0,3 – 2,5 ppm) mais la seule valeur d'activité radon (5420 Bq/m³) qui y a été mesurée ne permet pas de tirer de conclusions.

Calcaires marneux (Toarcien, Aalénien, Bajocien, Bathonien)

La gamme de variation (0,9 – 1,7 ppm) des concentrations en uranium (encore moins pour le thorium : 0 – 1,1 ppm) est sans commune mesure avec celle des activités radon (91 - 43 920 Bq/m³). Comme dans les formations détritiques récentes, les fortes valeurs d'activité radon ne sont pas corrélées à des valeurs anormales de concentration en uranium.

Schistes Noirs (Priabonien, Bathonien – Oxfordien, Aalénien supérieur, Lias supérieur)

Ces formations sont celles qui présentent les concentrations les plus élevées en uranium (1,8 – 3,4 ppm) alors que les activités radon, sans y être significativement plus faibles, sont du même ordre que dans les formations de calcaires marneux, calcaires liasiques ou détritique récent (143 – 37 240 Bq/m³).

Calcaires (Lias)

La seule donnée de concentration en uranium (1,7 ppm) se situe en dessous de la moyenne (1,9 ppm) pour cette zone, ce qui est cohérent avec des roches de type « carbonates ». Pour ce qui concerne les activités radon, la gamme observée (301 – 28 272 Bq/m³) est comparable à celle de plusieurs autres regroupements de faciès (détritique récent, calcaires marneux et schistes noirs).

Roches volcaniques et filoniennes (Trias)

Nous ne disposons pas d'analyse de la concentration en uranium de cette formation et la seule mesure d'activité radon (30 356 Bq/m³) qui y a été effectuée relativise toute conclusion. Néanmoins plusieurs facteurs laissent supposer que la teneur en uranium peut-être au-dessus de la moyenne de cette zone (magmatisme alcalin potassique émis en phase d'ouverture téthysienne, présence de minéralisations Cu et Zn). Il paraît donc possible d'envisager ici, pour l'activité radon, une origine lithogéochimique.

Socle métamorphique (Micaschistes, gneiss et amphibolite)

Le peu d'analyses de concentration en uranium et surtout d'activité radon n'autorise pas des conclusions définitives. Les valeurs obtenues pour l'uranium (1,8 – 2,3 ppm) sont plutôt au-dessus de la moyenne locale (1,9 ppm) et seraient en accord avec l'activité moyennement élevée en radon (14 007 Bq/m³).

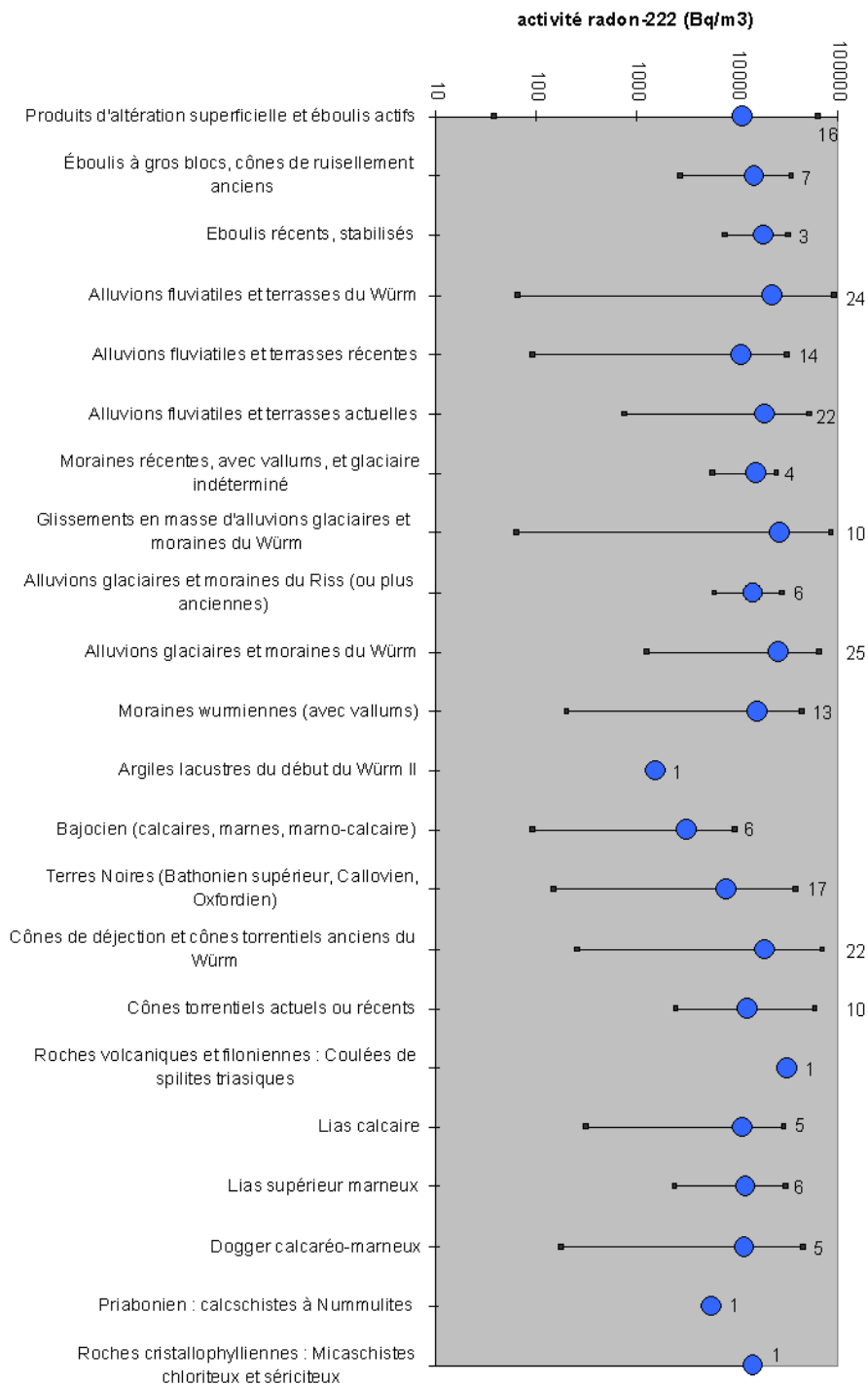


Figure 25: Répartition de l'activité radon en fonction des formations géologiques (valeurs moyennes en bleu).

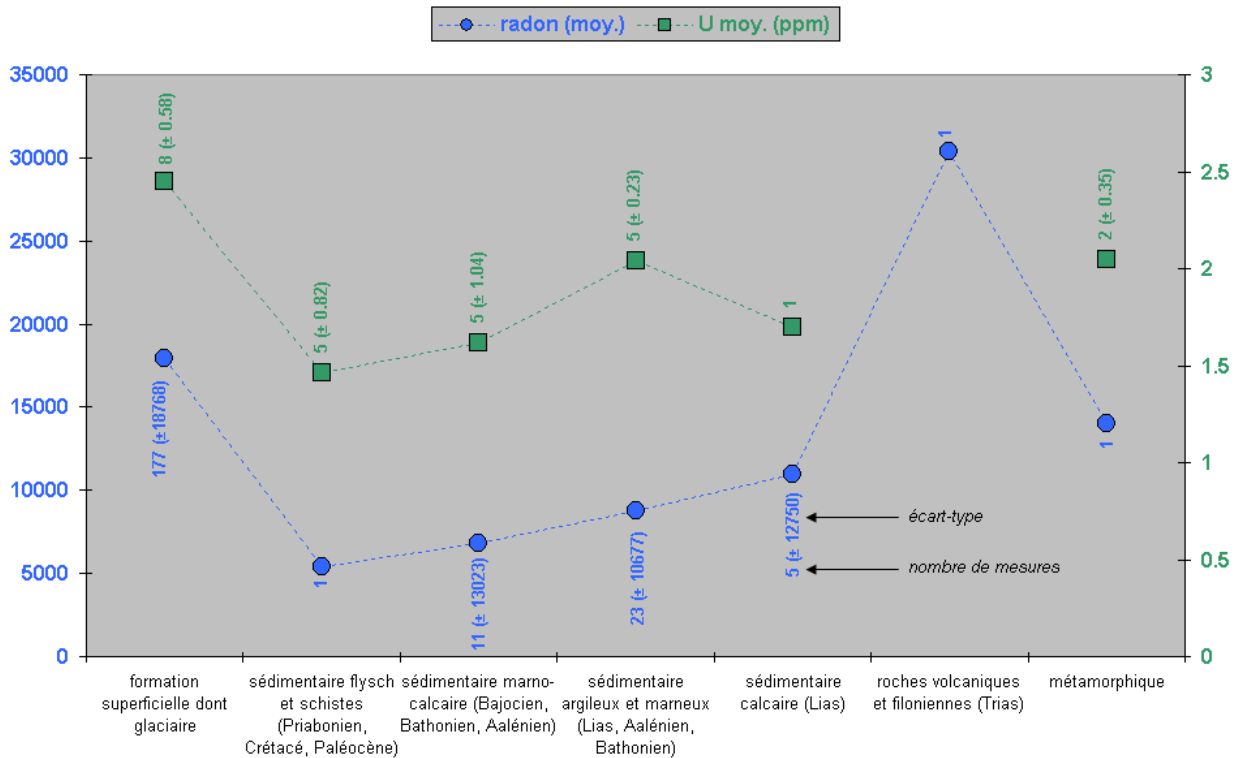


Figure 26: Corrélation entre l'activité radon et les teneurs en uranium en fonction des formations géologiques.

5.4.2. Répartition dans l'espace

Tout comme pour le traitement des données acquises dans le massif de l'Estérel, les activités radon et teneurs en U et Th sont reportées sur fond géologique 1/50 000^{ème} au sein des figures 27 et 28. Une interpolation des activités en radon est également disponible en figure 29, mais n'est significative qu'en fond de vallées. Comme évoqué en 4.2 et 4.3, cette zone du Champsaur est assez riche en radon (par comparaison aux activités mesurées dans l'Estérel), bien que les mesures aient été réalisées sous contexte météorologique peu favorable aux émissions gazeuses. Cette zone se signale également par des formations aux concentrations en uranium et thorium relativement faibles (tableau 14).

En conséquence, l'existence d'une correspondance directe lithogéochimie – activité radon apparaît peu évidente. Ainsi, les alentours alluviaux de Saint Bonnet semblent au premier abord caractérisés par une occurrence fréquente d'activités radon supérieures à $60\,000\text{ Bq/m}^3$, mais plus en détails certains prélèvements affectés aux mêmes formations sédimentaires n'atteignent même pas $1\,000\text{ Bq/m}^3$. Pour ces prélèvements « actifs », les teneurs en U et Th atteignent au mieux 3,4 et 10 ppm respectivement. La nature intrinsèquement hétérogène des sédiments de la vallée du Drac peut dans cette optique provoquer les variations enregistrées, sans qu'il soit possible de prédire *a priori* si l'une ou l'autre des formations morainique ou alluviale est plus favorable à la production de radon.

Ce constat mérite toutefois d'être nuancé plus en aval, vers Chauffayer, jusqu'à la confluence Drac – Séveraisse (alluvions du Würm récent, Fx et Gx). Dans ce triangle sont en effet mesurées les deux activités les plus fortes (supérieures à $80\,000\text{ Bq/m}^3$; tableau 14), d'autres prélèvements s'étalant entre $24\,000$ et $74\,000\text{ Bq/m}^3$. Ces alluvions glaciaires renferment peut-être des éléments plus aptes à produire du radon en provenance du massif du Pelvoux et de ses roches cristallines (mais une fois encore une grande hétérogénéité spatiale existe, des activités aussi faibles que 300 Bq/m^3 y étant également mesurées). Plus au Nord, le passage du resserrement sédimentaire calcaire (li) menant au lac du Sautet se traduit par une chute ponctuelle des activités radon (300 à $3\,000\text{ Bq/m}^3$), ré-augmentant par la suite à la faveur d'un retour au droit de formations détritiques. Ici la grande pauvreté en uranium (1,7 ppm) et l'absence de thorium peuvent expliquer cette chute localisée des activités radon.

Un point intéressant complémentaire serait d'étudier les formations de socle largement présentes sur la carte géologique d'Orcières (gneiss orthodérivés et granite du Vieux Chaillol, micaschistes des « Dalles Noires », ...), dont les alluvions de vallée doivent renfermer des débris.

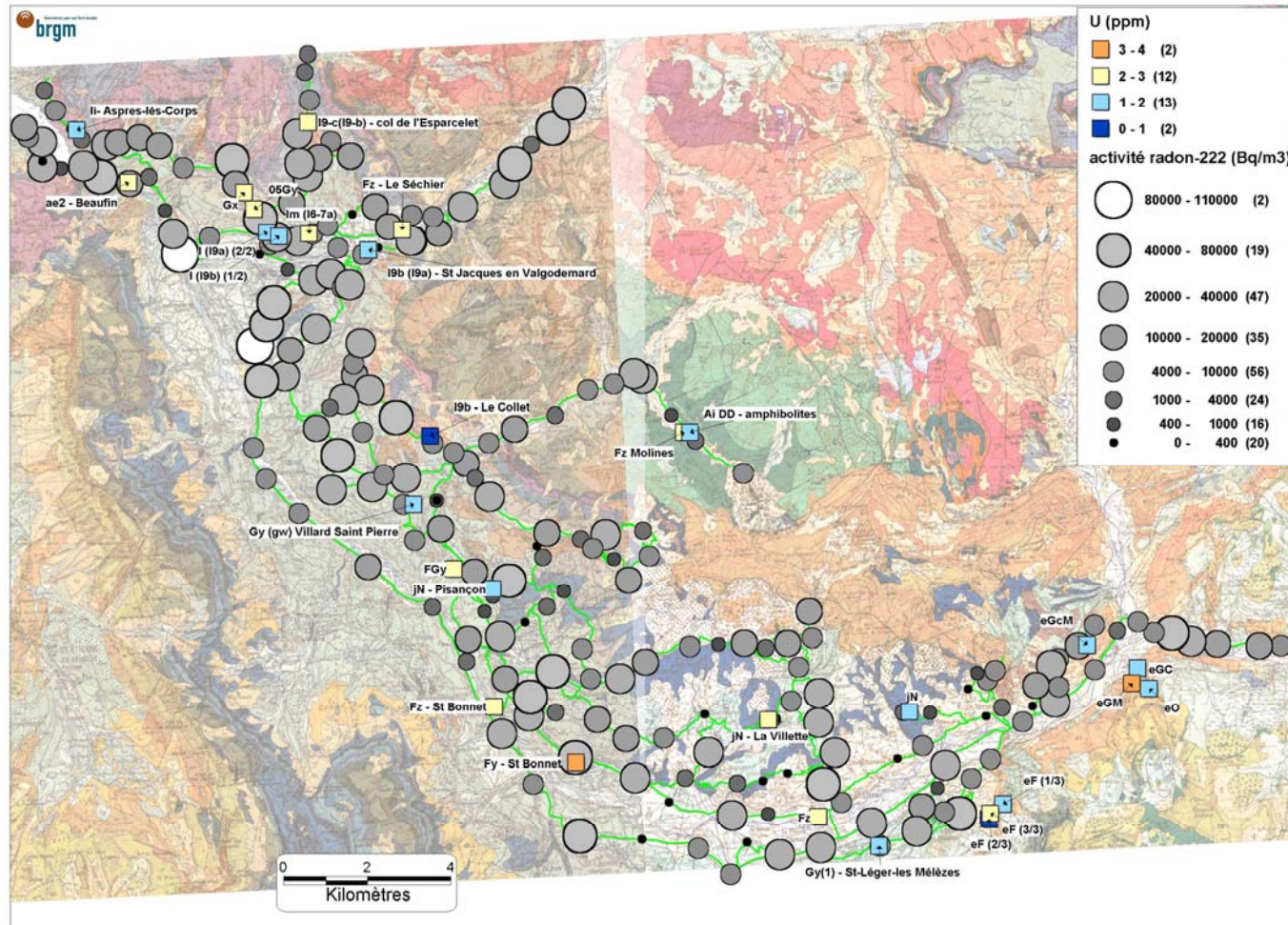


Figure 27 : Champsaur, activités en radon dans les sols et teneurs en uranium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000^{ème} (feuilles de Saint-Bonnet et d'Orcières)

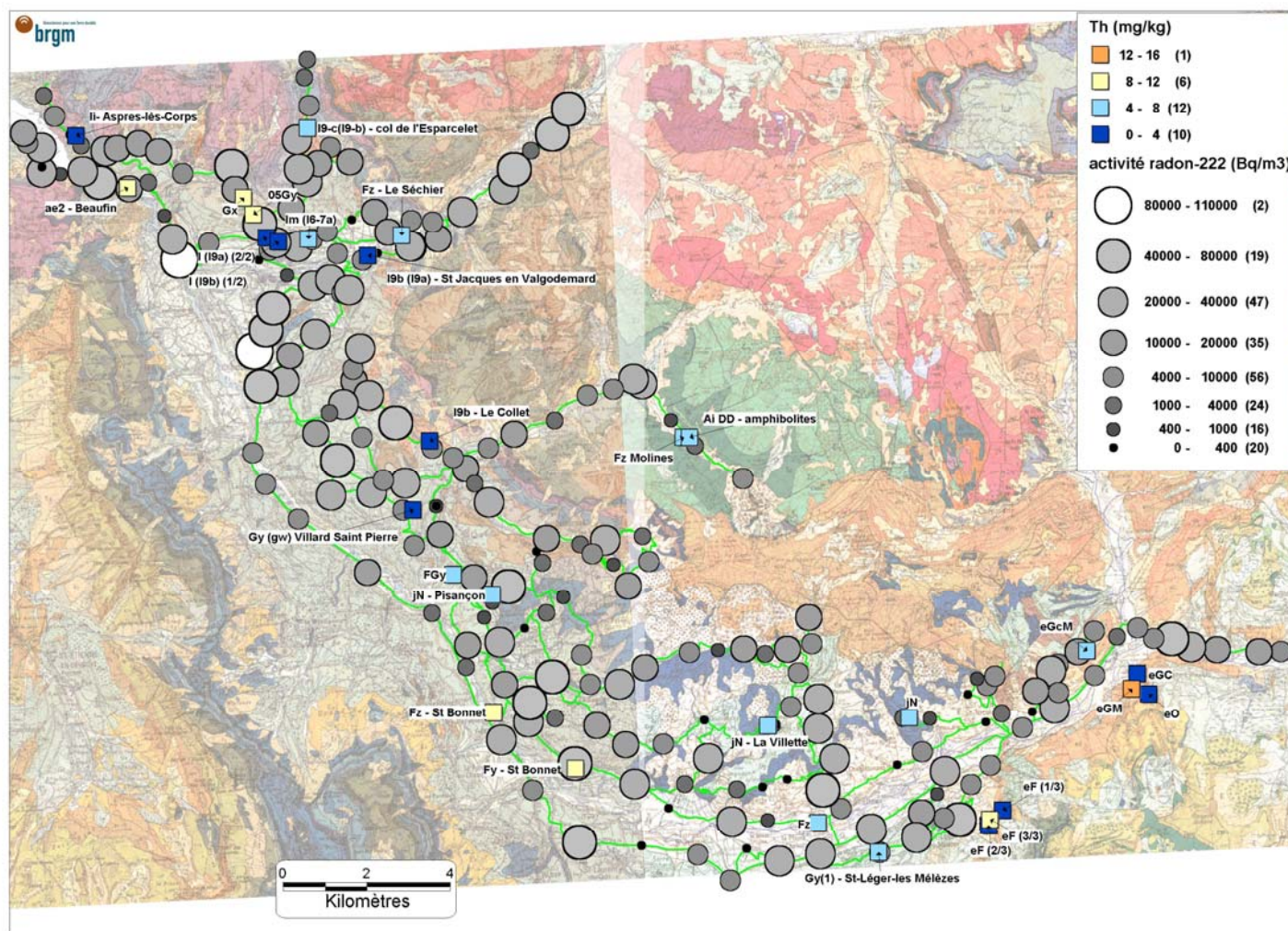
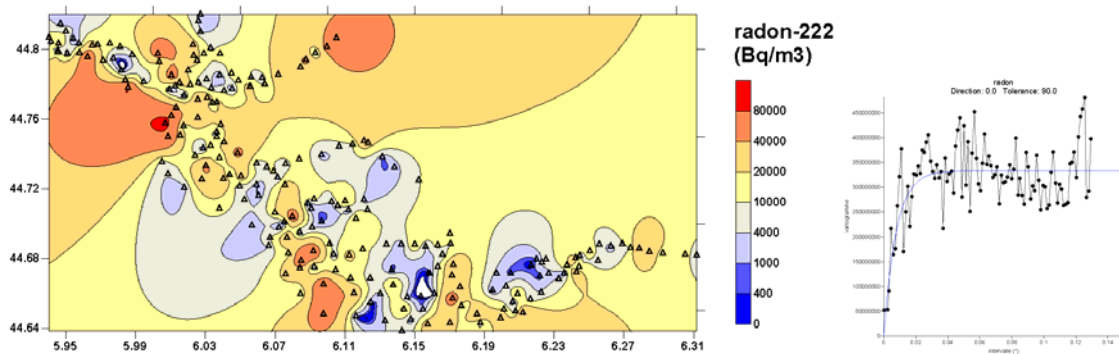


Figure 28 : Champsaur, activités en radon dans les sols et teneurs en thorium dans les roches, sur fond géologique 1/50 000^{ème} (feuilles de Saint-Bonnet et d'Orcières)



Les axes sont gradués en longitude (°Est, WGS84) pour les abscisses et latitude (°Nord WGS84) pour les ordonnées ; le variogramme correspondant est reporté à droite ; l'interpolation n'a de valeur qu'en proche voisinage des points de mesures.

Figure 29: Interpolations par krigeage des activités radon à partir des mesures (triangle) sur le secteur du Champsaur

5.4.3. Autres facteurs influant

Drains tectoniques

D'une manière générale, le contexte alpin est *a priori* tectoniquement plus actif que le socle hercynien de l'Estérel.

L'étude des activités radon rapportées aux différentes formations géologiques conduit à envisager d'autres sources que la seule lithogéochimie des formations superficielles pour expliquer la répartition de ces valeurs d'activité.

Le CO₂ mesuré dans le sol, tout comme dans l'Estérel, peut fournir une indication sur l'implication du facteur tectonique. D'une manière générale les concentrations mesurées en CO₂ n'atteignent pas des niveaux plus élevés que dans l'Estérel. Cela peut s'expliquer par la présence de circulations d'eaux superficielles qui jouent là aussi un rôle d'écran à la migration du CO₂ vers l'atmosphère. Néanmoins, la densité de valeurs hautes est plus importante en Champsaur. Cet élément conforte l'hypothèse d'un rôle plus actif des failles dans ce secteur alpin.

Les hétérogénéités observées dans les formations détritiques récentes notamment pourraient s'expliquer à partir d'une autre hypothèse. Ces formations recouvrent les structures pré-existantes en masquant les failles qui affectent ces structures. Le radon ne diffusant pas latéralement, à la différence d'autres gaz des sols, des anomalies très ponctuelles peuvent se rencontrer au croisement d'une faille masquée sous les sédiments récents. Les formations détritiques récentes, relativement perméables à la migration du gaz, transmettraient donc des anomalies liées à des structures sous-jacentes qui permettent la migration de radon depuis les roches du socle qui constituent le terme source du radon.

Comme des hétérogénéités du même ordre se retrouvent dans les activités radon mesurées dans les calcaires marneux et les calcaires liasiques, il est légitime de se demander si un tel mécanisme est encore possible dans le cas de ces formations.

Fonds de vallée

Si le nombre total de mesures est comparable, leur répartition est contrastée. En raison du relief marqué (le Vieux Chaillol, au cœur de la zone investiguée culmine à 3 163 m) les mesures se sont concentrées dans les vallées en Champsaur (*cf* figure 2).

Comme cela a été signalé au § 3.2.5, la morphologie influence la teneur en gaz des sols, les **fonds de vallée** ont tendance à avoir des échanges avec l'atmosphère moins importants que les hauts de pente et les crêtes, et donc, des teneurs en gaz des sols plus élevées.

Sous-représentation des formations en relief

Cette contrainte du relief a conduit à sous-représenter l'échantillonnage de gaz dans les formations du socle (métamorphique et/ou magmatique) ou même des formations sédimentaires mésozoïques (souvent enrichies en matière organique, tels les Schistes Noirs) des sommets et des hautes pentes (*cf* figure 2). Ce biais explique que les valeurs maximales soient plus faibles en Champsaur. Cependant les formations détritiques de type torrentiel et/ou glaciaire récent n'ont pas conduit à une altération et un tri trop important des matériaux rocheux d'origine. Les valeurs de pouvoir d'exhalation ont donc été lissées mais pas ou peu atténuées.

Texture de roche

Les roches détritiques se composent de grains individualisés d'où le radon est plus facilement émis et plus facilement transporté qu'à partir de roches massives, à composition identique. Cette nature détritique plus ou moins grossière et l'âge récent des formations est *a priori* compatible avec un meilleur drainage des gaz profonds que les formations à dominante magmatique ou métamorphique plus anciennes de l'Estérel (*cf* figure 1, à l'exception de la vallée de l'Argens).

Profondeur de mesure

Les vallées du Champsaur sont plutôt formées de sédiments détritiques récents favorisant une meilleure pénétration des sondes de mesure (profondeur moyenne atteinte pour les mesures de 97,4 cm en Champsaur contre 71,2 cm en Estérel, *cf* tableaux 6 et 12). Une profondeur de mesure plus conforme, moins sujette à des échanges avec l'atmosphère peut avoir contribué à obtenir des valeurs d'activité radon plus élevées.

Age de la tectonique

Si la zone Estérel est compartimentée par de nombreuses failles, fractures et conduits d'alimentation magmatique, cette activité endogène est plus ancienne que celle existant dans la zone alpine du Champsaur.

Circulation d'eau superficielle

Comme cela a été noté au § 5.1.2, la forte pluviométrie ayant précédé la campagne de mesures en Champsaur a pu avoir un impact sur les mesures d'activité radon, notamment dans les formations perméables. Effet d'atténuation : comme cela a été rappelé au § 3.2.4, la pluviométrie reste de loin le principal facteur de modification de la migration du radon. Les circulations d'eau superficielles jouent le rôle d'écran et transportent le radon avec elles. Cet effet est probablement amplifié dans les zones les plus perméables au transport du radon. A cet effet s'ajoute l'engorgement des sols quand ils existent. D'où une atténuation probable des valeurs les plus élevées (ce qui n'a pas été le cas dans l'Estérel). D'où peut-être aussi une contribution aux contrastes d'activité observés dans diverses formations.

5.4.4. Bilan par rapport aux estimations de la phase 1 et exposition aux risques

Les estimations de « susceptibilité à l'émanation » issues de la phase 1 de cette étude sont indiquées dans le tableau 14 en regard des valeurs mesurées dans la phase 2. Il n'y a pas de grand écart entre les prévisions et les mesures même si ces dernières conduiraient plutôt à réévaluer vers le haut certains types de formations. Ainsi les alluvions récentes à actuelles sont-elles qualifiées de « pas ou peu émettrices » quand leur activité se situe dans une fourchette (large) de 808 à 51 249 Bq/m³. De même pour le Dogger calcaréo-marneux l'Aalénien supérieur et inférieur auquel le même label a été attribué (formations où la concentration en uranium ne dépasse pas 2,4 ppm) ont des activités respectivement à 12 114 à 43 920 Bq/m³. Cette sous-estimation peut provenir d'une surestimation du facteur lithogéochimique. Toutes ces formations sont effectivement relativement pauvres en uranium. Il convient alors de trouver une autre origine au radon mesuré.

Dans le Champsaur, du fait du relief, les mesures se sont focalisées dans les vallées qui étaient supposées être globalement des zones à faible « potentiel d'émanation » radon sur la carte de « susceptibilité à l'émanation » radon produite par Terrier et al, 2004. S'il se confirme que la concentration en uranium y est relativement faible (< 3 ppm), l'activité radon mesurée, en revanche, peut y être assez élevée (> 40 000 Bq/m³) dans les dépôts d'alluvions, de moraines ou de cônes de déjection récents qui caractérisent les vallées, par ailleurs plus peuplées que les zones de montagne. La révision de l'exposition aux risques dans cette zone s'avère donc justifiée.

5.5. CONCLUSIONS SUR LA ZONE CHAMPSAUR

La campagne de mesures de l'activité radon des sols de l'Estérel combinée à l'analyse des concentrations en uranium et thorium des formations géologiques a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- les conditions météorologiques plus défavorables que dans l'Estérel (pluies ayant précédé la campagne de mesures) n'ont pas remis en cause la validité des mesures de l'activité radon ; elles ont cependant pu avoir un impact en atténuant les activités les plus fortes dans les zones très perméables (formations détritiques récentes) comme dans celles qui le sont moins (phénomène d'engorgement des sols);
- si les profondeurs requises d'échantillonnage ont été pratiquement toutes atteintes, la répartition de l'échantillonnage a été concentrée dans les fonds de vallée en raison du relief marqué de cette zone. Cette sur-représentation des fonds de vallée a conduit à sous-représenter les mesures (et l'échantillonnage) des formations en relief (socle et couverture sédimentaire), rendant plus approximative l'estimation directe du facteur lithogéochimique ;
- la gamme des concentrations en uranium des formations géologiques échantillonnées ne suffit pas à expliquer la disparité des activités radon de cette zone ;
- le recouvrement des failles par les formations détritiques récentes peut apporter une partie de l'explication car ces failles jouent le rôle de drain permettant la circulation du radon émis dans les formations profondes. Ceci en supposant que le contexte alpin conduit à une tectonique plus active que dans l'Estérel, par exemple ;
- la comparaison des estimations de « susceptibilité à l'émanation radon » réalisées lors de la phase 1 de cette étude avec les mesures et analyses réalisées pour cette étude confirme que la seule lithogéochimie ne peut expliquer la gamme des variations de l'activité radon. Une réévaluation de l'exposition aux risques paraît justifiée.

6. Conclusions

Cette étude s'est focalisée sur la mesure (analyse de l'uranium des formations géologiques et sur l'activité radon des sols situés au-dessus de ces formations) et sur deux zones à « susceptibilité d'émanation » radon supposée élevée.

Sur le plan méthodologique trois problèmes ont été rencontrés :

- la difficulté d'atteindre la profondeur requise dans les terrains de l'Estérel, souvent dépourvus de sol et où les roches dures sont à l'affleurement ;
- la sur-représentation des formations détritiques en général et en particulier en Champsaur où, en raison du fort relief, la campagne s'est déroulée essentiellement dans le fond des vallées ;
- l'influence, non quantifiable mais probable, de la pluviométrie abondante ayant précédé la campagne en Champsaur.

Les conséquences de ces difficultés ne sont pas rédhibitoires mais introduisent des biais dont il a fallu tenir compte dans l'interprétation des analyses.

La mesure du rayonnement gamma (par scintillométrie de terrain) n'a pas apporté de renseignements supplémentaires. Ce rayonnement n'est pas corrélé à l'émission alpha caractérisant le radon (mesures effectuées en Estérel) et il n'est que peu corrélé aux teneurs en uranium et thorium (mesures faites en Champsaur).

L'analyse du thorium, en dehors de son intérêt pour une éventuelle évaluation du risque du thoron (^{220}Rn), est de fournir un paramètre indépendant corrélé à l'uranium (sauf dans le cas de formations carbonatées). Cela a notamment permis de mettre en évidence des phénomènes d'altération (lessivage d'uranium) de certaines roches de l'Estérel.

L'analyse des teneurs en uranium des formations géologiques a conduit à une gamme relativement large de valeurs en Estérel. Dans les rhyolites notamment (3,6 – 4,9 ppm), ces concentrations sont toutefois significativement plus basses que celles ayant été analysées dans les mêmes formations par Lucazeau et Mailhe (1996) (5,89 – 7,17 ppm) et que celles de formations similaires existant en Corse.

Dans les deux zones, les activités radon sont relativement bien corrélées aux concentrations en uranium avec une gamme plus large de variation dans les roches détritiques. Dans chacune des deux zones, et encore davantage en Champsaur, il semble difficile d'expliquer ces activités radon par la seule lithogéochimie. Un linéament tectonique à l'est du Reyran, déjà mis en évidence, est jalonné de mesures d'activité radon et de concentration en CO_2 plus élevées. Le rôle de la tectonique est probablement encore plus étendu en Champsaur.

L'étude menée lors de la phase 1 avait tenu compte d'autres facteurs que la seule concentration en uranium des formations géologiques et ses conclusions sont relativement conformes à ce qui est obtenu par les mesures (analyse de la concentration en uranium et mesure de l'activité radon dans les sols). Néanmoins, et dans les deux zones, il a pu être mis en évidence, ponctuellement en Estérel, davantage en Champsaur, une surestimation du facteur lithogéochimique.

Cette constatation conduit à justifier une révision du niveau d'exposition aux risques notamment dans les vallées de la zone Champsaur où les mesures d'activité radon se sont révélées plus fortes que prévues. Les seules valeurs de concentration en uranium ne suffisent pas à localiser les zones potentiellement émettrices de radon.

Parmi les formations enrichies en uranium à l'origine d'anomalies radon, se trouvent en Estérel le gneiss du Tanneron, la base de la formation détritique permienne des Pradineaux et la rhyolite permienne cristallisée (Rht). En Champsaur il est plus difficile de repérer ces formations mais on peut supposer que des anomalies en uranium et radon sont associées aux coulées de spilite triasique et éventuellement à une formation wurmienne de la confluence Drac – Séveraisse.

Proposition de compléments d'étude

Pour les deux zones il convient désormais de vérifier l'impact des éventuels drains tectoniques (failles, fractures) et intrusif (filon, conduit d'alimentation magmatique). Cela peut être réalisé en :

- effectuant sur des sites de failles (ou d'intrusions) identifiées au même endroit (ou à proximité immédiate) des mesures d'activité radon dans le sol et des prélèvements de la (des) formations géologiques sous-jacentes,
- mesurant parallèlement à l'activité radon, celle d'autres gaz tels que le CO₂ et l'hélium également traceurs de drains de migration des gaz,
- prélevant des échantillons de CO₂ pour analyse isotopique permettant de discriminer le gaz d'origine biologique du gaz endogène.

Du point de vue des risques d'exposition, la prise en compte du thoron serait pertinente compte tenu des concentrations non négligeables en thorium des formations géologiques de ces zones.

En ce qui concerne le Champsaur, un complément de mesures radon (et autres gaz) comme de prélèvement de roches pour analyse d'uranium et de thorium serait utile dans les formations de la couverture sédimentaire et surtout dans celles du socle hercynien, sous représentées dans cette étude. Un tel complément de mesures et d'analyses pourrait également être utile en Estérel dans les formations rhyolitiques et détritiques permienne.

Enfin, à la lumière des résultats de mesure et d'analyse obtenus, une révision de la carte régionale de « susceptibilité à l'émanation » radon serait possible.

7. Bibliographie

M. Andjelov, D. Brajnik (1996) "Map of natural radioactivity and radon emanation in Slovenia" Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. 799-804.

Arnaud H., Buffet C., Gilberg ., Gidon M., Monjuvent G., Vernet J. (1980) Notice de la Carte Géologique au 1/50 000 ème Feuille de Saint-Bonnet, Edit. BRGM. 43 p.

Baciu A. C. (2005) "Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania)" Journal of Environmental Radioactivity, 83, pp. 171-189.

Baixeras C., Erlandsson B., Font Li., Jönsson G. (2001) « Radon emanation from soil samples » Radiation Measurements, 34, pp. 441– 443

Baubron J. C. (2000) « Cartographie prédictive du risque radon en région Corse » Rapport BRGM /RP-50200-FR, 35 p.

Baubron J.C., Sabroux J.C. (1984) - Analyses des gaz des sols sur les zones de Moscou et Bouillante (Guadeloupe), Rapport BRGM n° 84 SGN 400 GTH.

Beaubien S.E., Ciotoli G., Lombardi S. (2003) - Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy), Journal of Volcanology and Geothermal Research 123, 63-80

Béchenec F. (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 1/25 000 du socle de la région des Pays de Loire » Rapport BRGM R-40895, 126p.

David A. (1990) « Influence des paramètres météorologiques sur les émanations radon » Rapport BRGM R30953 EAU 4S 90 , 94p.

DDASS des Hautes Alpes (1999) « Information sur le radon dans les Hautes Alpes (« cartographie du risque radon suite aux campagnes de mesures » réalisées dans l'habitat et « cartographie géologique du risque radon »). Rapport de présentation au conseil départemental d'hygiène.

Debelmas J., Durozoy G., Kerchkove C., Monjuvent G., Mouterde R., Pêcher A. (1981) Notice de la Carte Géologique au 1/50 000 ème Feuille d'Orcières, Edit. BRGM. 27 p.,

Delpont G. (2002) « Cartographie prédictive du potentiel d'émanation du radon en région Midi-Pyrénées. Département de la Haute-Garonne » Rapport BRGM/RP-51850-FR, 27p.

Delpont G., Souchal C. (2002) « Cartographie prédictive du potentiel d'émanation du radon en région Midi-Pyrénées. Département du Lot » Rapport BRGM/RP-51850-FR, 27p.

Faure G. (1986) "Principles of isotope geology" 2nd edit. J. Wiley & sons, 589 p.

Flechard C.R., Neftel A., Jocher M., Ammann C., Leifeld J., Fuhrer J. (2007) - Temporal changes in soil pore space CO₂ concentration and storage under permanent grassland, *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 66–84

Gal F., Fourniguet G., avec la collaboration de Audouin N., Brach M., Braibant G., Joublin F. (2008) - Etablissement d'une cartographie « zones d'exhalations potentielles en radon » dans le bassin de Nancy. Phase 2 – Mesure, interprétation et cartographie de la présence de gaz radon dans les sols, rapport BRGM/RP-56689-FR, 46 p., 7 fig., 5 tab., 3 ann. dont une en volume séparé, 1 CD-ROM.

Gal F., Le Pierres K., Brach M., Braibant G., Beny C., Battani A., Tocqué E., Benoît Y., Jeandel E., Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G., Pironon J., de Donato P., Garnier C., Cailteau C., Barrès O., Radilla G., Bauer A. (2008) - Surface gas geochemistry above the natural CO₂ reservoir of Montmiral (Drôme-France), source tracking and gas exchange between soil, biosphere and atmosphere, *soumis à OGST*

Hamada Y., Tanaka T. (2001) - Dynamics of carbon dioxide in soil profiles based on long-term field observation, *Hydrol. Process.* 15, 1829–1845.

Hinkle M.E. (1991) - Seasonal and geothermal production variations in concentrations of He and CO₂ in soil gases, Roosevelt Hot Springs Known Geothermal Resource Area, Utah, U.S.A., *Applied Geochemistry* 6, 35-47

Hinkle M.E. (1994) - Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soft gases, *Applied Geochemistry* 9, 53-63

Jassal R., Black A., Novak M., Morgenstern K., Nestic Z., Gaumont-Guay D. (2005) - Relationship between soil CO₂ concentrations and forest-floor CO₂ effluxes, *Agricultural and Forest Meteorology* 130, 176–192

Kataoka T., Tsukamoto O., Yunoki E., Michihiro K., Sugiyama H., Shimizu M., Mori T., Salashi K., Fuji S. (1992) « Variation of ²²²Rn concentration in outdoor air due to the variation of the boundary layer" *Radiation Protection Dosimetry* 45(1/4) 403-406.

Klusman R.W., Jaacks J.A. (1987) - Environmental influences upon mercury, radon and helium concentrations in soil gases at a site near Denver, Colorado, *Journal of Geochemical Exploration* 27, 259-280

Langmuir D., (1978) « Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, volume 42, issue 6, pages 547-569.

Lanini S., Alabouvette B., Baubron J.C., Lachassagne P. (2000) « Identification des zones à forte potentialité d'émanation en radon dans le département du Gard » Rapport BRGM /RP-50372-FR, 28 p.

Laville P. (1991) « Documentation cartographique sur le potentiel d'émanation du gaz radon en France » Rapport BRGM R-33491, 29 p.

Le Pierrès K., Gal F., Brach M., Guignat S. (2009) - Radon, Helium and CO₂ measurements in soils over a former exploited oilfield, Pechelbronn district, Bas-Rhin, France, *soumis à Appl. Geochem.*

Ielsch G., Thiéblemont D., Labed V., Richon P., Tymen G., Ferry C., Robé M.C., Baubron J.C., Béchenec F. (2001) "Radon (²²²Rn) level variations on a regional scale: influence of the basement trace element (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates", *Journal of Environmental Radioactivity*, 53, pp. 75-90.

Ielsch G. (2005) "La cartographie radon des territoires- Synthèse des approches utilisées en France et propositions d'éléments méthodologiques généraux ». Rapport IRSN DEI/SARG/2005-06, 80 p.

Linda C.S., Gundersen and R. Randall Schumann (1996) "Mapping the radon potential of the United States: exemple from the Appalachians", *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1. pp. 829-837.

Lucazeau F. et Mailhe D. (1996) « Heat flow, heat production and fission track data from the hercynian basement around the Provencal Basin (Western Mediterranean) *Tectonophysics*, 128, 335-356.

Mäkeläinen I., Arvela H., Voutilainen A. (2001) - Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation, *The Science of the Total Environment* 272, 283-289.

Savelli C. (2002) "Time–space distribution of magmatic activity in the western Mediterranean and peripheral orogens during the past 30 Ma (a stimulus to geodynamic considerations)", *Journal of Geodynamics*, 34, 99–126.

Schery S., Gaeddert D.H. (1982) "Measurements of the effect of cyclic atmospheric pressure variation of the flux of radon 222 from the soil" *Geophysical Research Letters* (9) 835-838.

Schery S., Gaeddert D.H., Wilkening M.H. (1982) "Factors affecting exhalation of radon from a gravely sandy loam" *Journal of Geophysical Research* (89) 7299-7309.

Tanner A.B. (1986) "Geological factors that influence radon availability" in *Indoor radon*, Proceedings of Air Pollution Control Association international conference, pp. 1-12, Pittsburgh, PA: Air Pollution Control Association (Publication Sp.54).

Terrier M., Thieblemont D., Simon B. (2004) - Identification des zones à forte potentialité d'émanation en radon dans la région Provence – Alpes – Côte d'Azur, Rapport BRGM/RP-53240-FR, 48 p., 18 ill., 4 ann.

Touchard F. (2004) « Cartographie prédictive de l'alea radon en Poitou-Charentes » Rapport BRGM /RP-53324-FR, 41 p.

Tourlière B., Le Berre P. (2006) « Cartographie prédictive des concentrations potentielles en radon en Basse-Normandie » Rapport BRGM /RP-54772-FR, 80 p.

Tourlière B. (2007) « Cartographie du potentiel d'émanation radon en Auvergne » Rapport BRGM /RP-55940-FR, 59 p.

Toutain J.P., Baubron J.C. (1999) - Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics*, 304, 1–27.

Toutin-Morin N., Bonijoly D., Brocard C., Broutin J., Crévola G., Dardeau G., Dubar M., Féraud J., Giraud J.-D., Godefroy P., Laville P., Meinesz A. (1994) – Notice de la Carte Géologique au 1/50 000ème Feuille de Fréjus – Cannes, 2^{ème} édition , Edit. BRGM. 189 p.,

Vodnik D., Kastelec D., Pfanz H., Macek I., Turk B. (2006) - Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses, *Geoderma* 133, 309–319

Annexe 1

Localisation des échantillons de roches en Sud-Estérel

1 - Sables : Ms

Les sédiments qui constituent les côtes de Fréjus et de Cannes proviennent de bassins d'alimentation déterminés et occupent la ligne de rivage ou sont étalés, à faible profondeur, près du littoral, sur une plate-forme étroite qui se termine, au voisinage de -100 m, par un ressaut bien marqué correspondant à la régression maximale du Würmien



Figure A 1.1 : Echantillon de sables (Ms).

2 - Alluvions, colluvions récentes : Fz

Les dépôts holocènes sont particulièrement épais dans les basses vallées comme celle de l'Argens où leur épaisseur atteint 85 m.

Ils correspondent au remblaiement versinien de paléo-vallées würmiennes profondément incisées dans les marnes pliocènes.

L'échantillon a été prélevé à la faveur d'une tranchée creusée récemment dans la formation holocène.

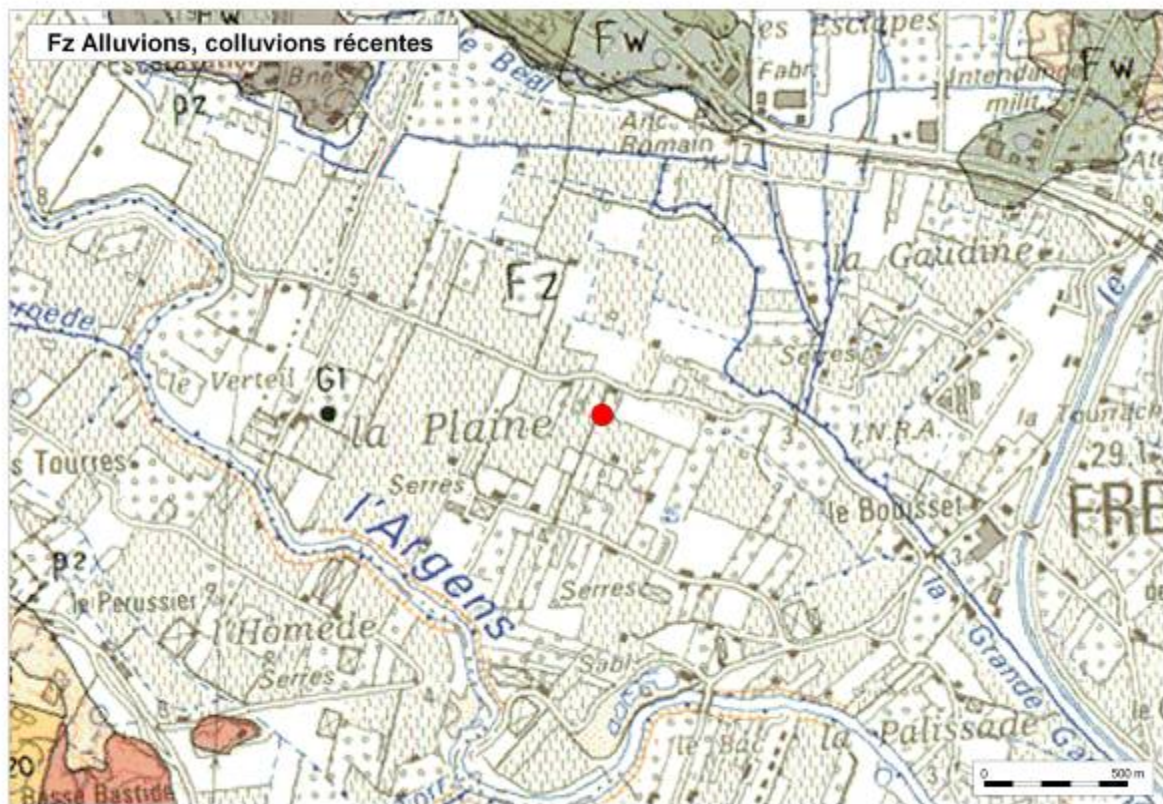


Figure A 1.2 : Echantillon d'alluvions et colluvions récentes (Fz)

3 - Alluvions, colluvions würmiennes : Fy

Cette formation alluviale est principalement développée dans les parties amont des vallées, en particulier dans celle du Reyran et de l'Endre. Le matériel est mal trié, sub-anguleux.

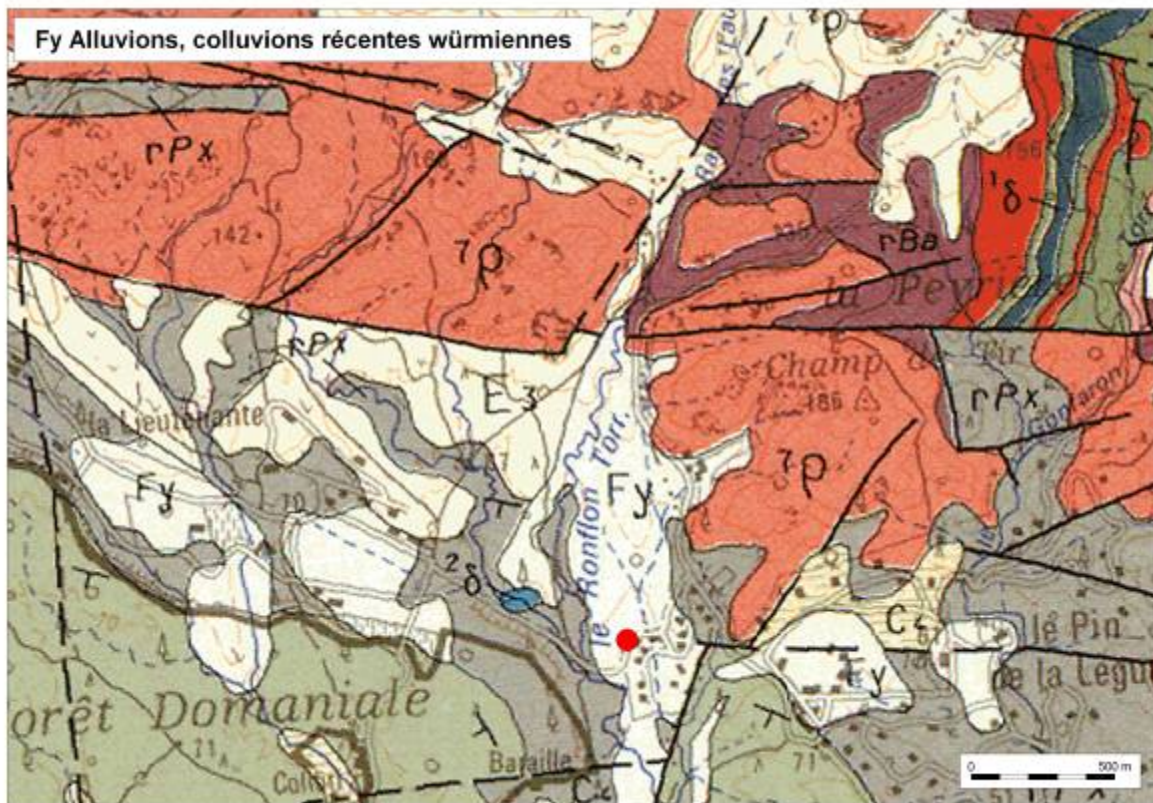


Figure A 1.3 : Echantillon d'alluvions et colluvions würmiennes (Fy)

4 - Marnes et argiles bleues plaisanciennes : p

Le Pliocène moyen à supérieur (p1) fluvio-lacustre et lagunaire est représenté par des sables, limons, argiles et cailloutis (7-8 m).

En raison de la très forte urbanisation, la formation n'est plus visible à l'affleurement. Toutefois un échantillon a été prélevé sur le parking de l'hôpital de Fréjus, en contrebas d'un petit talweg, remanié et mélangé avec des remblais.

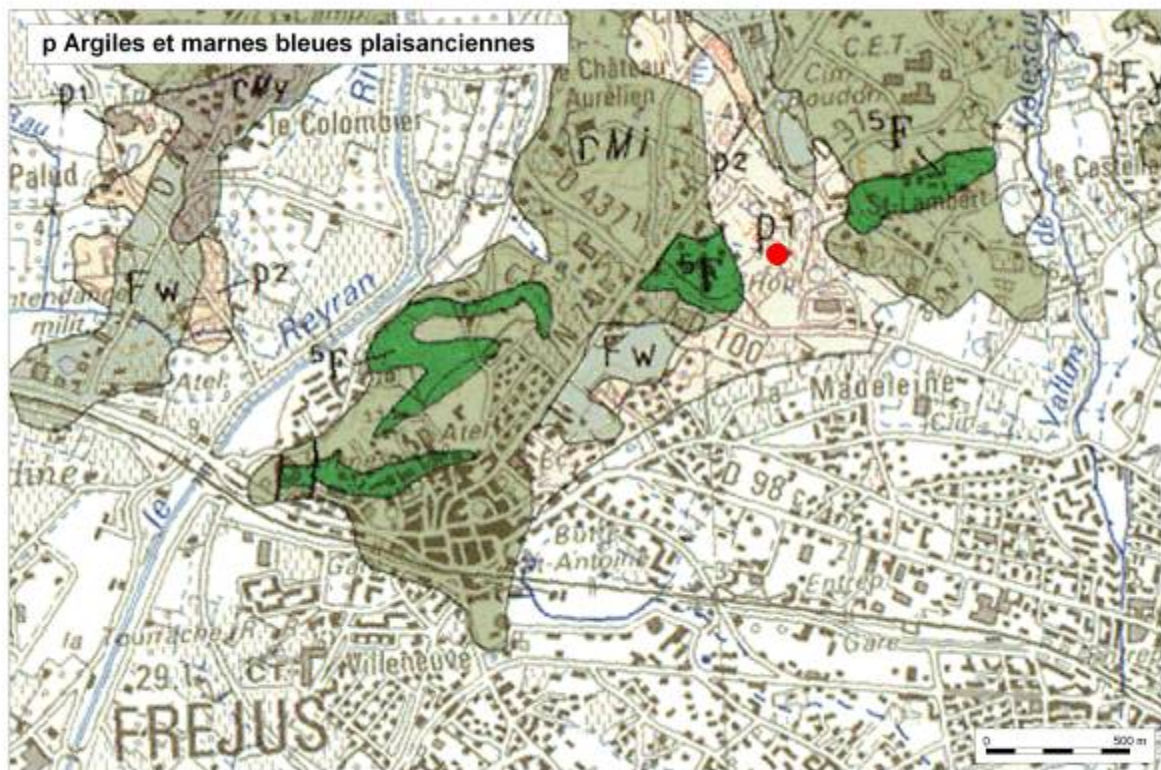


Figure A 1.4 : Echantillon d'argiles et marnes bleues plaisanciennes (p)

5 - Estérellites : EEg

L'estérellite (ϵ) affleure dans la partie méridionale de l'Estérel central, au nord du Drammont, sous forme d'un massif qui recoupe les formations permienes. La roche, couleur bleue, est riche en cristaux de plagioclases blancs, zonés.

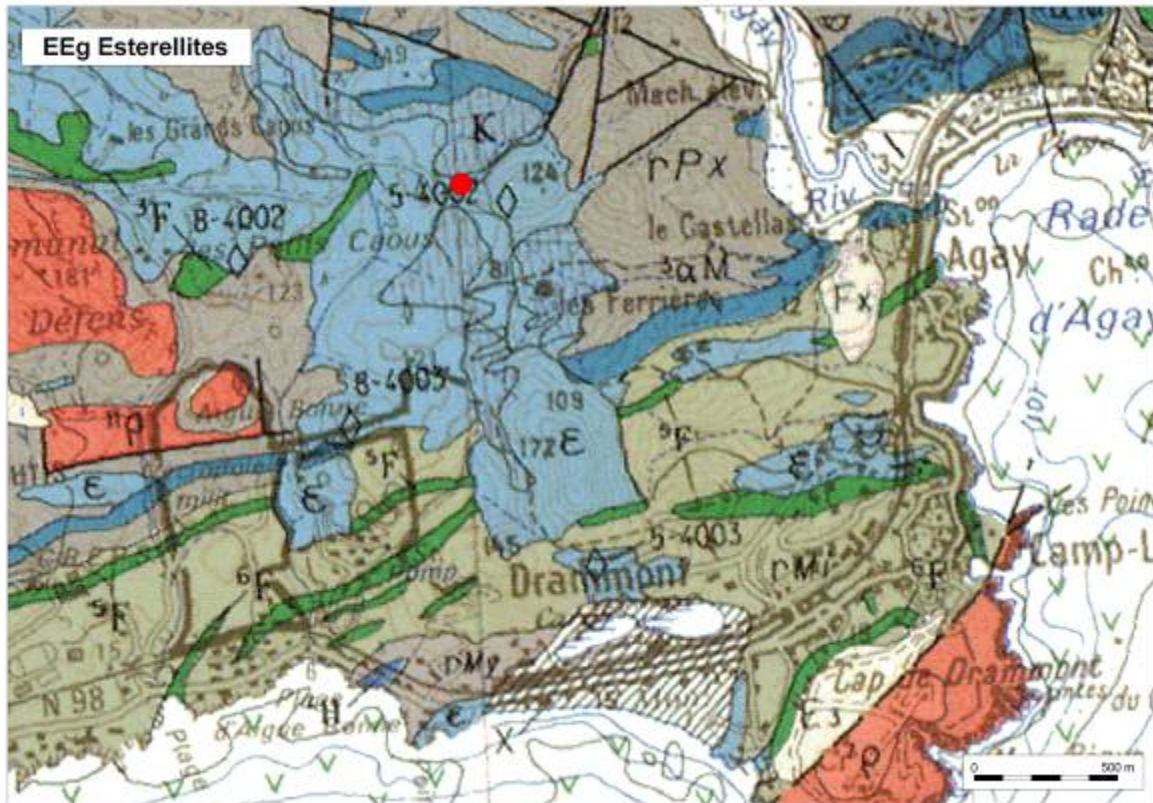


Figure A 1.5 : Echantillon d'estérellite (EEg)

6- Rhyolite : Rr

C'est une rhyolite (11p) rose orangé, à texture fluidale, aphyrique, avec de rares phénocristaux de quartz et de feldspath.

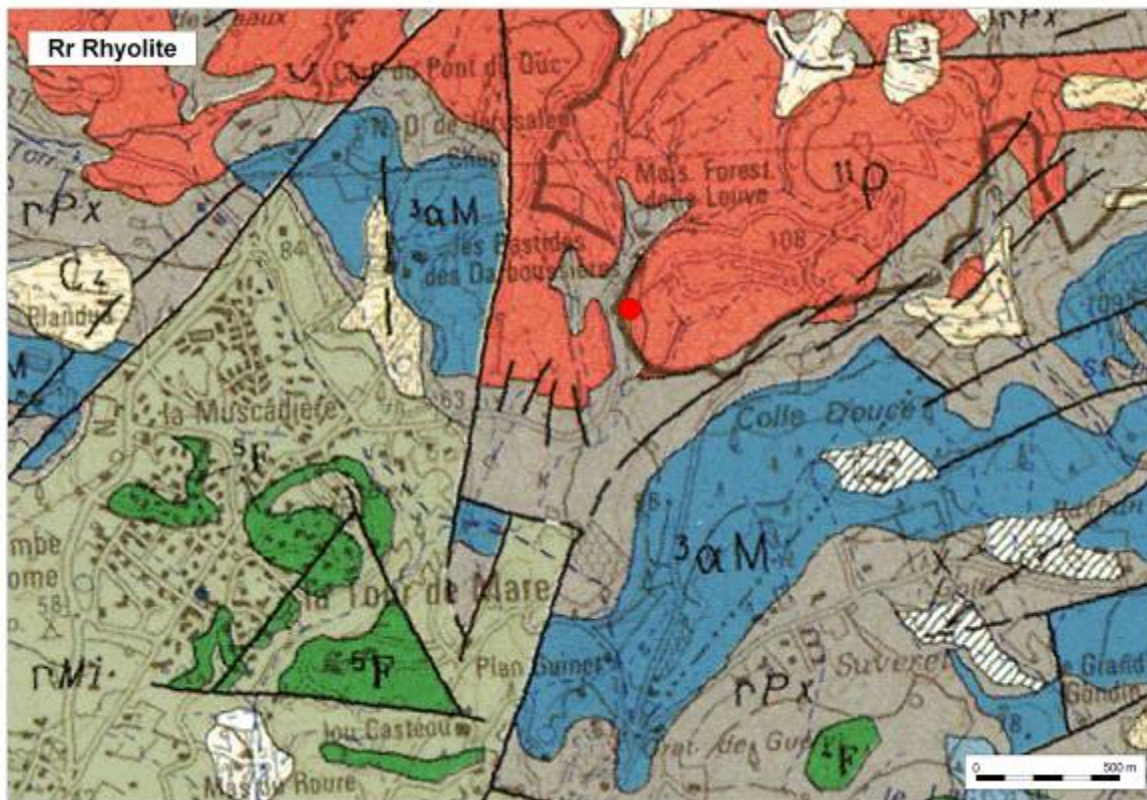


Figure A 1. 6 : Echantillon de rhyolite (Rr)

7 - Rhyolite : Rht

La plupart des massifs de l'Estérel sont constitués de rhyolite rouge à orangée. Son épaisseur varie de 150 à 300 m. Cette rhyolite (7p) est riche en phénocristaux de quartz et de feldspaths potassiques (microcline).

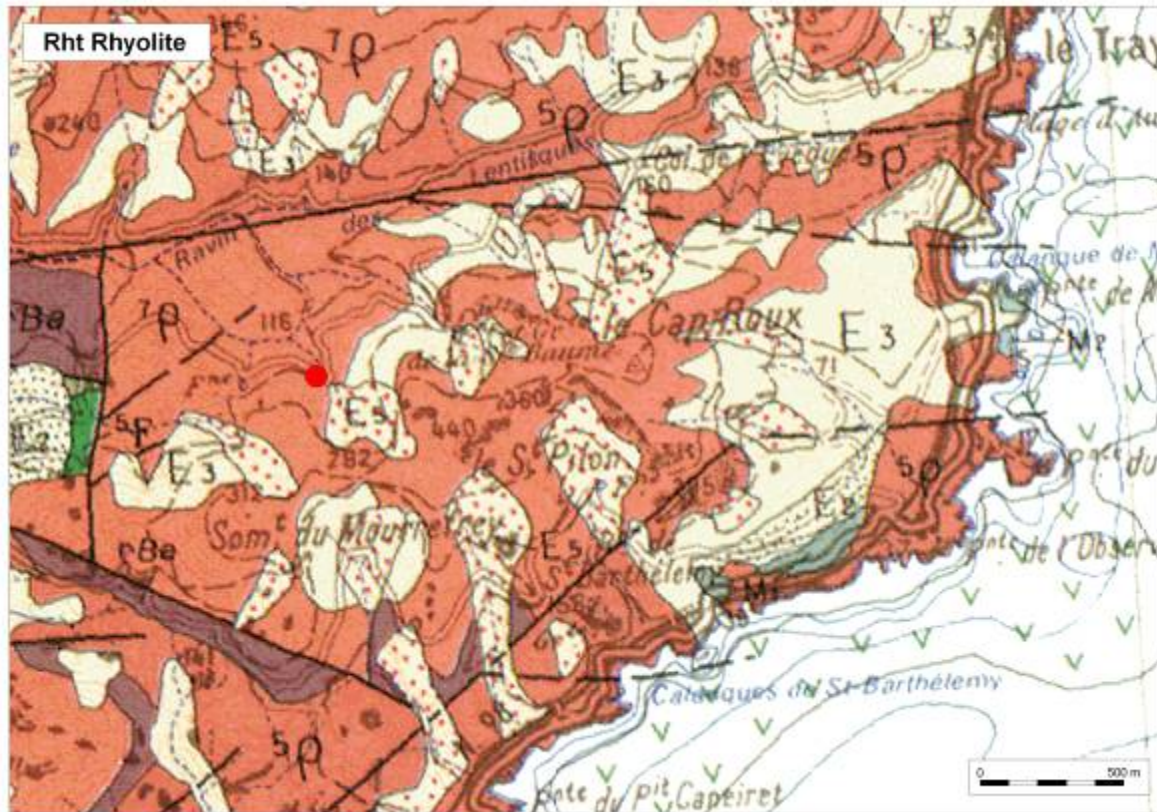


Figure A 1.7 : Echantillon de rhyolite (Rht)

8 - Dolérites : Dr

Il s'agit d'une coulée de mugéarite (**3αM**) épaisse de 20 à 50 m liée à l'activité volcanique du volcan d'Agay.

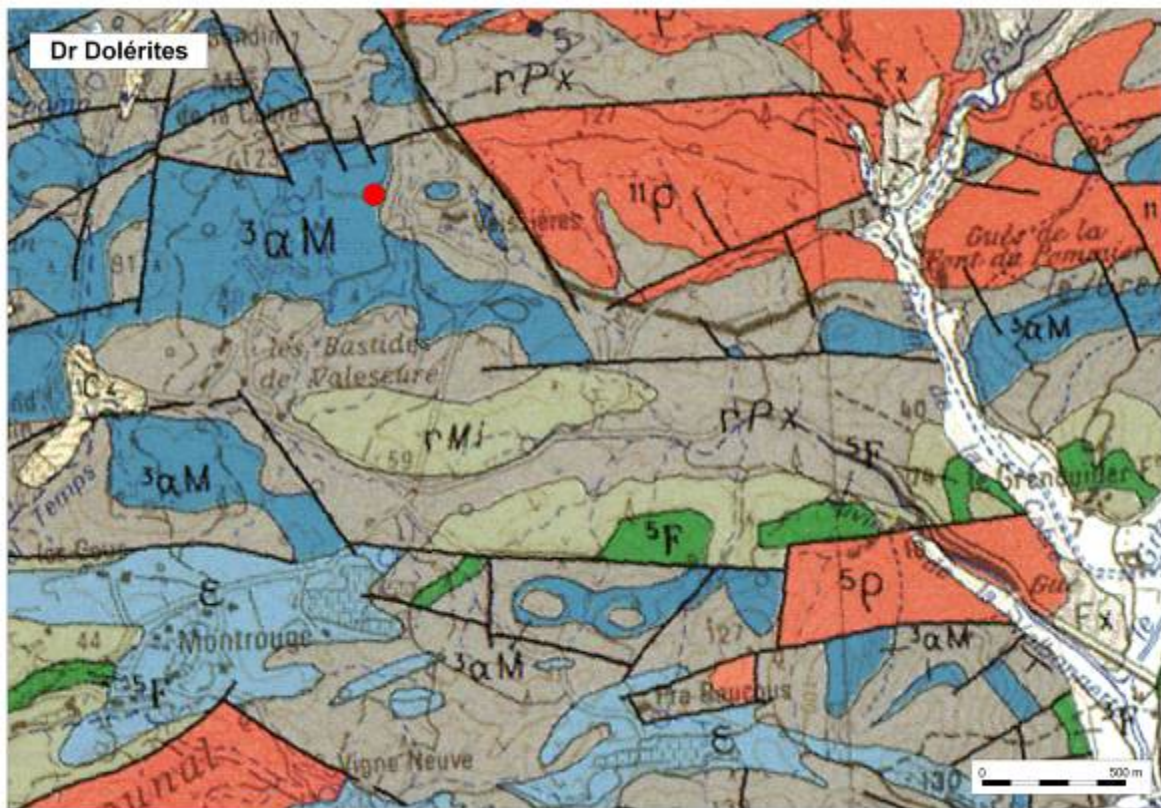


Figure A 1.8 : Echantillon de dolérite (Dr)

9 à 11 - Arkoses, pélites, grès : r

Le Permien de la zone d'étude comprend trois formations qui ont été échantillonnées séparément.

La formation du Muy, échantillon **r (1)**, notée **rMy**, épaisse de 100 à 300 m, est principalement constituée d'arkoses ou de grès fins feldspathique ou psammitiques.

La formation du Mitan, échantillon **r (2)**, notée **rMi**, épaisse de 100 à 300 m, est principalement constituée de grès feldspathiques verts ou roses. Elle se termine par des argiles marron.

La formation des Pradinaux, échantillon **r(3)**, notée **rPx**, épaisse de 0 à 200m, est constitué de grès verdâtres, beiges ou bruns, en grands chenaux fluviaux. La formation se termine par des argiles carbonatées vert vif ou brunes.

Ces trois formations débutent par un conglomérat de base non observé. De même les argiles supérieures n'ont pas été observées.

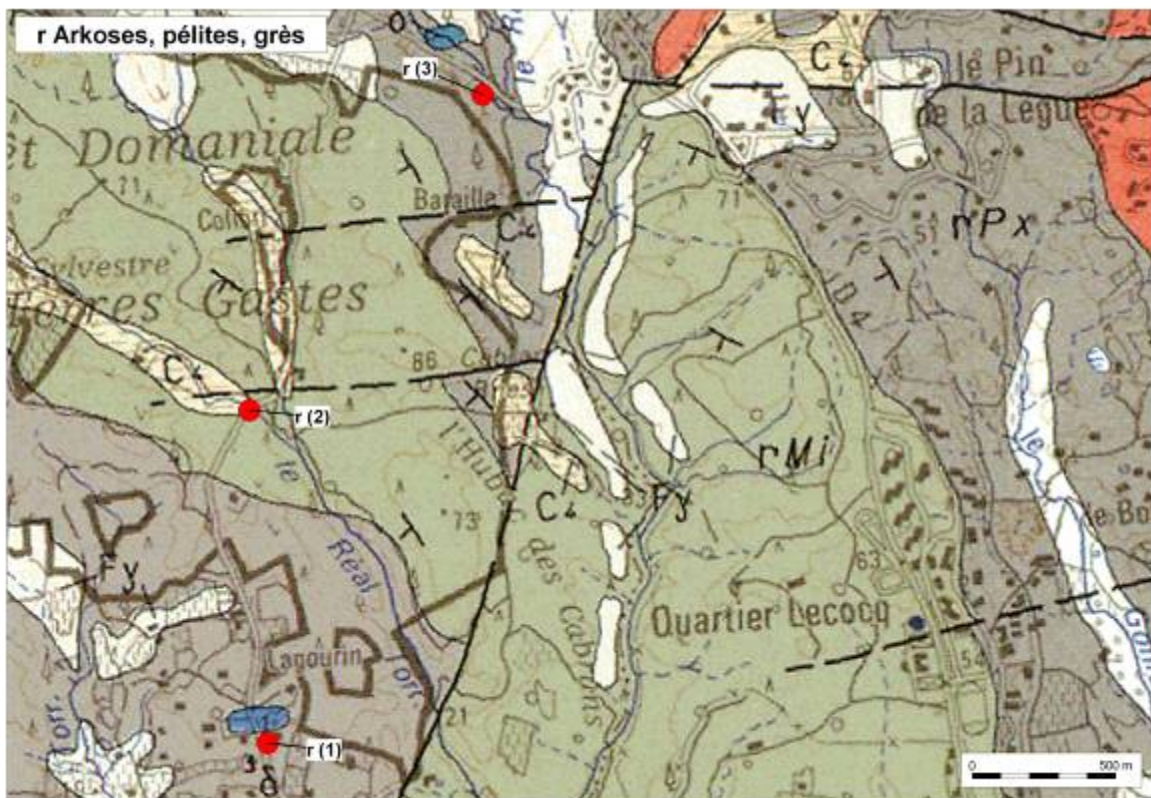


Figure A 1.9 : Echantillon d'arkoses, pélites et grès (r)

12 - Ensemble grés-schisteux, boghead, conglomérats : h

Le Carbonifère est représenté par la **série d'Auriasque (hA)**, épaisse de 800 m, qui affleure au sud-est du bassin du Reyran. Elle est constituée par une succession de grès fins argileux noirâtres riche en matière organique et de conglomérat à galets inférieur à 10 cm.

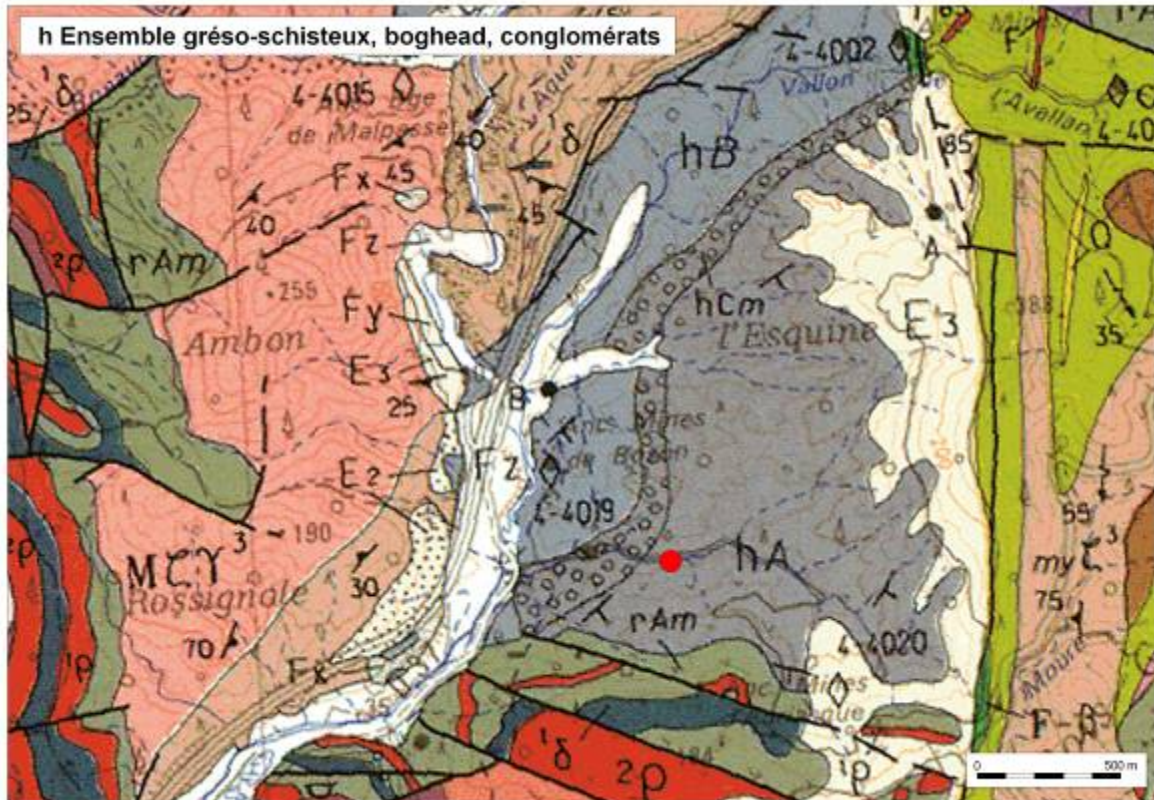


Figure A 1.10 : Echantillon de l'ensemble grés-schisteux, boghead et conglomérats (h)

13 - Gneiss supérieur du Tanneron : 2ae-a et 2ae

Il s'agit de gneiss migmatitiques (Mr_{5}^{5}) rubano-céillés (migmatites d'Auribeau) compacts, homogènes, à structure amygdalaire ; Ils sont constitués d'alternance de lits quartzofeldspathiques pluri-millimétriques et des lits fins de biotites.

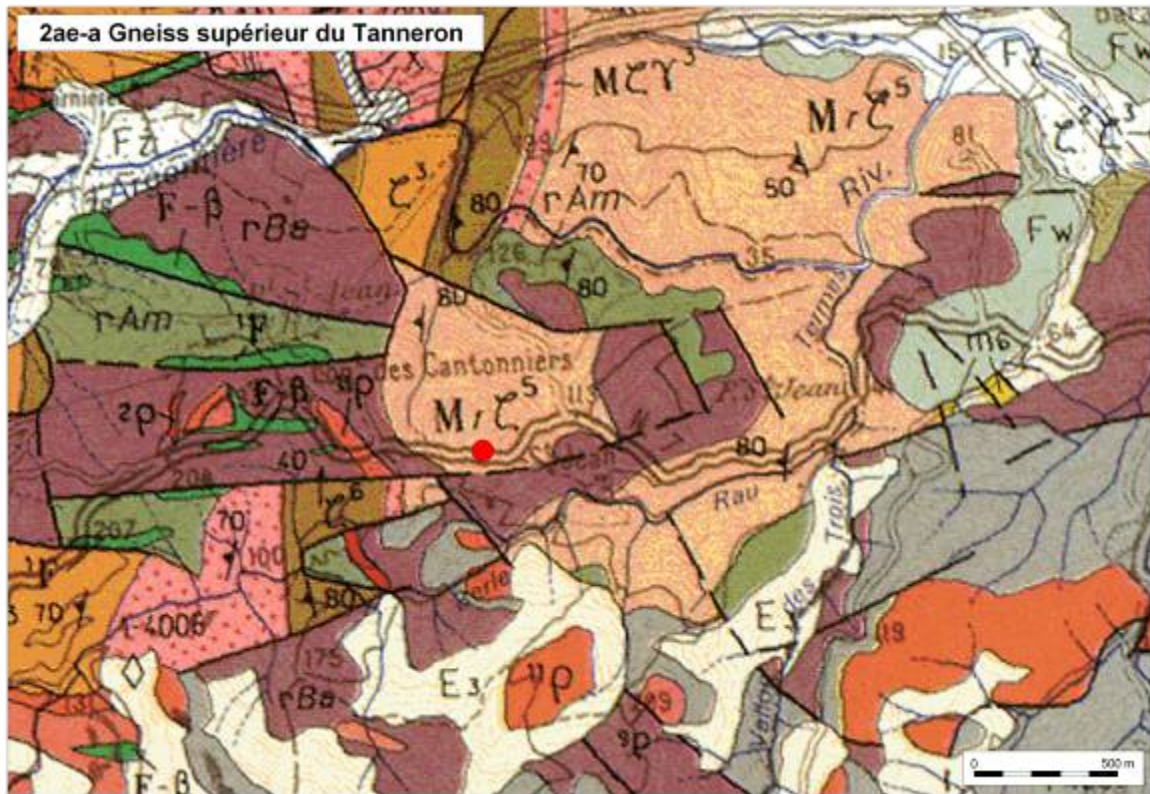


Figure A 1.11: Echantillon de gneiss supérieur du Tanneron (2ae-a)

15 - Leptynites : Ai

Cette formation d'ortholeptynites à grenats ($\lambda 3\gamma$) est caractéristique du secteur des Adrets (leptynites des Adrets). Ces leptynites épaisses de 400 à 500 m, sont compactes, homogène, de couleur rose à grise, à grain fin, avec un débit en bancs. Pour des raison d'accessibilité, elles ont été échantillonnées au nord légèrement à l'extérieur de la stricte zone d'étude.

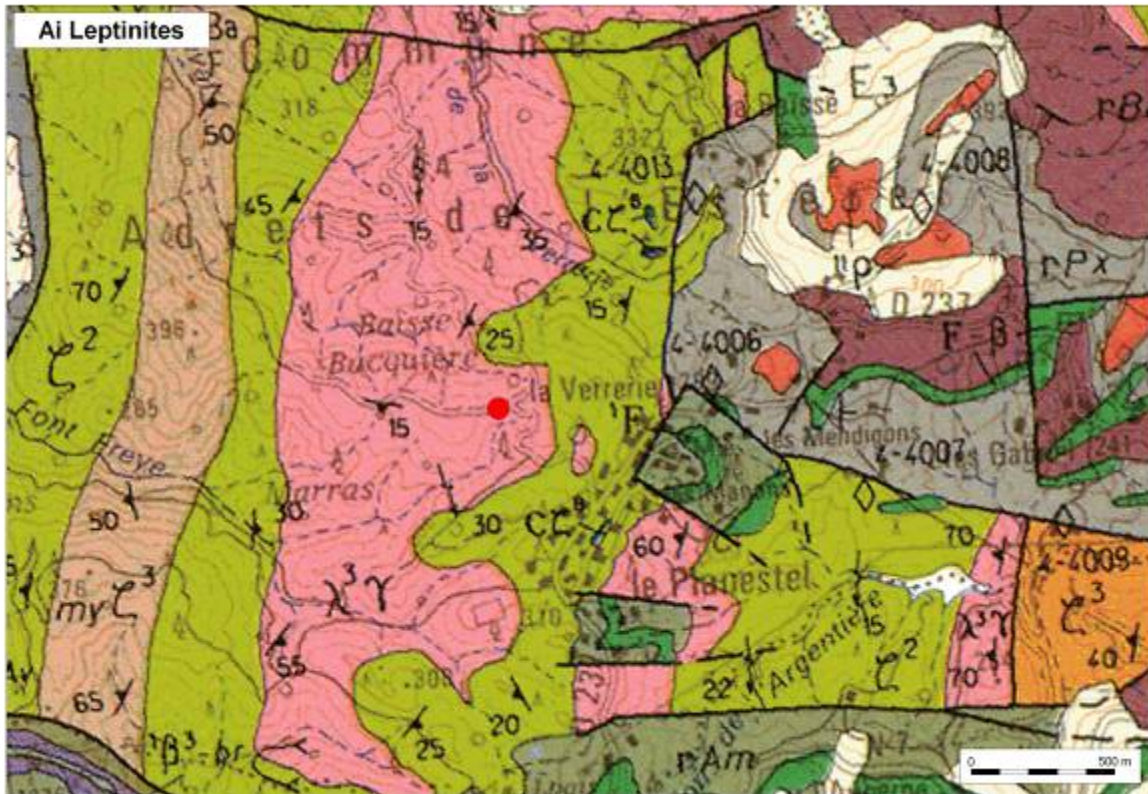
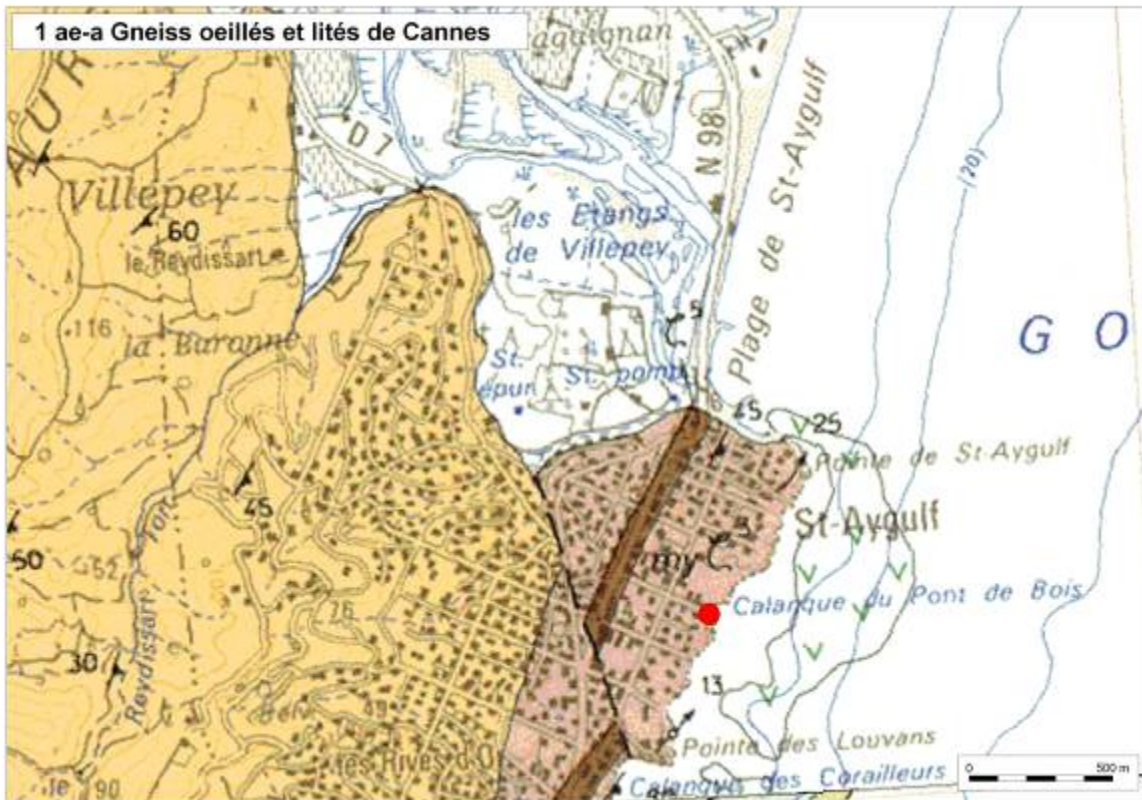
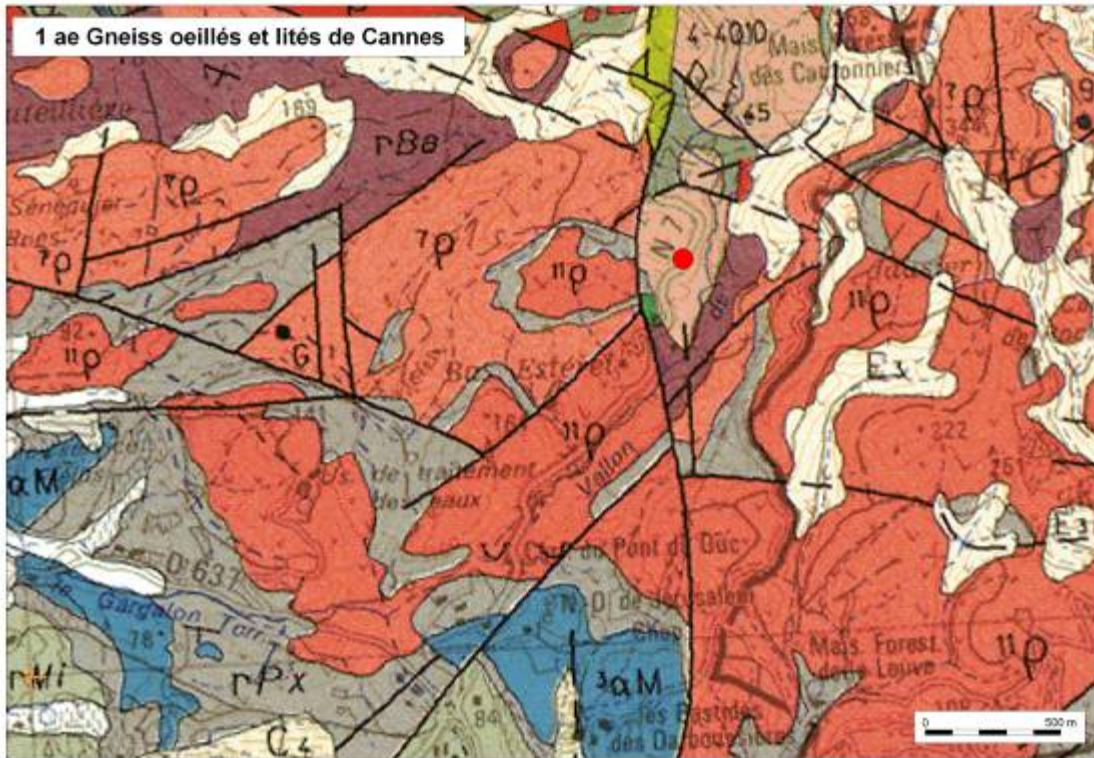


Figure A 1.13: Echantillon de leptynites (Ai)

16 à 18 - Gneiss œillés et lités de Cannes, domaine des migmatites hétérogènes : 1ae-a, 1ae et 1ae-aB

Le gneiss de La Moure (**my ζ 3**) a fait l'objet de 3 subdivisions à 1/250 000. Trois échantillons de cette même formation ont été prélevés en trois points correspondant à ces trois subdivisions : à Saint-Aygulf (**1ae-a**), au nord de la carrière du Pont-du-Duc (**1ae et 1ae-aB**). Il s'agit de gneiss mylonitisés, très micacés à structure œillée à lenticulaire.





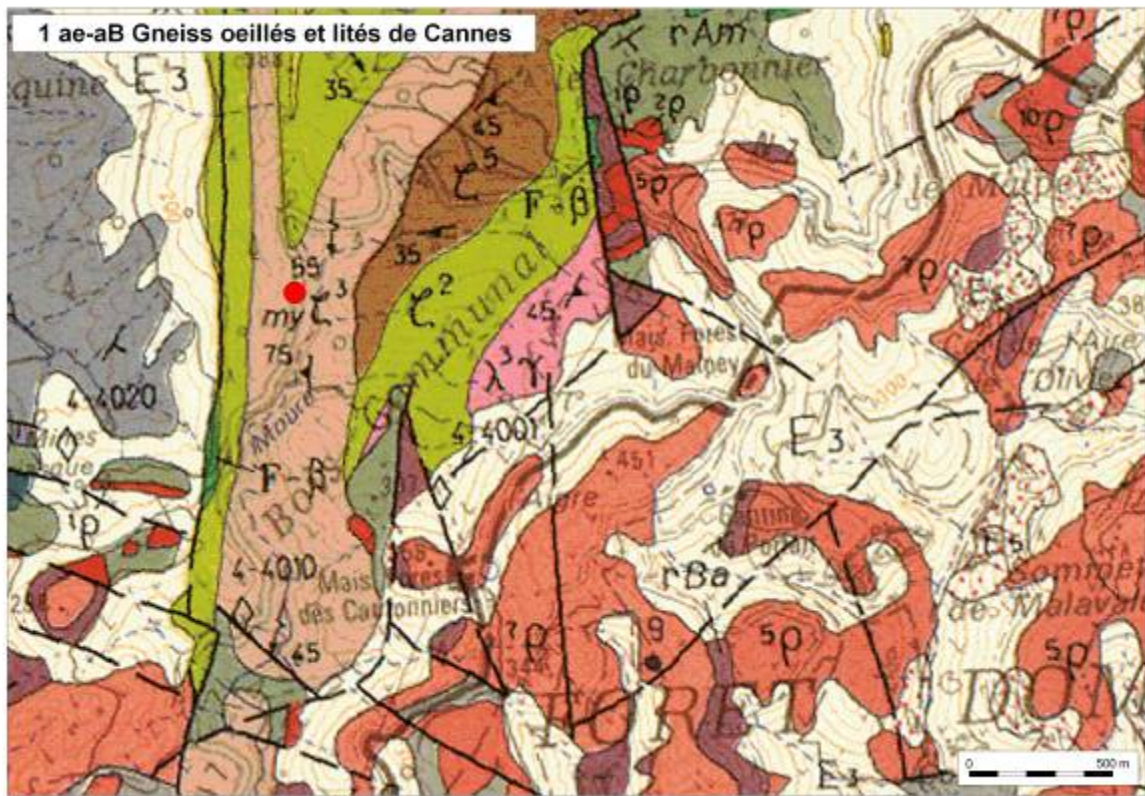


Figure A 1.14 : Echantillons de gneiss oeilés et lités de Cannes (1ae-a, 1ae et 1ae- aB) dans différents contextes

19 - Gneiss supérieur du Tanneron : 2ae-aB

Le gneiss des Petites-Maures est un gneiss métatexitique micacé à sillimanite, noté M ζ 2-3 sur la carte géologique à 1/50 000.

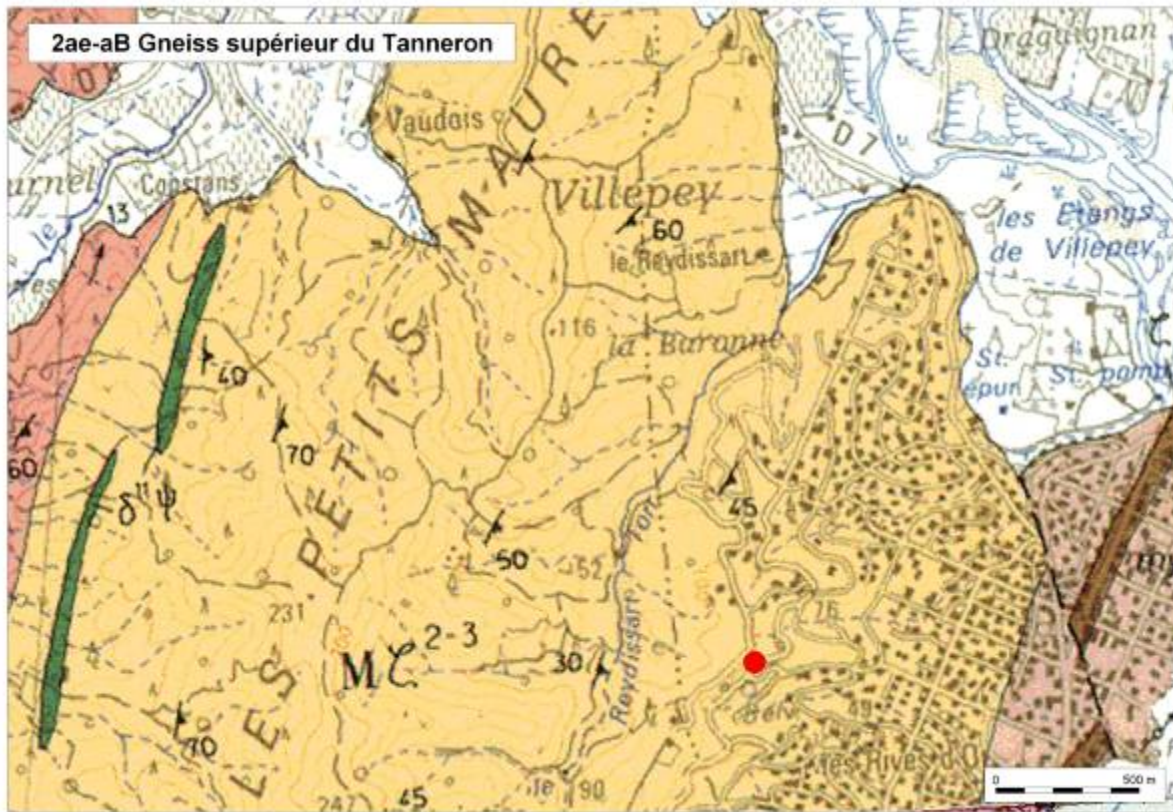
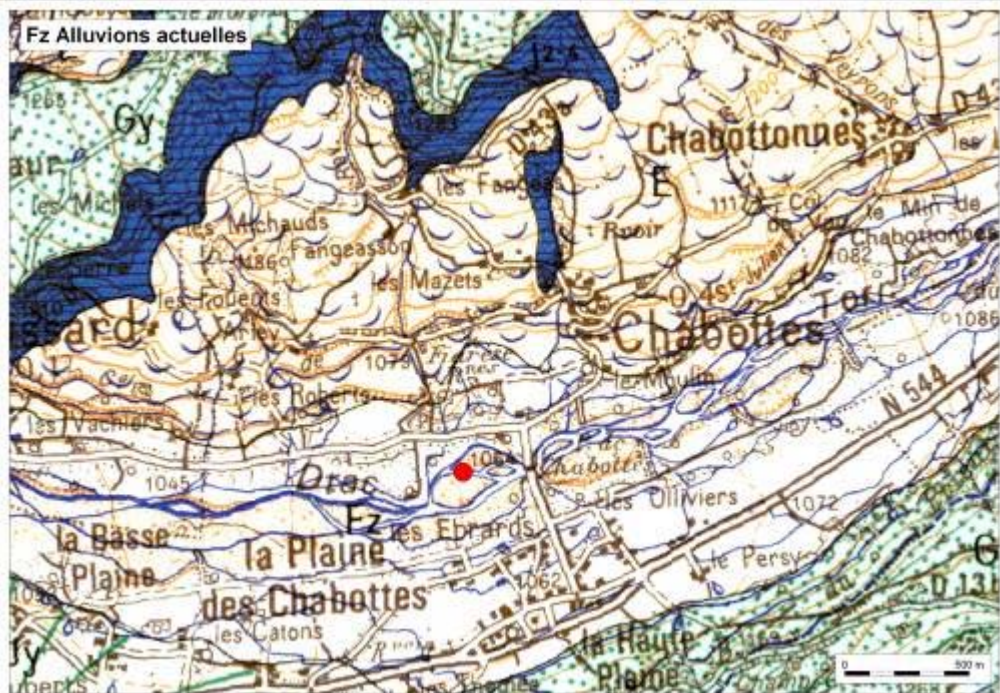
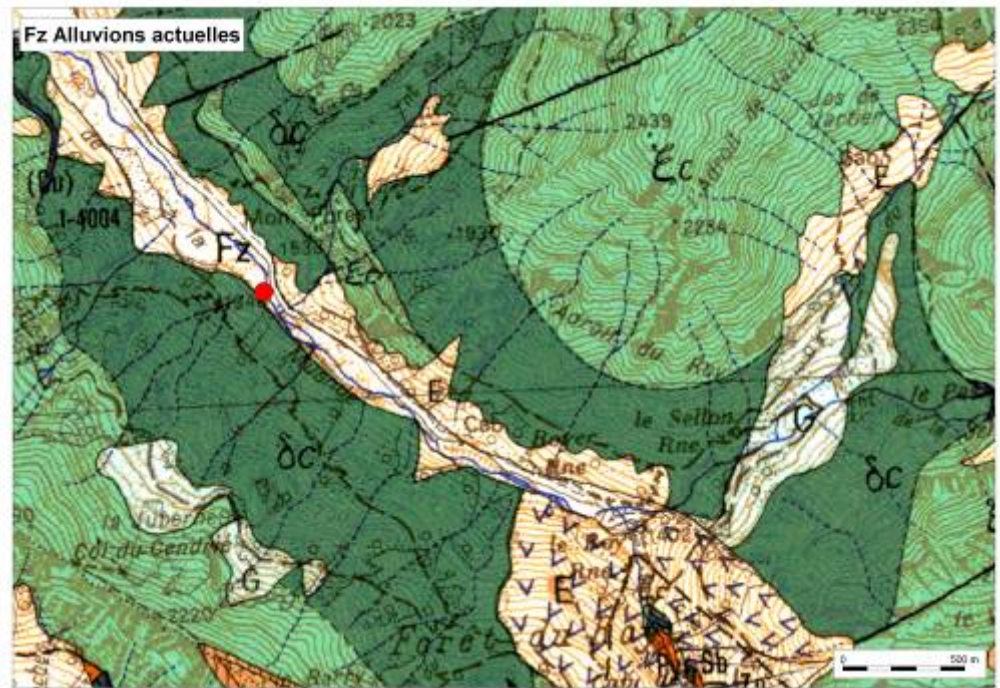


Figure A 1.15 : Echantillon de gneiss supérieur du Tanneron (2ae-aB)

Annexe 2

Localisation des échantillons de roches en Moyen-Champsaur

1 – Alluvions récentes, actuelles : Fz



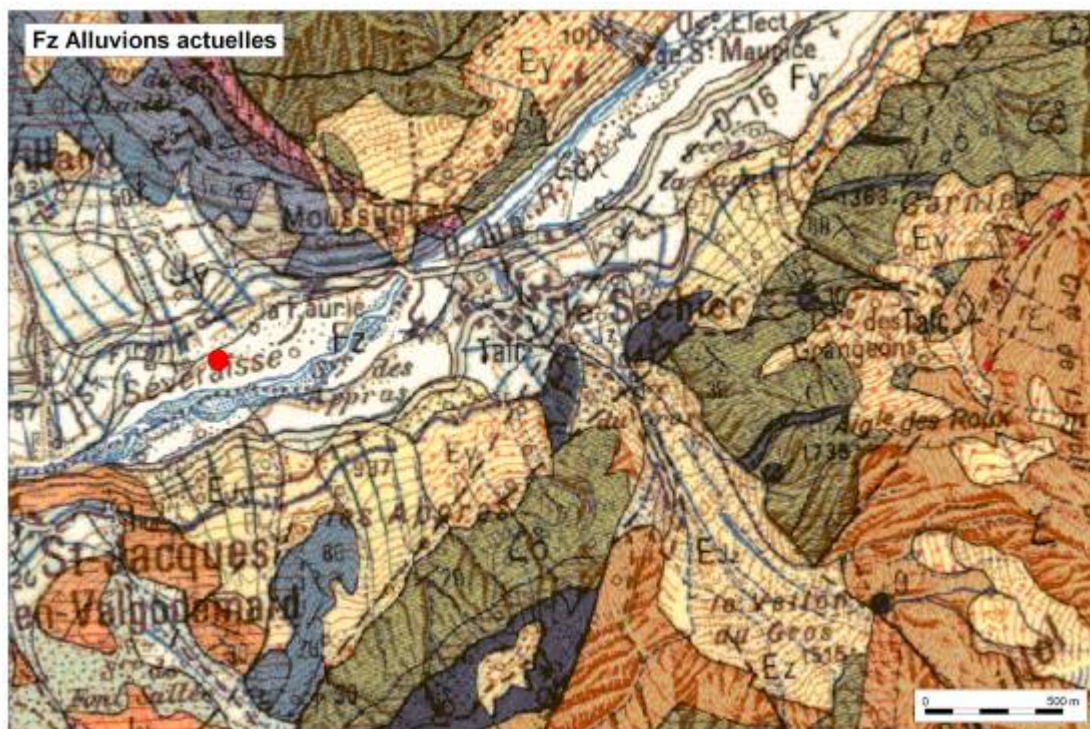
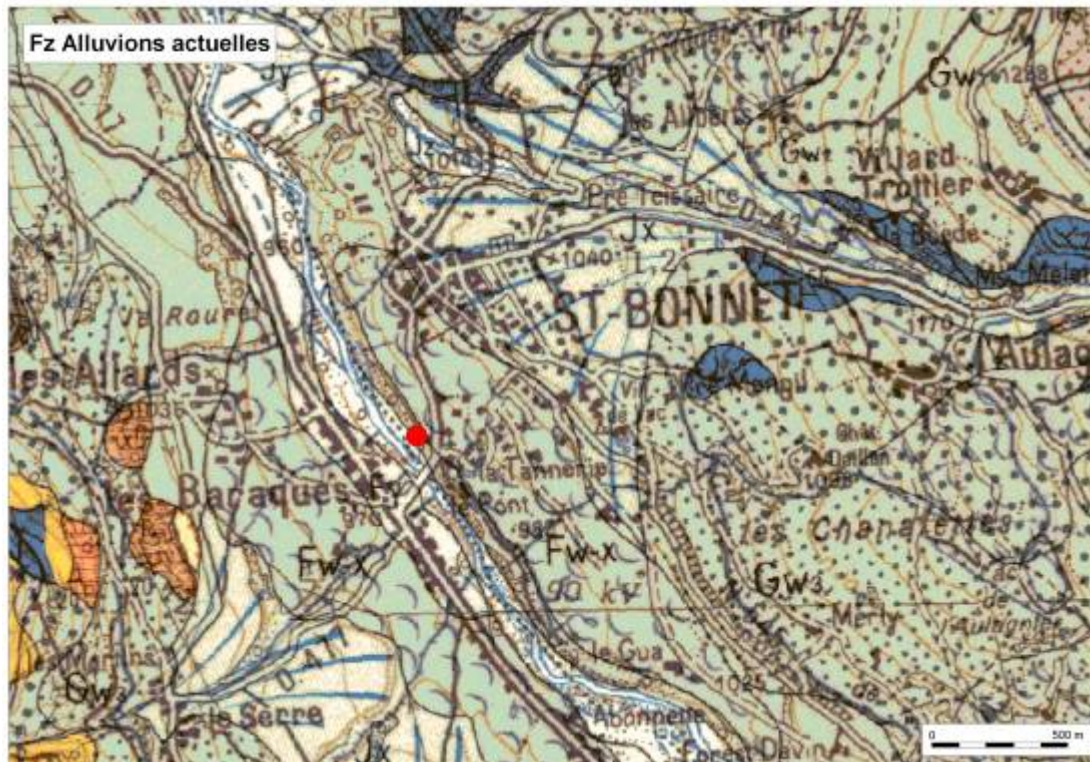


Figure A 2.1: Echantillons d'alluvions actuelles(Fz) dans différents contextes

Les alluvions actuelles sont déposées par l'activité actuelle des cours d'eau et occupent le niveau le plus bas dans leur thalweg, de sorte qu'elles sont soumises périodiquement à l'action des crues.

Tous les fonds de vallées sont remplis d'alluvions (cailloutis à galets arrondis et matrice sableuse) qui en régularisent le cours et passent, latéralement et vers l'amont, à des cailloutis torrentiels plus grossiers de cônes de déjection.

L'épaisseur des alluvions de fond de vallée n'est pas connue. Elle peut être grande dans le Drac (plusieurs dizaines de mètres) car ces alluvions constituent le sommet du remplissage d'un surcreusement glaciaire dont le fond est comblé par des alluvions cataglaciales würmiennes.

2 - Complexe fluvio-glaciaire würmien : FGy

Entre Charbillac (en rive droite du Drac) et Poligny - le Noyer (en rive gauche), on trouve un certain nombre de surfaces étagées (Fw2), emboîtées dans le matériel de la terrasse de Saint-Eusèbe ; elles semblent représenter des niveaux successifs d'érosion, puis de modeste colmatage cataglaciale, correspondant aux étapes de la décrue glaciaire qui a succédé au maximum du Würm II.



Figure A 2.2: Echantillon du complexe fluvio-glaciaire würmien (FGy).

3 – Alluvions würmiennes : Fy

La terrasse de Saint-Bonnet (Fw-x) atteint l'altitude de 1 020 m et ne possède qu'une pente très faible vers l'aval. Sous un épandage de cailloutis fluvio-glaciaires superficiels, elle montre un niveau de matériel fin, sableux à argileux, de type glaciolacustre puis un niveau inférieur caillouteux.

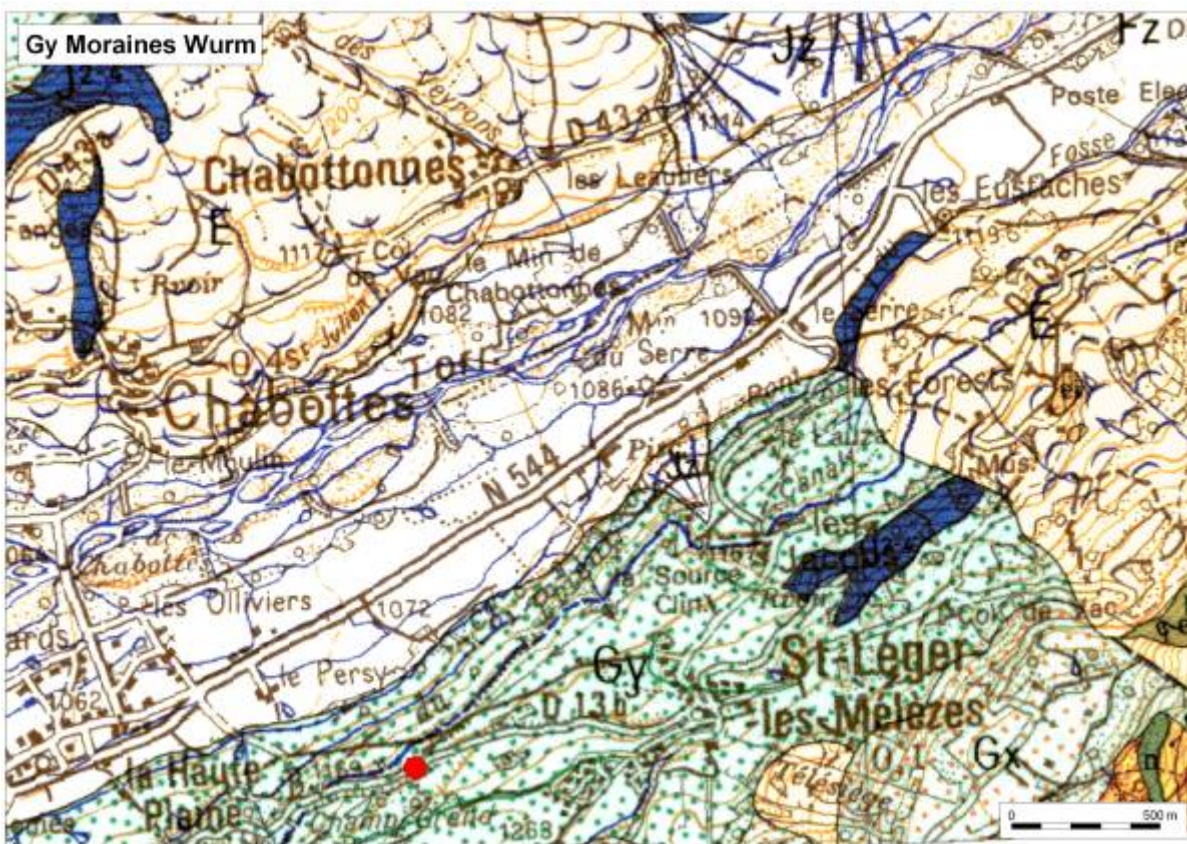


Figure A 2.3: Echantillon d'alluvions würmiennes (Fy).

4 – Moraines würmiennes : Gy

Les moraines attribuables à la glaciation du Würm (Gy) n'apparaissent nettement que dans la vallée du Drac, en aval du confluent des deux Dracs. Elles appartiennent à plusieurs glaciers distincts : Drac, Rouanne (Ancelle), Buissard et Brudour.

Les moraines du glacier du Drac dessinent des vallums latéraux relativement continus en rive gauche (Serre-Richard, Saint-Léger-les-Mélèzes), alors qu'en rive droite il ne subsiste que la crête latérale de Saint-Michel-de-Chaillof, le versant étant ailleurs entièrement remanié par des glissements. Le matériel morainique est polygénique, riche en blocs de grès, avec calcaires et un peu de cristallin. Elles prolongent vers l'amont les moraines attribuées au Würm II (rive droite) et au Würm III (rive gauche) sur la feuille Saint-Bonnet.



Dans le secteur de Chauffayer, en aval de la Guinguette, les moraines würmiennes (gw) ont été abandonnées par le glacier de la Séveraysse, qui descendait du Valgodemard ; elles y dessinent un amphithéâtre, ouvert vers le nord-est, qui s'appuyait, à son extrémité frontale, sur les basses pentes du Dévoluy, obturant ainsi la vallée du Drac.

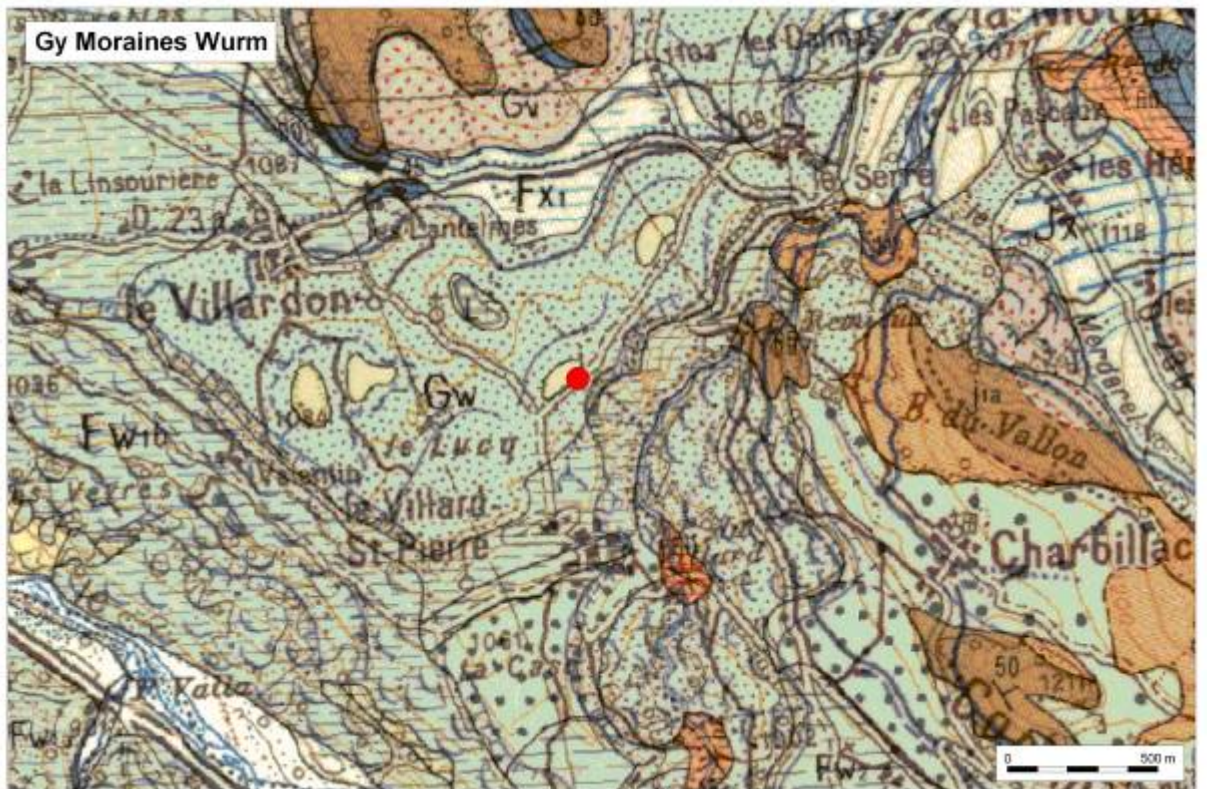
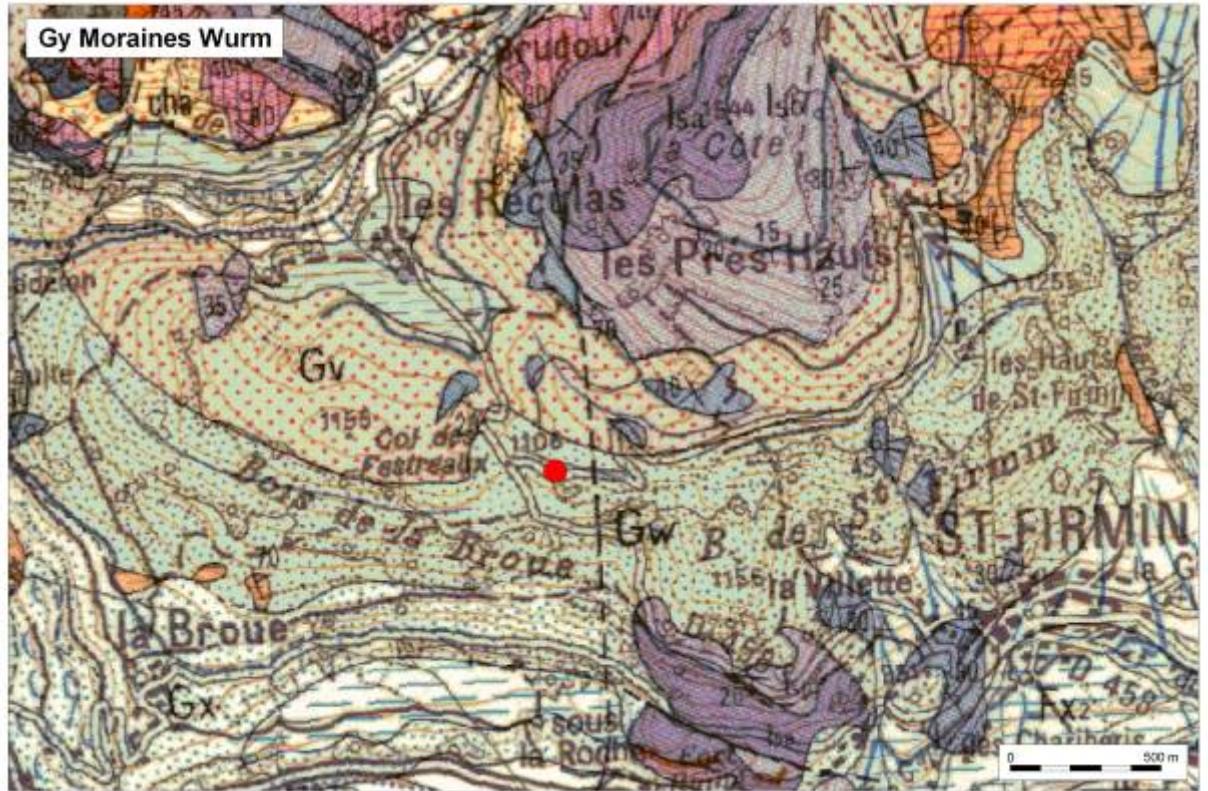


Figure A 2.4: Echantillons de moraines würmiennes (Gy) dans différents contextes

5 – Moraines rissiennes : Gx

Les moraines rissiennes (Gv) forment des placages discontinus (très disséqués par l'érosion) sur les plus hautes pentes, où ils supportent souvent une couche plus ou moins notable d'éboulis plus récents.

On les rencontre assez régulièrement au-dessus de 1 200 m d'altitude en rive droite du Champsaur, mais elles sont par contre plus souvent absentes en rive gauche.

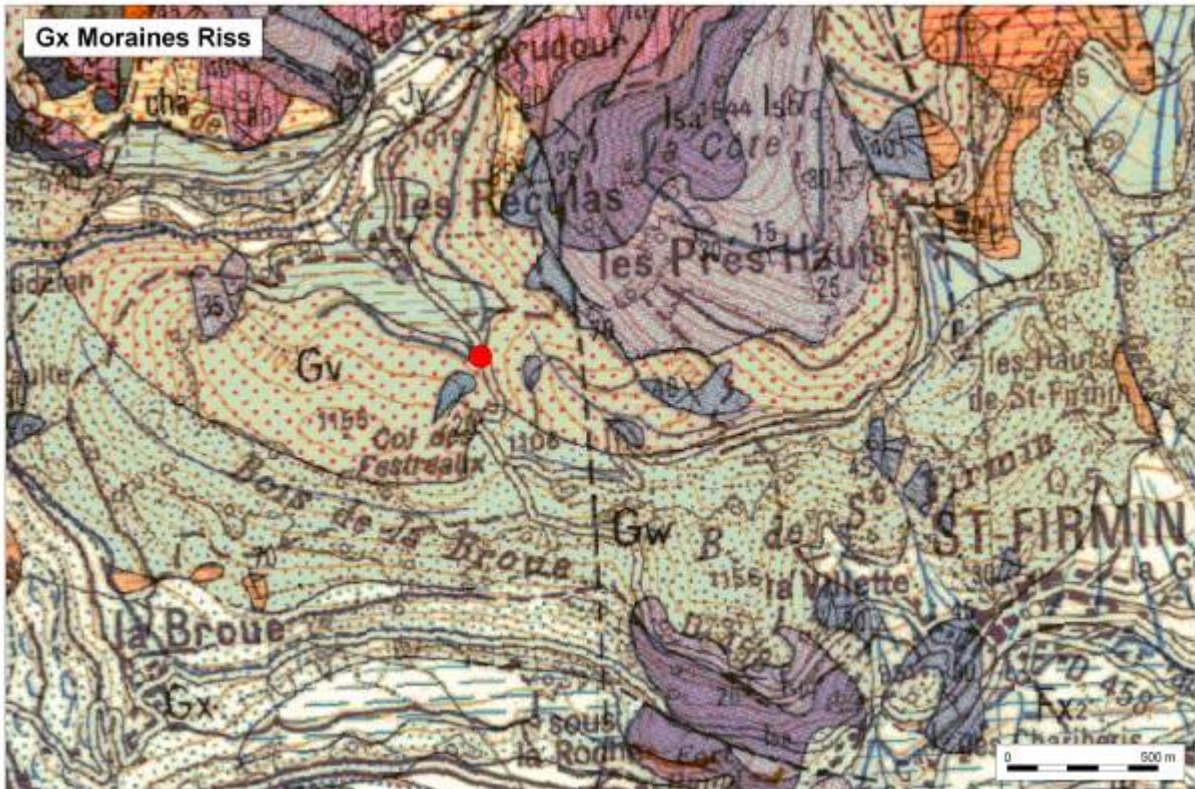


Figure A 2.5: Echantillon de moraines rissiennes (Gx)

7 – Flysch à dominante gréseuse : eGC et eGcM

Les « Grès du Champsaur » (eG) représentent une série rythmique, de 400 à 500 m d'épaisseur, de grès feldspathiques ou conglomératiques, en bancs décimétriques à métriques, granoclassés, avec figures de base de bancs, stratifications entrecroisées et chenaux, galets mous.

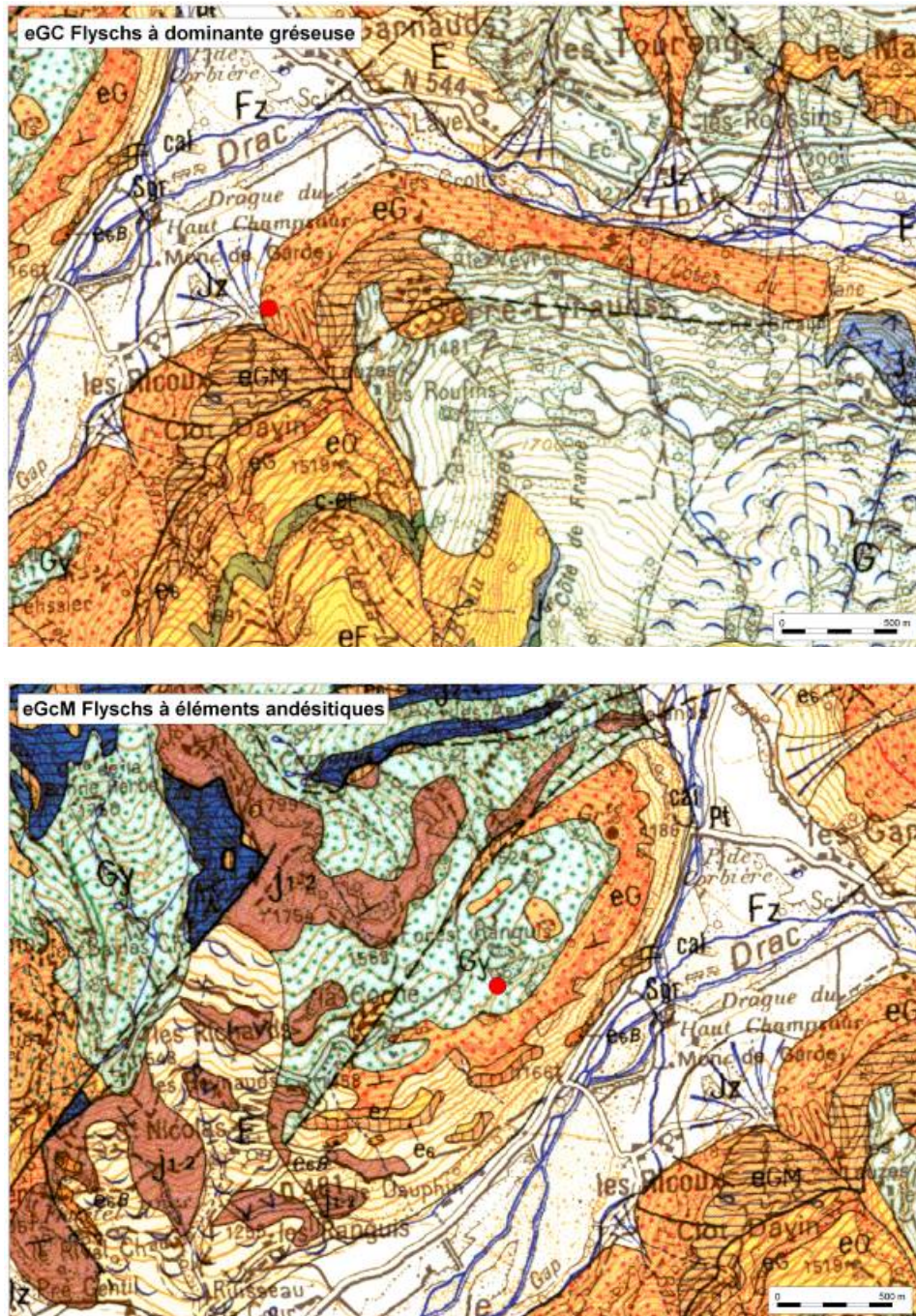


Figure A 2.7: Echantillons de flyschs gréseux (eGC) et à éléments andésitiques (eGcM).

8 – Schistes noirs : eGM

Il s'agit de niveaux de schistes noirs qui alternent avec les grès du Champsaur.

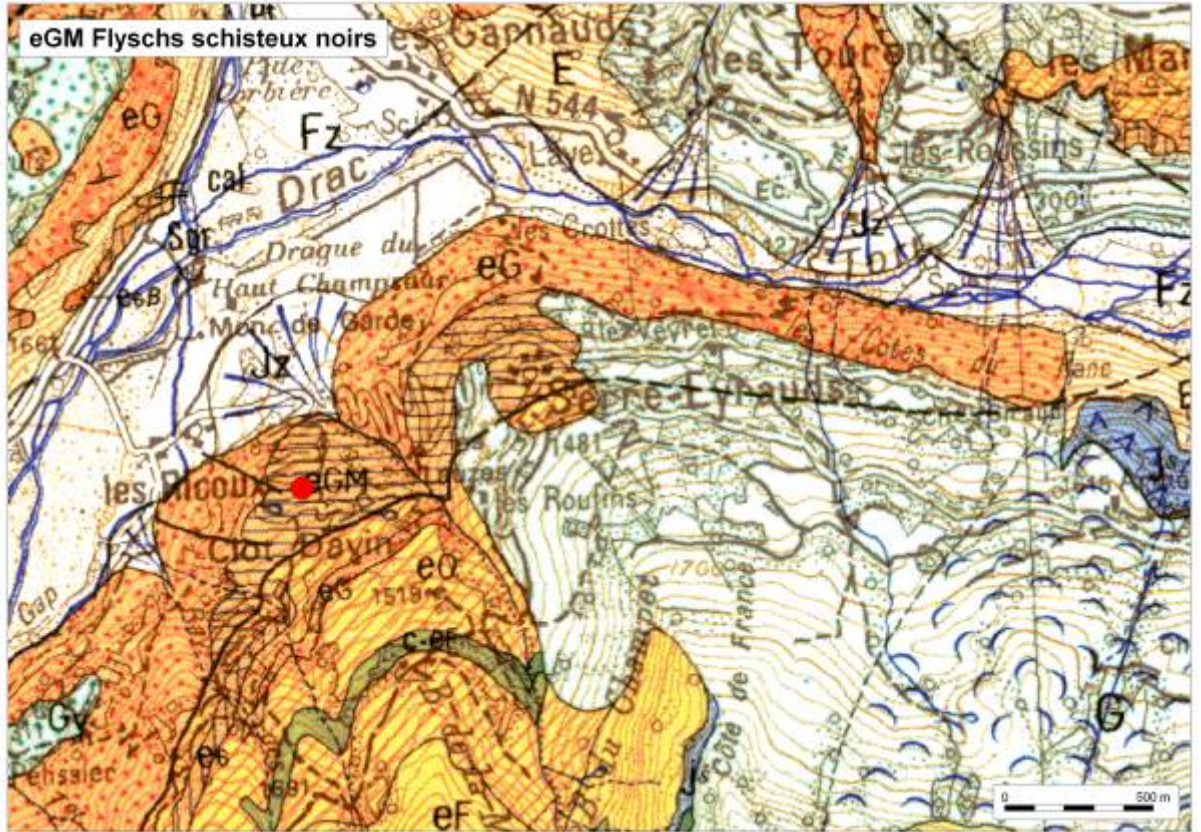


Figure A 2.8: Echantillon de flyschs schisteux noirs (eGM)

9 - Schistes à blocs : eF

La formation des schistes à blocs du 1/250 000, est subdivisée en trois formations à 1/50 000 :

- **Le flysch schisto-gréseux noir (eF)**, dit «Flysch noir», est constitué d'alternances de schistes argileux et de grès fins micacés, en bancs centimétriques à décimétriques ;
- **Les calcschistes planctoniques (eC.)**, (Crétacé supérieur à Paléocène), sont des calcaires en plaquettes et des calcschistes à grain fin, à patine grise ou jaunâtre avec quelques couches versicolores à leur base. Ce faciès apparaît en général en lames isolées dans les Schistes à blocs ou le Flysch noir sub-briançonnais ;
- Les Grès du Champsaur (eG) précédemment décrits.

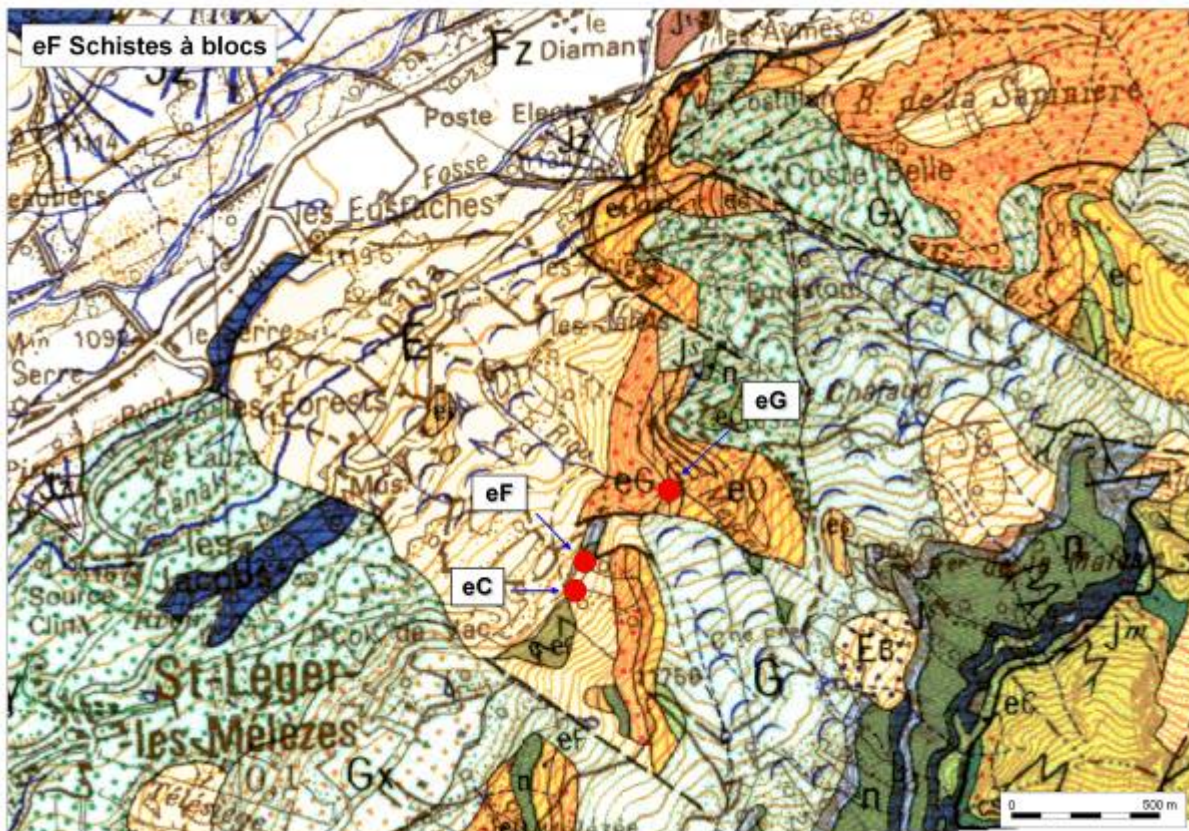
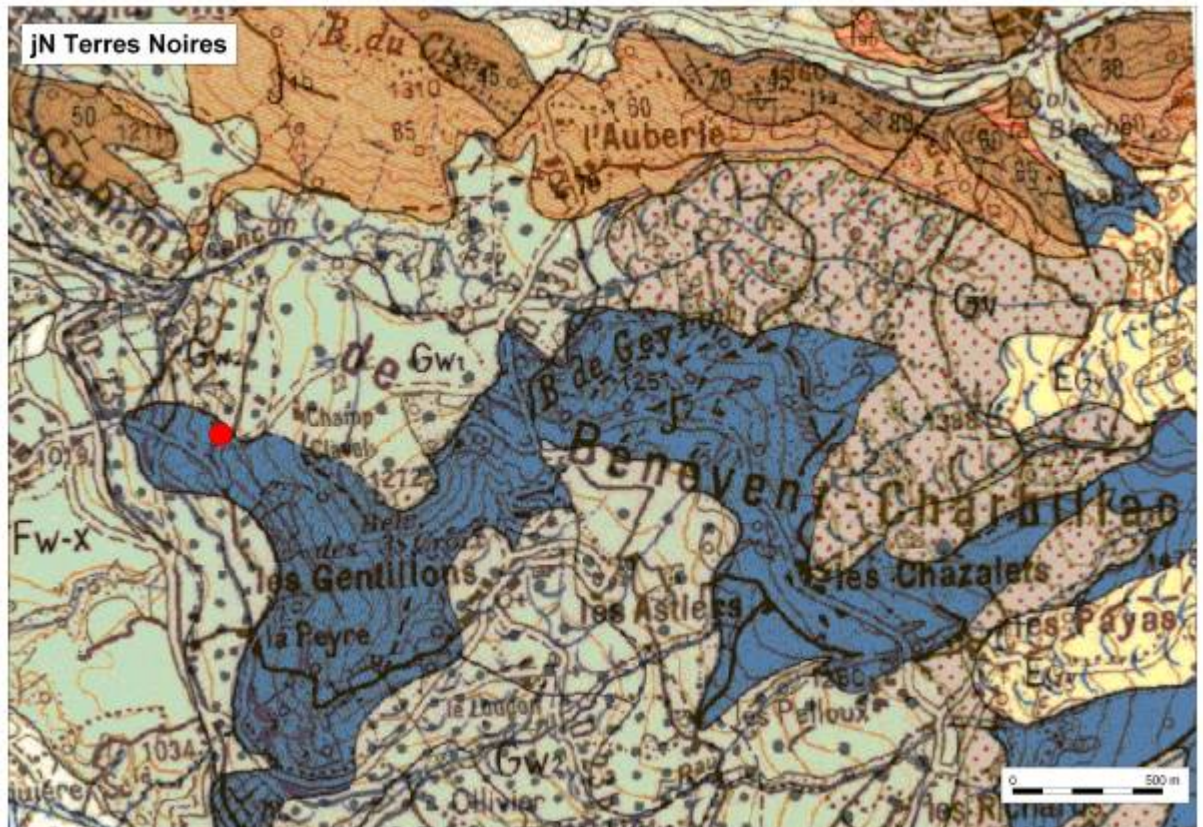


Figure A 2.9: Echantillon de schistes à blocs (eF)

10 – Les « Terres Noires » : jN

Les « Terres Noires » (j2-4) (Bathonien supérieur, Callovien, Oxfordien) est une puissante série marneuse de teinte noirâtre où s'élargit la vallée du Drac en aval de Pont-du-Fossé. L'Oxfordien est souligné par la présence de miches calcaires à patine rousse très caractéristiques.

Cette formation n'affleure en général que d'une façon discontinue, sous la couverture quaternaire, mais leur puissance probable peut être évaluée à environ 400 mètres.



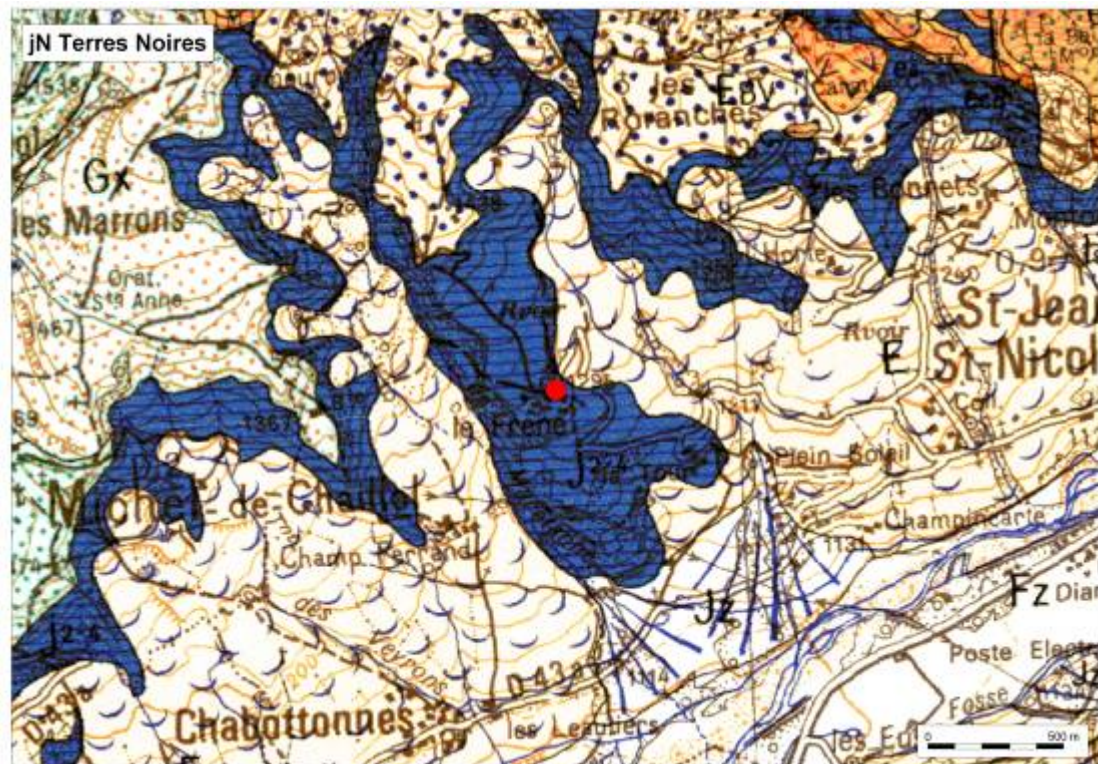


Figure A 2.10: Echantillons de Terres Noires (jN) dans différents contextes

11 – Marnes noires : I9c

Les marnes franches (I9b) de l'Aalénien supérieur : marnes franches atteignent une centaine de mètres d'épaisseur. Il s'agit de marnes franches d'un noir brunâtre, à patine sombre. On y observe souvent un fin litage et par places de petits nodules plus durs, aplatis, de quelques centimètres de diamètre.

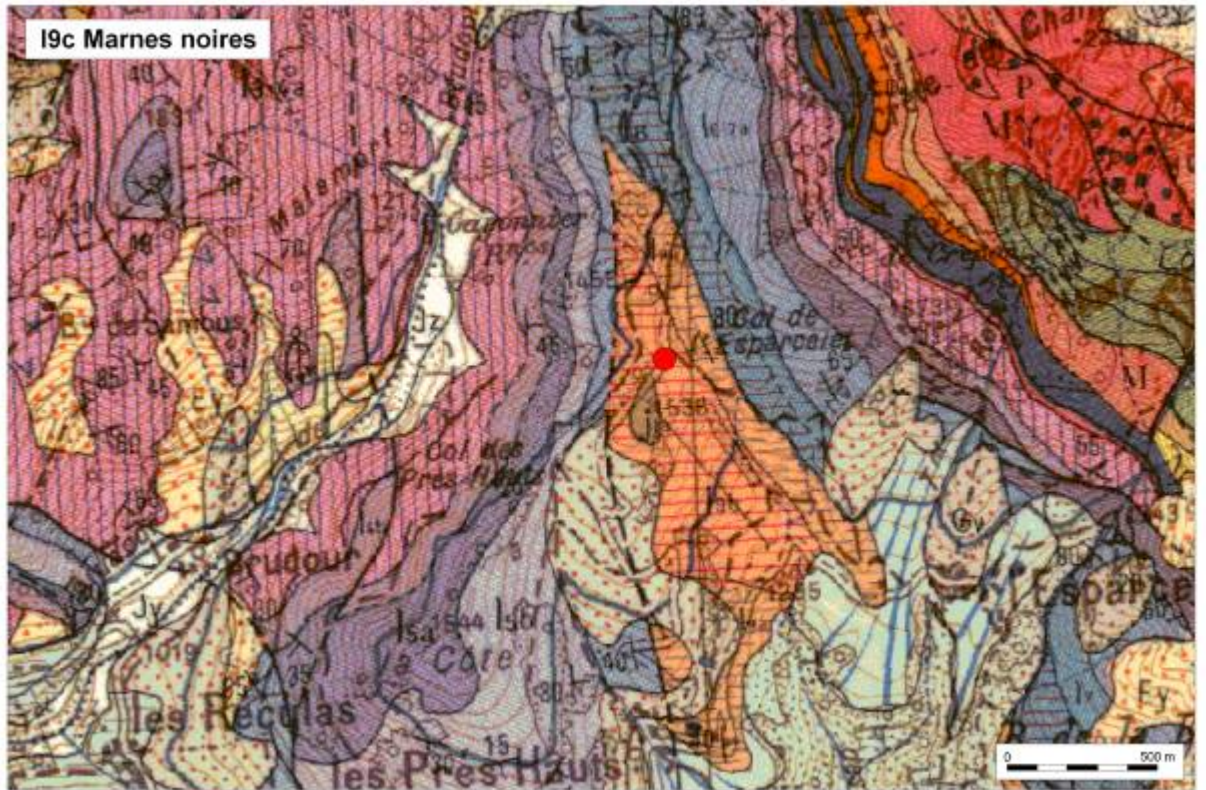


Figure A 2.11: Echantillon de Marnes Noires (I9c)

12 – Calcaires marneux : I9b

Les calcaires argileux gris (I9a) de l'Aalénien inférieur succèdent aux marnes du Toarcien supérieur qui passent, en quelques mètres, à des marno-calcaires feuilletés gris à patine gris clair où, après une dizaine de mètres, s'individualisent des bancs mal délimités, d'épaisseur moyenne métrique. Cette formation dont la puissance est communément proche de 200 m, forme souvent un ressaut ou une falaise bien marquée.

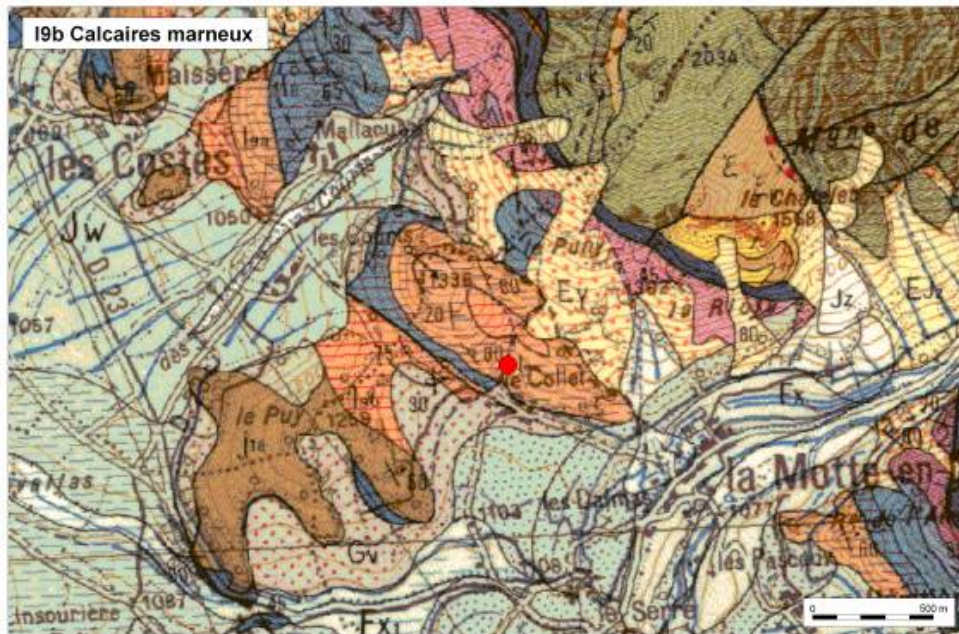


Figure A 2.12: Echantillons de calcaires marneux (I9b) dans différents contextes

13 – Calcaires : I

Les calcaires noté I du 1/250 000 sont constitués par les formations I9a et I9b de l'Alénien inférieur et supérieur précédemment décrits.



Figure A 2.13: Echantillon de calcaires (I)

14 - Marno-calcaires : Im

Les marno-calcaires note Im du 1/250 000 correspondent aux marno-calcaires micacés (I6-7a) du Domérien-Toarcien basal. Ce sont des calcaires argileux noirs, à pâte grenue flammée de gris sombre (bioturbations?) et à patine brun jaunâtre. Des joints plus marneux ou seulement plus feuilletés y déterminent un litage en bancs mal délimités, épais en moyenne de 0,5 mètre.

Leur puissance totale est comprise entre 60 et 150 mètres.

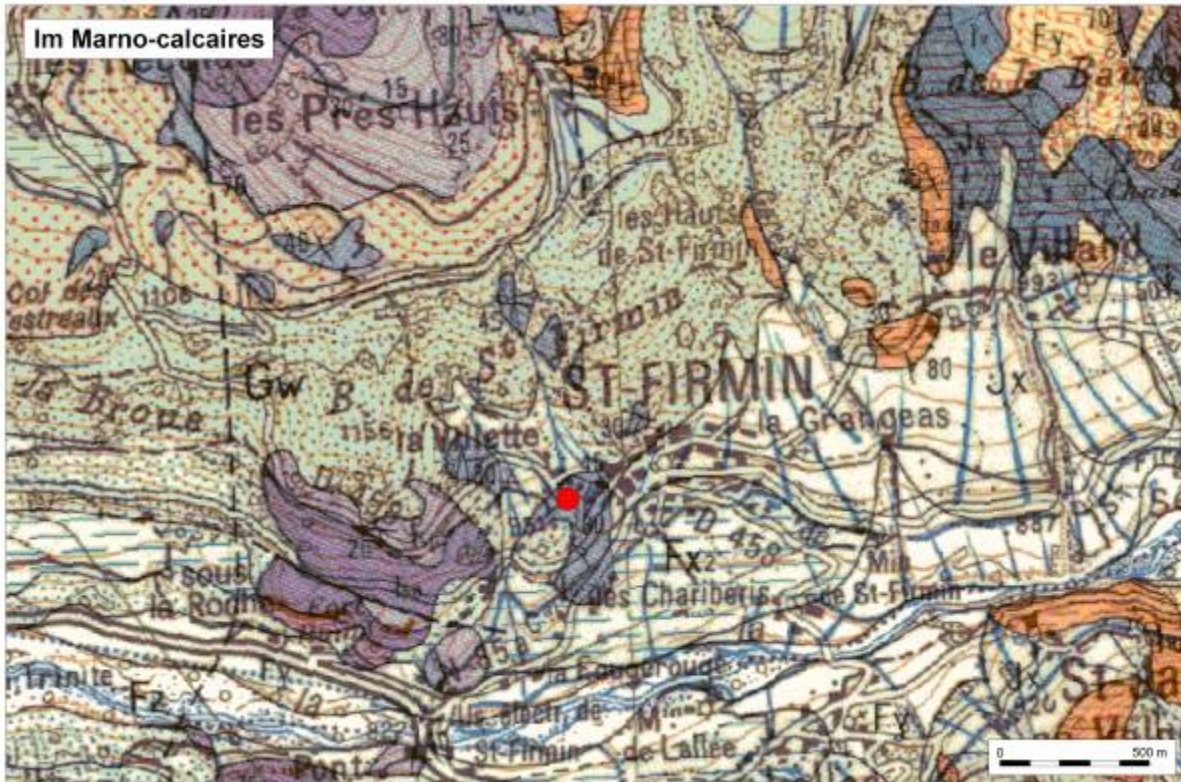


Figure A 2.14 : Echantillon de marno-calcaires (Im)

15 – Calcaires et calcaires à entroques : li

L'essentiel du Lias calcaire (I3-4a) est constitué par une succession monotone de bancs de calcaires argileux noirs à pâte fine, bien réglés, à patine grise, qui ont fourni des fossiles s'étageant du Sinémurien au Lotharingien supérieur

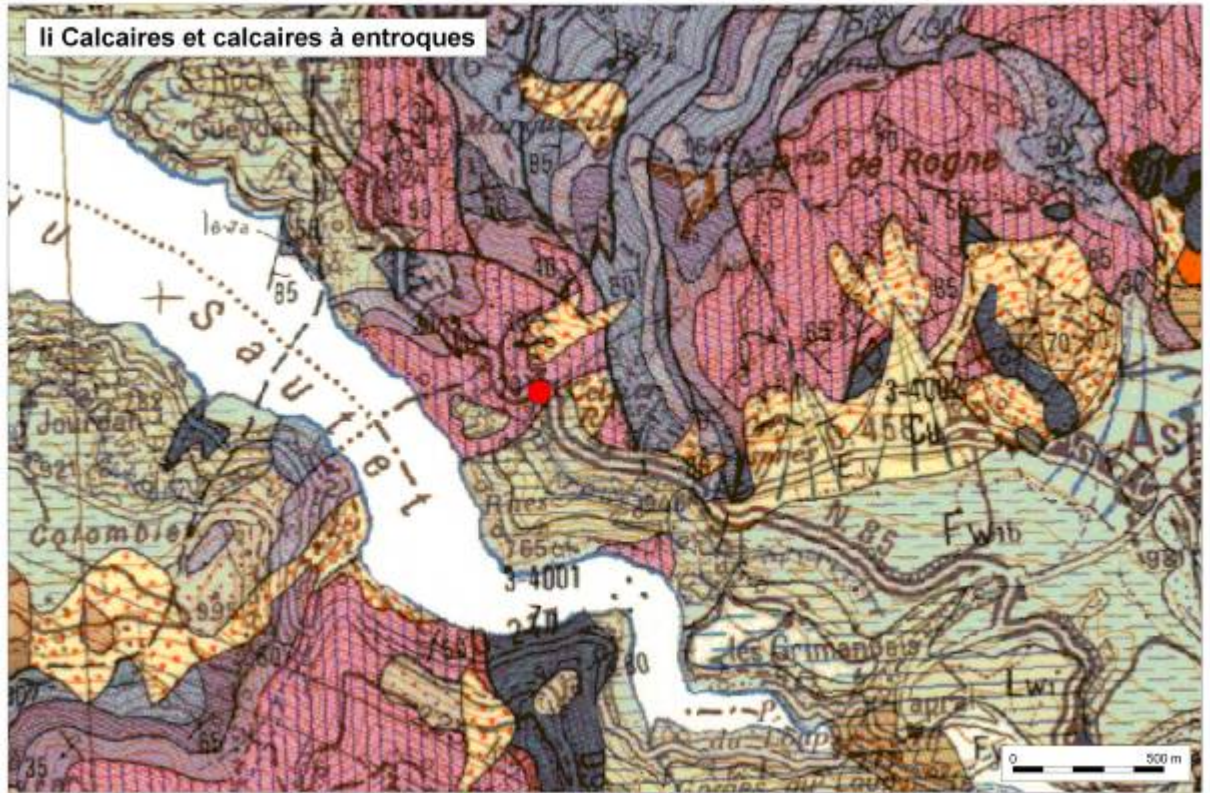


Figure A 2.15 : Echantillon de calcaires à entroques (li)

16 - Gneiss et leptynites : ae2

La formation notée ae2 du 1/250 000 correspond aux schistes cristallins non différenciés (ξ_s) du 1/50 000 dans lesquels les micaschistes prédominent. La plus grande partie des affleurements est constituée par des faciès de séricito-schistes et de chlorito-schistes plus ou moins quartzeux

Localement, des faciès d'aspect granitoïde peuvent y représenter des filons leuco-granitiques laminés, des niveaux de leptynites ou des orthogneiss.



Figure A 2.16 : Echantillon de gneiss et leptynites (ae2)

17 – Amphibolite : Ai DD

Les amphibolites (δc) les plus courantes sont à grain très fin et se débitent en plaques; leur surface offre une linéation constante. D'autres sont plus largement cristallines, à structure moins orientée, d'aspect plus compact, si bien que leur pendage est plus difficile à apprécier. Les passages entre ces différents types sont progressifs.

Dans la masse de ces amphibolites, mais surtout au sommet, apparaissent des leptynites de teinte claire, en bancs dépassant rarement 1 mètre d'épaisseur.

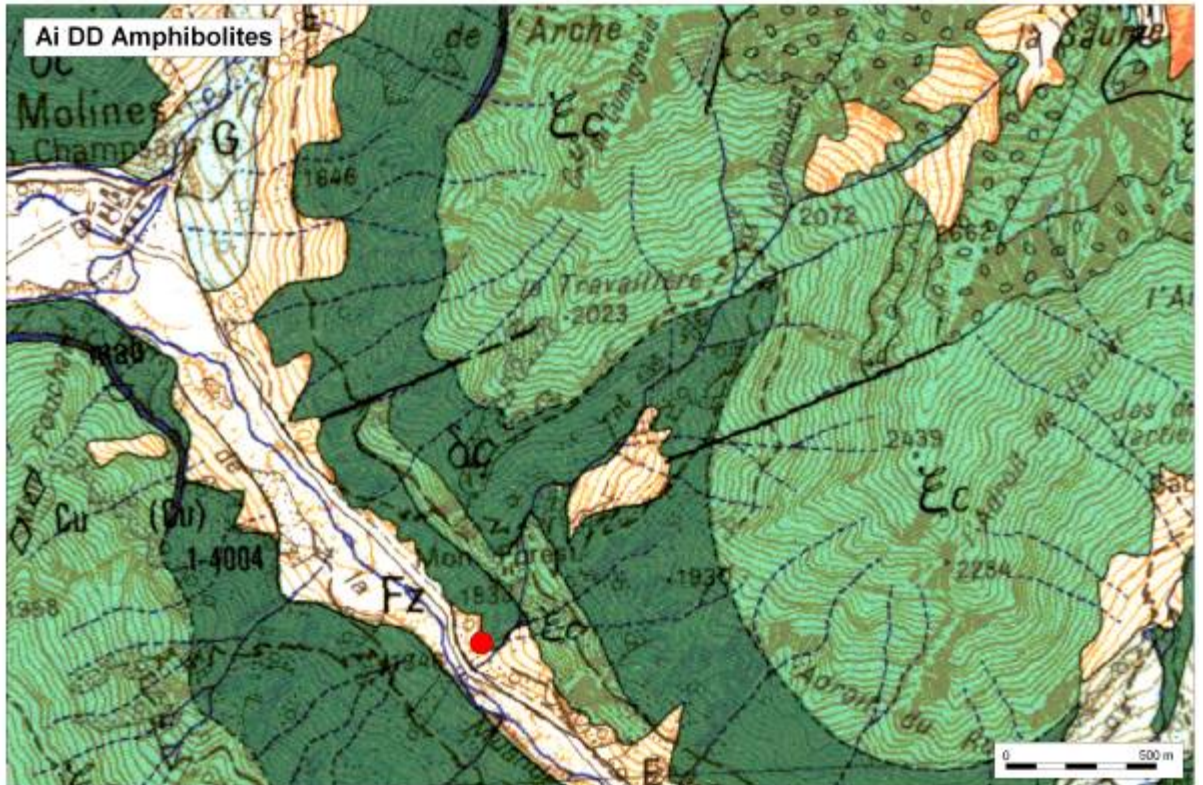


Figure A 2.17 : Echantillon d'amphibolites (AiDD)

Annexe 3

Activités radon mesurées sur le terrain – Partie 1 – données Estérel

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
19/05/08	41	6.70605	43.50690	116	120	120	cailloutis en surface puis argileux; blocs à éléments rhyolitiques
19/05/08	39	6.69655	43.49804	6900	100	100	sec en surface, galets rhyolite
19/05/08	37	6.67641	43.50047	4514	80	120	compact, sec en surface, éléments de rhyolite et brèche
19/05/08	38	6.68150	43.49741	1879	40	90	sec en surface et profondeur, puis roche compacte à 40cm
20/05/08	1	6.71650	43.36158	7292	80	90	socle gneissique
20/05/08	2	6.71348	43.36805	1311	60	75	socle gneissique
20/05/08	5	6.72041	43.37898	3670	90	75	socle gneissique
20/05/08	11	6.71826	43.39521	6083	90	80	recouvrement de sol plus important; fouilles peu éloignées
20/05/08	8	6.70909	43.39246	884	100	80	non remanié
20/05/08	7	6.70600	43.38441	672	100	75	non remanié
20/05/08	9	6.71214	43.38645	1888	100	75	non remanié, complanté d'arbusiers et chènes liège
20/05/08	4	6.70715	43.37867	2997	60	100	non remanié, gneiss affleurant
20/05/08	3	6.71043	43.37163	829	90	80	non remanié, gneiss affleurant altéré
20/05/08	13	6.72761	43.41585	301	60	60	sans doute remanié ± sableux
20/05/08	12	6.73020	43.40227	537	100	40	sable bord de mer/étang
20/05/08	10	6.70717	43.41187	248	60	80	sol bord route, socle affleurant à 20m à l'ouest
20/05/08	20	6.70775	43.42332	0	100	75	en bord de pépinière
20/05/08	19	6.68948	43.43507	354	100	75	herbe bord de route
20/05/08	18	6.68828	43.44356	23822	100	80	vigne bord de route
20/05/08	57	6.74588	43.47945	2105	100	110	bord champ muriers, remblais possible
20/05/08	58	6.74323	43.49085	646	70	110	au dessus petite falaise (socle + brèche à galets métam et volca)
20/05/08	59	6.75357	43.49487	4396	100	80	talus en contrebas petite falaise
20/05/08	54	6.75783	43.50363	9273	100	75	dans lit d'inondation Malpasset (galets 80% socle, 20% volca)
20/05/08	69	6.75674	43.47188	11808	100	90	champ bord route
20/05/08	79	6.76833	43.47153	22460	80	80	proche carrière
20/05/08	80	6.77154	43.47579	142	100	150	sol sec et développé, bord de route
20/05/08	140	6.77665	43.48109	4526	100	115	peu de sol, sec, bord de route, roche volca vésiculée
20/05/08	141	6.77635	43.48528	7242	80	170	massif rocheux volca affleurant
20/05/08	143	6.77811	43.49233	14625	60	130	sur socle avec passées quartz (type gneiss à 2 micas)
20/05/08	142	6.78179	43.49900	4484	50	140	au col, sans doute remblayé
20/05/08	144	6.79407	43.50197	3328	100	110	alternance verte/rouge (argilite?)
20/05/08	152	6.80081	43.49740	833	40	115	zone altérée bréchique
20/05/08	149	6.80074	43.50177	3217	80	130	passée + tendre au sein roche massive bréchique
20/05/08	150	6.80742	43.50482	7822	80	150	passées de sol + roche affleurante
20/05/08	151	6.81233	43.51289	1465	60	90	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
21/05/08	163	6.81069	43.52571	2487	40	125	gneiss avec très peu de sol
21/05/08	164	6.81132	43.52035	3708	60	75	terrain non construit en bord de route
21/05/08	165	6.82828	43.51307	516	60	150	petit talus sur brèche massive, peu de sol
21/05/08	174	6.83681	43.51761	143	50	110	peu de sol, talus sur ancienne coulée rhyolite type debris flow
21/05/08	236	6.84040	43.51882	302	50	70	peu de sol, talus sur rhyolite altérée
21/05/08	175	6.84783	43.51824	104483	100	170	talus en bord de route
21/05/08	176	6.85611	43.51825	78610	80	160	talus en bord de route, sol exprimé sur rhyolite massive
21/05/08	277	6.86262	43.52161	11187	40	120	champ non planté en bord de route
21/05/08	179	6.87570	43.52291	7443	80	75	bordure de champ sous chênes liège
21/05/08	180	6.87788	43.52235	1331	100	100	talus abrupt en bord de route, sur débris gneissiques
21/05/08	181	6.88643	43.52208	512	50	100	passée bréchique à éléments de socle, rhyolite, scories
21/05/08	182	6.89315	43.52221	696	20	160	dans roche, au pied rhyolite massive
21/05/08	192	6.92786	43.47644	223	40	100	sur rhyolite massive
21/05/08	191	6.92380	43.47592	5717	80	150	bas rhyolite massive
21/05/08	190	6.92392	43.47209	15073	70	110	
21/05/08	189	6.92132	43.46155	3164	30	130	sur rhyolite massive
21/05/08	109	6.82265	43.42680	251	50	110	bord chemin, sur remblais rhyolite verte et rouge
21/05/08	1090	6.82284	43.42488	278	40	150	dans estérélite verte en intrusion, pas de sol
21/05/08	108	6.82318	43.42104	384	50	100	sol sans doute remblayé, planté de pins
21/05/08	107	6.82820	43.42496	571	40	140	au pied éboulis rhyolite
21/05/08	106	6.83356	43.42194	1104	40	125	dans rhyolite massive
21/05/08	1060	6.84083	43.42327	384	50	80	sous chênes verts
21/05/08	105	6.84084	43.42704	1022	100	75	sous chênes recouvrant sans doute rhyolite rouge
21/05/08	104	6.83543	43.43340	117	100	50	sol à débris de rhyolite verte et rouge
21/05/08	233	6.84353	43.42273	303	30	60	sol en place, rhyolite rouge en sub-surface
21/05/08	215	6.86624	43.45251	6994	100	170	sol exprimé sous chênes et pins
21/05/08	216	6.87727	43.45099	330	30	145	dans rhyolite massive
21/05/08	217	6.89178	43.44599	1126	80	130	sol exprimé
21/05/08	218	6.89909	43.44872	4176	100	140	éboulis remblais, percé côté précipice
21/05/08	220	6.90765	43.44901	6448	80	120	éboulis ± sol en voie de formation
21/05/08	219	6.91535	43.45053	3373	60	120	sol assez bien formé avec cailloutis

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
22/05/08	138	6.77964	43.46160	1179	50	120	très peu de sol, alternance passées rhyolite verte et rouge
22/05/08	137	6.78134	43.46635	329	40	130	sol peu développé sur rhyolite massive
22/05/08	136	6.79293	43.47255	9316	50	120	très peu de sol sur rhyolite massive
22/05/08	155	6.79290	43.48068	1727	40	160	très peu de sol sur rhyolite massive
22/05/08	135	6.79484	43.46616	459	30	125	rhyolite altérée en surface puis massive
22/05/08	92	6.78293	43.45709	353	100	55	sol de pinède
22/05/08	122	6.79572	43.45672	29323	100		bord de route sans doute remblayé
22/05/08	123	6.81087	43.45308	6985	100	65	bord de route sans doute remblayé, chênes vert et liège
22/05/08	124	6.81602	43.44828	1222	60	135	bord de route, peu de sol sur rhyolite
22/05/08	125	6.82430	43.45119	669	30	110	bord de route remblayé probable
22/05/08	128	6.84013	43.44856	2647	40	45	bord de route sous chênes liège
22/05/08	212	6.8506	43.44269	9923	80	135	sol exprimé, sous petite falaise de rhyolite et chênes vert
22/05/08	214	6.85148	43.44712	7080	100	130	sol avec blocs de rhyolite
22/05/08	213	6.85526	43.44937	15797	100	140	sol sous petite forêt de chênes
22/05/08	202	6.86183	43.45987	565	30	130	sol peu développé, à débit schisteux en plaquettes
22/05/08	203	6.85634	43.47057	723	60	200	très peu de sol, rhyolite massive
22/05/08	208	6.85031	43.46783	14362	70	80	sol sous forêt de chênes liège, avec blocs de rhyolite
22/05/08	210	6.84039	43.46693	1014	40	55	peu de sol, blocs de rhyolite
22/05/08	209	6.84172	43.46012	3682	60	135	sol peu épais, conglomérat à éléments de rhyolite non consolidé
22/05/08	127	6.83456	43.45705	8540	100	150	sol peu évolué, brèche à éléments fins
22/05/08	126	6.83257	43.45339	2041	60	100	sol caillouteux peu développé, garrigue dégagée à chênes lièges
22/05/08	131	6.81998	43.46156	485	80	50	rhyolite avec termes bulleux
22/05/08	132	6.81965	43.46798	2879	50	100	rhyolite massive fracturée
22/05/08	134	6.80247	43.47028	326	50	110	grès en bancs, peu de sol, faciès rouges et verts
22/05/08	133	6.81155	43.46899	616	100	140	10 à 20cm de sol sur rhyolite rouge et verte
22/05/08	139	6.81957	43.47360	8326	100	190	dans éboulis de marno-calcaire
22/05/08	156	6.81788	43.47790	1255	100	120	sol à éléments de rhyolite, sur roche sédimentaire feuilletée micacée
22/05/08	157	6.82305	43.48340	699	40	160	peu de sol, rhyolite massive
22/05/08	158	6.82855	43.48222	2760	100	135	peu de sol, rhyolite fragmentée
22/05/08	159	6.83914	43.48673	750	100	100	sol remblayé
22/05/08	204	6.84949	43.48832	2254	60	150	pierrier à rhyolite
22/05/08	205	6.85622	43.48366	2568	30	180	rhyolite massive
22/05/08	206	6.86227	43.47900	1249	40	180	peu de sol, rhyolite fragmentée
22/05/08	207	6.86090	43.47468	353	20	190	rhyolite massive

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
26/05/08	21	6.68363	43.45243	1943	100	75	dans champ
26/05/08	17	6.67928	43.44837	90	100	70	dans vigne
26/05/08	22	6.67041	43.45368	1491	100	80	champ en friche
26/05/08	23	6.65807	43.45414	1067	100	60	bord champ de tomates
26/05/08	24	6.66465	43.45966	882	100	50	remblai SNCF
26/05/08	26	6.67716	43.46842	1188	80	75	sol de pinède à fragments de rhyolite
26/05/08	27	6.68115	43.46329	9414	100	80	remblai bord autoroute
26/05/08	28	6.69184	43.46644	1423	100	80	prairie bord route
26/05/08	29	6.69006	43.47381	1182	60	70	champ
26/05/08	40	6.69181	43.48511	7383	100	120	prairie
26/05/08	43	6.70825	43.49416	1048	80	80	remblai bord route, proche petite falaise rhyolite
26/05/08	46	6.71492	43.48672	1446	80	80	sous minède, remblai probable
26/05/08	63	6.73199	43.47798	356	40	80	remblai de parking
26/05/08	64	6.73241	43.47414	409	80	100	herbe ± remblai
26/05/08	53	6.75427	43.50754	8022	40	110	rhyolite altérée
26/05/08	52	6.75607	43.50993	543	40	140	rhyolite non altérée massive
26/05/08	51	6.75077	43.51136	3704	40	100	rhyolite altérée, filons de quartz
26/05/08	50	6.74421	43.50794	489	60	90	rhyolite rouge à filons de quartz et passées argileuses
26/05/08	49	6.74032	43.50748	409	60	90	rhyolite altérée, fragmentée + herbe
26/05/08	235	6.73282	43.51357	382	40	150	rhyolite altérée
26/05/08	48	6.73012	43.51324	90	40	105	strates sub-horizontales
26/05/08	234	6.72616	43.51277	196	40	50	rhyolite
26/05/08	47	6.72483	43.51477	2415	40	135	blocaille
26/05/08	42	6.71388	43.50604	459	50	50	garrigue
26/05/08	60	6.71766	43.47296	116	40	120	alternance verte/rouge (argilite?)
26/05/08	62	6.72361	43.47449	432	50	110	bord de champ
26/05/08	61	6.72155	43.46825	4615	60	130	roche massive
26/05/08	70	6.72819	43.45957	1195	40	70	pinède
26/05/08	34	6.72087	43.45767	221	50	70	remblai
26/05/08	32	6.70927	43.45529	432	80	70	verger
26/05/08	33	6.71911	43.44971	357	100	50	fossé bord de route
26/05/08	36	6.72629	43.44540	2379	100	60	terrain vague sur ancienne pinède
26/05/08	35	6.72660	43.45404	10410	100	75	terre-plein
26/05/08	65	6.73116	43.46640	3859	40	60	remblai
26/05/08	66	6.73847	43.47163	594	100	60	remblai en zone industrielle

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
27/05/08	31	6.69950	43.45561	11	40	100	pinède
27/05/08	30	6.69942	43.44472	6123	70	65	remblai en zone industrielle
27/05/08	16	6.70328	43.44268	3682	60	60	terrain vague
27/05/08	15	6.72420	43.44185	8483	100	80	talus
27/05/08	14	6.73234	43.43840	5122	100	110	talus
27/05/08	81	6.74214	43.44168	2352	100	70	pinède
27/05/08	72	6.74252	43.45222	775	50	80	champ en friche
27/05/08	73	6.74401	43.45953	63	50	75	roche altérée affleurante
27/05/08	74	6.74698	43.46417	616	100	100	lit cours d'eau
27/05/08	68	6.74448	43.46825	5142	100	110	champ en friche
27/05/08	75	6.76010	43.46379	2168	100	80	chênes liège
27/05/08	76	6.75672	43.45674	6789	100	80	oliviers
27/05/08	82	6.75097	43.44509	13612	100	90	pinède
27/05/08	84	6.75142	43.43810	3962	100	75	remblai
27/05/08	83	6.75815	43.44170	1225	100	110	friche
27/05/08	89	6.76697	43.44107	987	100	80	pinède
27/05/08	90	6.77045	43.44682	0	60	110	pinède
27/05/08	77	6.76002	43.44831	0	50	80	pinède
27/05/08	91	6.77917	43.44951	0	60	50	remblai
27/05/08	100	6.79966	43.42986	20932	60	60	zone aménagée paysagée
27/05/08	97	6.78033	43.42836	4932	50	65	remblai, futur lotissement en construction
27/05/08	116	6.80086	43.42698	354	60	60	square aménagé
27/05/08	110	6.81183	43.42503	11	100	80	pinède et arbousiers
27/05/08	117	6.80990	43.42867	3150	100	100	pinède
27/05/08	111	6.81289	43.42172	511	100	75	pinède et remblai
27/05/08	118	6.79531	43.41984	1300	100	100	pelouse
27/05/08	86	6.79049	43.41432	2941	100	70	jardin
27/05/08	114	6.78672	43.41282	5020	100	60	remblai SNCF
27/05/08	85	6.78123	43.41613	1118	100	80	pinède
27/05/08	103	6.81972	43.43346	458	100	35	genêts en bord de route
27/05/08	101	6.81214	43.43812	411	100	80	prairie et chênes
27/05/08	102	6.81317	43.44171	4805	100	105	pins et chênes
27/05/08	119	6.80344	43.44494	2776	50	120	pinède
27/05/08	120	6.79799	43.44329	833	100	75	pinède
27/05/08	94	6.78382	43.43703	16187	50	90	lotissement en construction

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
27/05/08	98	6.80121	43.43484	673	50	80	remblai dans rond-point
27/05/08	99	6.80973	43.43468	2685	50	80	remblai dans rond-point
28/05/08	148	6.76950	43.50737	513	40	105	rhyolite altérée
28/05/08	147	6.78052	43.51021	302	20	115	rhyolite massive
28/05/08	146	6.78534	43.5088	22183	100	115	rhyolite altérée
28/05/08	145	6.79050	43.50414	1305	100	90	rhyolite
28/05/08	153	6.79600	43.49000	880	60	180	rhyolite
28/05/08	162	6.81438	43.49712	7964	100	160	rhyolite altérée
28/05/08	166	6.82479	43.50595	17456	70	180	rhyolite altérée
28/05/08	167	6.83747	43.50776	1511	40	150	roche altérée affleurante
28/05/08	168	6.84573	43.50581	12403	100	150	rhyolite altérée, pinède
28/05/08	169	6.85294	43.50311	644	80	150	rhyolite altérée
28/05/08	170	6.86405	43.50459	1383	50	75	rhyolite
28/05/08	171	6.86358	43.49822	354	40	50	rhyolite altérée
28/05/08	172	6.87073	43.49429	2395	60	140	rhyolite altérée
28/05/08	173	6.86781	43.48752	116	50	105	grès?
28/05/08	200	6.87985	43.47101	7438	40	190	rhyolite altérée
28/05/08	199	6.88456	43.47592	28632	60	150	roche ocre altérée
28/05/08	198	6.88346	43.48083	6724	50	170	roche ocre altérée
28/05/08	197	6.87902	43.48617	1840	60	100	roche altérée, pins
28/05/08	183	6.89224	43.49920	912	40	130	roche ocre altérée
28/05/08	184	6.90675	43.49389	12133	80	140	conglomérat
28/05/08	185	6.91259	43.48348	5591	50	150	éboulis
28/05/08	186	6.91423	43.47645	1463	50	150	blocs
28/05/08	187	6.90898	43.46955	13606	100	120	roche altérée
28/05/08	188	6.91129	43.46352	749	50	130	roche altérée
28/05/08	194	6.9003	43.45965	21706	50	150	éboulis
28/05/08	195	6.88774	43.4561	1642	100	160	rhyolite
28/05/08	196	6.88228	43.45436	300	60	110	roche altérée
28/05/08	201	6.87589	43.45875	247	50	150	rhyolite altérée
28/05/08	221	6.90283	43.44392	6896	100	125	remblai SNCF
28/05/08	129	6.84429	43.43859	3616	100	125	lisière forêt/champ
28/05/08	211	6.85011	43.43946	673	100	75	champ en friche

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	Geiger (cps)	nature du sol / substratum
29/05/08	231	6.85465	43.43452	516	80	120	remblais
29/05/08	230	6.85856	43.43612	117	40	80	petite carrière
29/05/08	229	6.86112	43.43885	1310	40	75	terrain en friche
29/05/08	228	6.86676	43.44008	1123	80	95	jardin
29/05/08	227	6.86805	43.43727	1572	30	105	roche
29/05/08	222	6.89534	43.43827	221	100	100	roche ocre
29/05/08	223	6.88964	43.4315	484	50	130	sur roche
29/05/08	226	6.87535	43.43188	2563	70	80	remblai
29/05/08	232	6.85523	43.42837	1888	80	105	prairie aménagée dans village vacances

Annexe 4

Activités radon mesurées sur le terrain – Partie 2 – données Champsaur

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
02/06/08	44	6.18778	44.64306	7401	100	champ humide
02/06/08	43	6.17000	44.64333	22447	50	champ humide
02/06/08	45	6.15750	44.64222	30144	100	
02/06/08	46	6.14778	44.64528	250	50	champ
02/06/08	47	6.14250	44.63861	4660	50	
02/06/08	48	6.13306	44.64444	4127	100	
02/06/08	49	6.11611	44.64694	382	50	
02/06/08	50	6.09750	44.64833	60016	100	boueux, argileux
02/06/08	108	6.08444	44.66000	8992	100	
02/06/08	107	6.07583	44.67111	24853	100	humide
02/06/08	105	6.06611	44.68722	3869	100	
02/06/08	106	6.05667	44.69917	1516	100	
02/06/08	116	6.03778	44.70861	13103	50	
03/06/08	1	6.31167	44.68194	5573	100	
03/06/08	2	6.30500	44.68222	13723	100	proche ruisseau
03/06/08	3	6.29250	44.68306	17630	100	
03/06/08	4	6.28472	44.68389	23991	100	
03/06/08	5	6.27889	44.68583	42400	100	
03/06/08	6	6.27361	44.68611	8872	100	plaine Drac
03/06/08	7	6.26889	44.68861	9538	100	plaine Drac
03/06/08	8	6.26250	44.68694	1930	100	éboulis
03/06/08	15	6.25528	44.67889	6625	100	
03/06/08	16	6.24278	44.67222	31929	100	
03/06/08	9bis	6.25583	44.68833	7836	100	
03/06/08	9	6.25056	44.68417	15043	100	
03/06/08	10	6.24444	44.68167	6567	100	
03/06/08	11	6.24222	44.68028	26662	100	
03/06/08	12	6.23722	44.67611	17979	100	
03/06/08	13	6.24417	44.67556	9278	100	
03/06/08	14	6.23583	44.67167	169	100	bord talus, glaise
03/06/08	17	6.23278	44.66833	4950	50	galets rivière
03/06/08	21	6.19694	44.67167	2783	100	
03/06/08	20	6.20500	44.67139	696	100	saturé en eau, marécageux
03/06/08	19	6.22167	44.67000	221	100	
03/06/08	27	6.22528	44.67972	5420	100	déplacé

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
03/06/08	26	6.21972	44.67944	674	100	
03/06/08	25	6.22278	44.67778	5150	100	argileux
03/06/08	24	6.21667	44.67611	196	100	bois, humus
03/06/08	18	6.22667	44.67167	3156	100	pluie
03/06/08	22	6.20222	44.66417	5157	100	argile, pluie
03/06/08	23	6.19444	44.66167	274	100	pluie, caillouteux
03/06/08	37	6.17694	44.65278	8743	50	
03/06/08	36	6.18583	44.64806	38493	100	
03/06/08	32	6.20889	44.65972	20151	100	
03/06/08	28	6.22250	44.66056	4914	100	
03/06/08	29	6.21639	44.65667	5943	100	
03/06/08	30	6.21222	44.64917	43038	100	
03/06/08	31	6.20778	44.64972	7854	100	
03/06/08	34	6.20111	44.65111	19647	100	
03/06/08	33	6.20611	44.65500	934	100	
03/06/08	35	6.19917	44.64583	28227	100	
04/06/08	38	6.17167	44.65694	61412	100	champ, beaucoup d'eau
04/06/08	40	6.17583	44.66361	25442	100	
04/06/08	69	6.17139	44.67028	30360	100	
04/06/08	70	6.17194	44.67667	36016	100	
04/06/08	67	6.16611	44.68250	4232	100	
04/06/08	66	6.16306	44.68778	12720	100	
04/06/08	65	6.17056	44.68861	9081	100	
04/06/08	64	6.17000	44.69444	17067	100	
04/06/08	71	6.15639	44.68694	2682	100	
04/06/08	72	6.15000	44.68833	19724	100	
04/06/08	73	6.14222	44.68833	433	100	
04/06/08	74	6.13361	44.68806	8084	100	
04/06/08	75	6.12000	44.68528	11975	100	humide
04/06/08	76	6.11222	44.68194	26736	100	
04/06/08	77	6.10333	44.68222	5669	100	
04/06/08	78	6.10111	44.68861	9487	100	
04/06/08	39	6.16111	44.65972	37	100	champ
04/06/08	42	6.15361	44.65833	143	100	argileux
04/06/08	56	6.14583	44.65806	1145	100	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
04/06/08	57	6.13028	44.65972	2277	100	
04/06/08	58	6.13778	44.66500	22341	100	
04/06/08	62	6.10472	44.67333	13533	100	
04/06/08	61	6.11306	44.66889	13297	100	fontaine sulfurée, terres noires
04/06/08	60	6.12444	44.66861	7089	100	
04/06/08	59	6.13694	44.67333	197	100	champ
04/06/08	63	6.15861	44.67167	64	100	terres noires, bord route
04/06/08	63B	6.15778	44.67139	597	100	
04/06/08	68	6.16333	44.67528	8431	100	
04/06/08	41	6.15472	44.65111	808	100	champ
04/06/08	51	6.14389	44.65111	24726	100	
04/06/08	52	6.12500	44.65472	90	100	champ cultivé
04/06/08	53	6.11528	44.66028	36149	100	
04/06/08	54	6.09750	44.66528	67456	100	
05/06/08	80	6.09111	44.69806	3835	100	alpage
05/06/08	79	6.09639	44.70139	758	100	
05/06/08	90	6.09056	44.70889	1240	100	au dessus nappe d'eau
05/06/08	91	6.08889	44.71139	91	50	schiste altéré
05/06/08	92	6.09222	44.71417	12367	100	éboulis de granite
05/06/08	93	6.10222	44.71250	3929	100	éboulis de granite sur argilites noires
05/06/08	94	6.11000	44.71306	23468	70	
05/06/08	100	6.10583	44.71028	6586	100	
05/06/08	99	6.11194	44.70778	490	100	
05/06/08	98	6.11611	44.70306	19145	100	
05/06/08	97	6.12278	44.70806	9734	100	forêt
05/06/08	96	6.12111	44.71361	2001	100	
05/06/08	136	6.15222	44.72500	9751	100	
05/06/08	135	6.13833	44.73250	2000	100	éboulis
05/06/08	134	6.13139	44.73833	726	60	éboulis
05/06/08	133	6.12333	44.74639	25392	100	
05/06/08	132	6.12083	44.74750	36673	100	
05/06/08	131	6.11444	44.74556	9214	100	
05/06/08	130	6.10667	44.74444	7395	100	
05/06/08	129	6.09639	44.73944	2381	100	
05/06/08	128	6.08389	44.73694	16429	100	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
05/06/08	127	6.07611	44.73417	6685	100	
05/06/08	111	6.06889	44.73000	11757	100	
05/06/08	110	6.07139	44.72667	1205	100	
05/06/08	109	6.07556	44.72250	25535	100	
06/06/08	162	6.02556	44.77111	32582	100	
06/06/08	163	6.03083	44.77222	32563	100	
06/06/08	176	6.04083	44.77611	9628	100	
06/06/08	174	6.05583	44.77861	21713	100	
06/06/08	173	6.06389	44.78000	10269	100	
06/06/08	172	6.07167	44.78556	30975	100	
06/06/08	174bis	6.05550	44.77860	27339	100	
06/06/08	177	6.08444	44.79000	31222	100	
06/06/08	178	6.08778	44.79417	46795	100	
06/06/08	179	6.09306	44.79806	3469	50	
06/06/08	180	6.09972	44.80139	51249	100	
06/06/08	180bis	6.10500	44.80667	47954	100	talus, éboulis
09/06/08	84	6.07750	44.68306	14167	100	
09/06/08	86	6.08417	44.67472	36097	100	
09/06/08	85	6.08472	44.67889	62934	100	
09/06/08	55	6.09222	44.67528	1338	100	
09/06/08	83	6.09194	44.68417	70021	100	
09/06/08	81	6.08417	44.69500	63	100	
09/06/08	82	6.07667	44.69222	37240	100	
09/06/08	87	6.07222	44.69778	697	100	
09/06/08	88	6.07500	44.70083	881	100	
09/06/08	89	6.08000	44.70417	62901	100	
10/06/08	104	6.06694	44.69194	10639	100	
10/06/08	101	6.06972	44.70639	17692	100	
10/06/08	103	6.05222	44.71389	6374	100	
10/06/08	115	6.04944	44.72167	4551	100	
10/06/08	114	6.04028	44.72583	37675	100	
10/06/08	119	6.02806	44.72556	32937	100	
10/06/08	120	6.03028	44.73306	45483	100	
10/06/08	123	6.02417	44.73917	11582	100	
10/06/08	147	6.03306	44.74500	20120	100	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
10/06/08	148	6.03639	44.75000	11022	100	
10/06/08	149	6.03639	44.75250	6251	100	
10/06/08	150	6.03889	44.75694	23204	100	
10/06/08	146	6.04083	44.74667	23459	100	
10/06/08	145	6.02861	44.74333	1040	100	
10/06/08	126	6.04833	44.74056	48748	100	
10/06/08	125	6.05917	44.73472	5799	100	
10/06/08	124	6.06528	44.73250	9765	100	
10/06/08	112	6.05944	44.72222	671	100	
10/06/08	112bis	6.05944	44.72222	354	100	
10/06/08	102	6.06028	44.71611	941	100	
10/06/08	102bis	6.06028	44.71611	17898	100	
10/06/08	113	6.05056	44.72750	32441	100	
10/06/08	121	6.04389	44.72833	4681	100	
10/06/08	122	6.03806	44.73778	8310	100	
10/06/08	141	6.01556	44.75056	29399	100	
10/06/08	142	6.01750	44.75611	14469	100	
10/06/08	143	6.02556	44.76056	39154	100	
10/06/08	144	6.03278	44.80083	9288	100	
10/06/08	151	6.03417	44.76917	7250	100	
10/06/08	152	6.03639	44.76972	23625	100	
10/06/08	153	6.03333	44.77778	4610	100	
10/06/08	154	6.02583	44.78111	6386	100	
10/06/08	166	6.03056	44.78278	7941	100	
10/06/08	167	6.03806	44.78500	249	60	
10/06/08	168	6.04500	44.78639	14030	100	
11/06/08	117	6.01778	44.72083	1610	100	
11/06/08	117B	6.01778	44.72083	4567	100	
11/06/08	118	6.00833	44.72861	4644	100	
11/06/08	137	6.00500	44.73556	5811	100	
11/06/08	138	6.00833	44.74972	68612	100	
11/06/08	139	6.00694	44.75750	90740	100	
11/06/08	140	6.01056	44.76194	73878	100	
11/06/08	161	6.01306	44.76667	43920	100	
11/06/08	175	6.04528	44.77750	328	100	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
11/06/08	175B	6.04528	44.77750	170	100	
11/06/08	171	6.06250	44.78361	5279	100	
11/06/08	170	6.05611	44.78417	9612	100	
11/06/08	169	6.04889	44.78194	15123	100	
11/06/08	156	6.01500	44.78083	28572	100	
11/06/08	157	6.01028	44.78500	54698	100	
11/06/08	158	6.02000	44.78806	16633	100	
11/06/08	181	6.02528	44.79361	22794	100	
11/06/08	182	6.02889	44.79750	12114	100	
11/06/08	183	6.03833	44.79750	13235	100	
11/06/08	186	6.02694	44.82000	2338	100	
11/06/08	187	6.02583	44.81611	3444	100	
11/06/08	188	6.02694	44.81000	4177	100	
11/06/08	185	6.02278	44.80278	27967	100	
11/06/08	184	6.02306	44.79639	29296	100	
12/06/08	164	6.01778	44.77361	567	100	
12/06/08	165	6.00944	44.77722	303	100	
12/06/08	199	5.98556	44.77806	84155	100	
12/06/08	198	5.98389	44.78250	23986	100	
12/06/08	197	5.98167	44.78778	728	100	
12/06/08	196	5.97139	44.79389	14007	100	
12/06/08	200	5.96250	44.79556	63550	100	
12/06/08	201	5.95778	44.79806	30356	100	
12/06/08	211	5.95083	44.79778	858	100	
12/06/08	210B	5.94528	44.79833	20329	100	
12/06/08	210	5.94528	44.79944	301	100	
12/06/08	202	5.94556	44.80361	24295	100	
12/06/08	209	5.94139	44.80472	7054	100	
12/06/08	203	5.94028	44.80694	12522	100	
12/06/08	195	5.97722	44.79500	1513	100	
12/06/08	204	5.96500	44.80222	33898	100	
12/06/08	205	5.95750	44.80361	3328	100	
12/06/08	208	5.95417	44.80611	276	100	
12/06/08	207	5.95000	44.81028	9233	100	
12/06/08	206	5.94694	44.81472	1542	100	

date	point	longitude (°E)	latitude (°N)	activité ²²² Rn (Bq/m ³)	profondeur (cm)	nature du sol / substratum
12/06/08	194	5.96833	40.80278	16977	100	
12/06/08	193	5.97500	40.80361	14832	100	
12/06/08	192	5.98083	40.80167	10237	100	
12/06/08	191	5.98778	40.79667	5566	100	
12/06/08	190	6.00250	40.79778	57511	100	
12/06/08	189	6.00333	40.79278	17249	100	
12/06/08	160	5.99472	40.78139	5128	100	
12/06/08	159	6.01278	40.77917	4910	100	
12/06/08	155	6.02139	40.77972	22970	100	

Annexe 5

Teneurs en uranium, thorium mesurées sur roche totale

n°	longitude (E)	latitude (N)	formation géologique	Th (ppm)	U (ppm)
1	956960	1833470	Ms	3,7	1,3
2	953740	1835200	Fz	7	2,6
3	953590	1842250	Fy	11	3,5
4	957680	1836540	p	11	3,2
5	964690	1836070	EEg	1,8	1,2
6	960080	1839470	Rr	23	3,6
7	969080	1838780	Rht	12	4,9
8	963040	1838920	Dr	9,4	2
9	952630	1839960	r(1)	7,8	2,8
10	952570	1841080	r(2)	19	1,1
11	953380	1842220	r(3)	19	2,4
12	958460	1843060	h	8,3	4,8
13	967620	1846240	2ae-a	4,3	5,4
14	960820	1843550	2ae-B	1,5	1,7
15	961810	1846400	Ai	3,3	5,2
16	956190	1830370	1ae	6,9	6
17	959600	1841320	1ae-a	5,5	2,5
18	959850	1843140	1ae-aB	4,7	5,2
19	954710	1830210	2ae-aB	2,8	4

Teneurs en uranium et thorium des formations géologiques échantillonnées dans l'Estérel ; les seuils de détection limite (d.l.) sont de 1 ppm pour Th et 0,1 ppm pour U ; les coordonnées sont indiquées en système de projection métrique Lambert II étendu ; les indices de formations font référence à la carte géologique 1/50000^{ème} de Fréjus-Cannes (n°1024) :

Ms : sables

Fy : alluvions, colluvions würmiennes

Fz : alluvions, colluvions récentes

p : marnes et argiles bleues plaisanciennes

EEg : estérellites

Rr : rhyolite rose – orangée

Rht : rhyolite rouge

Dr : dolérites

r : arkoses, pélites, grès : *r(1)* formation du Muy, *r(2)* formation du Mitau, *r(3)* formation des Pradineaux

h : ensemble gréso-schisteux, conglomérats

2ae-a : gneiss migmatitique du Tanneron

2ae-B : gneiss plagioclastiques à deux micas du Tanneron

Ai : leptynites

1ae, 1ae-a, 1ae-aB : gneiss ocellés et lités de Cannes, migmatites hétérogènes

2ae-aB : gneiss supérieur du Tanneron

n°	longitude (E)	latitude (N)	formation géologique	Th (ppm)	U (ppm)
1	900910	1977670	Fz Molines	7,6	2,4
2	904130	1968420	Fz	6,1	2
3	896380	1971070	Fz - St Bonnet	9,1	2,5
4	894170	1982540	Fz - Le Séchier	7,2	2,4
5	895410	1974370	FGy	4,5	2
6	898330	1969720	Fy - St Bonnet	10	3,4
7	905560	1967720	Gy(1) - St-Léger-les Mélèzes	7,7	1,9
8	890630	1983040	05Gy - Les-Hts-de-St-Firmin	9,2	2,6
9	894450	1975920	Gy (gw) Villard Saint Pierre	1,9	1,5
10	890390	1983440	Gx	9,5	2,9
11	912040	1971510	eO	1	1
12	911760	1972000	eGC	3,5	1,4
13	910560	1972550	eGcM	4	1,2
14	911630	1971630	eGM	13	3,4
15	908550	1968720	eF (1/3)	< d.l.	1,9
16	908200	1968360	eF (2/3)	< d.l.	0,3
17	908240	1968490	eF (3/3)	9,7	2,5
18	896340	1973890	jN - Pisançon	6,1	1,9
19	902930	1970750	jN - La Villette	7,6	2,4
20	906310	1970950	jN	7,4	1,8
21	891920	1985110	I9-c(I9-b) - col de l'Esparcelet	7	2,1
22	894850	1977580	I9b - Le Collet	< d.l.	0,9
23	893370	1982050	I9b (I9a) - St-Jacques Valgodemard	< d.l.	1
24	890940	1982480	I (I9a) (2/2)	< d.l.	1,1
25	891230	1982380	I (I9b) (1/2)	1,1	1,7
26	891940	1982450	Im (I6-7a)	7,8	2
27	886390	1984920	li- Aspres-lès-Corps	< d.l.	1,7
28	887630	1983670	ae2 - Beaufin	8,1	2,3
29	901060	1977670	Ai DD - amphibolites	6,5	1,8

Teneurs en U et Th des formations échantillonnées dans le Champsaur ; seuils de détection limite (d.l.) : 1 ppm pour Th, 0,1 ppm pour U ; les coordonnées sont indiquées en système Lambert II étendu; les indices de formations font référence aux cartes géologiques 1/50000^{ème} de Saint-Bonnet (n°845) et d'Orcières (n°846) :

Fz : alluvions récentes, actuelles

FGy : complexe fluvio-glaciaire würmien

Fy : alluvions würmiennes

Gy : moraines würmiennes

Gx : moraines rissiennes

eO : schistes à blocs avec pélites et argiles

eGc, eGcM : flysch à dominante gréseuse

eGM : schistes noirs

Ai DD : amphibolite

eF : schistes à blocs : flysch schisto-gréseux (*eF*), calcschistes planctoniques (*eC*), grès du Champsaur (*eG*)

jN : « Terres Noires »

I9c : marnes noires

I9b : calcaires marneux

I : calcaires

Im : marno-calcaires

li : calcaires et calcaires à entroques

ae2 : gneiss et leptynites

Annexe 6

Données Météo-France

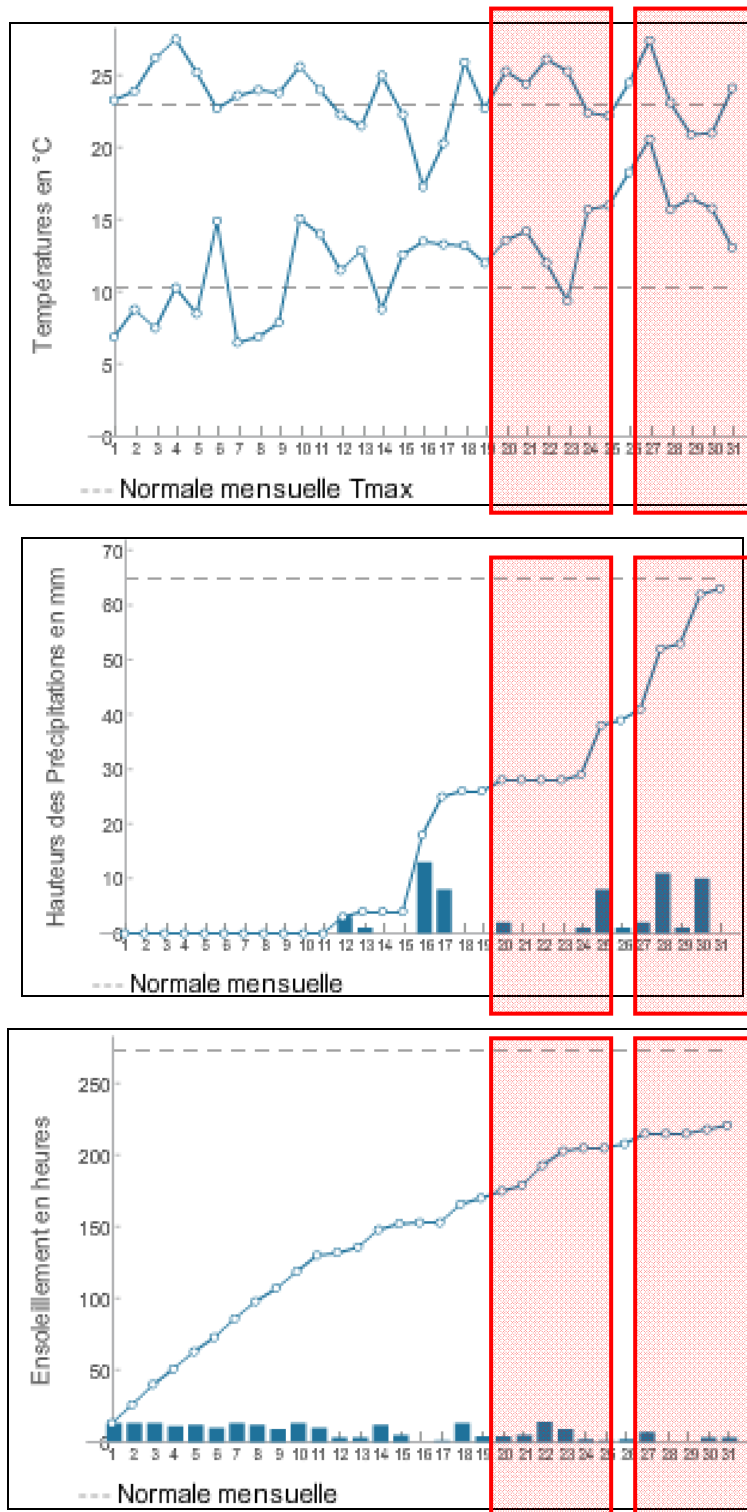
(http://france.meteofrance.com/france/climat_france?41761.path=climat%252FREG19)

Station du Luc (43°23'N, 6°19'E, 160m)

TEMPERATURES	Mai 2008
T_{MIN} minimale (°C)	6,5 (07/05/08)
T_{MIN} maximale (°C)	20,6
T_{MIN} moyenne (°C)	12,5
<i>Normale_{MIN} 1971-</i>	<i>10,3</i>
T_{Max} minimale (°C)	17,3
T_{Max} maximale (°C)	27,5
T_{Max} moyenne (°C)	23,7
<i>Normale_{Max} 1971-</i>	<i>23</i>

PRECIPITATIONS	Mai 2008
Cumul mensuel (mm)	62,6
Hauteur quotidienne la plus élevée (mm)	13,4 (16/05/08)
<i>Normale 1971-2000</i>	<i>65,1</i>
Nombre de jours avec précipitations	9
<i>Normale_{jours précipitations} 1971-2000</i>	<i>6</i>

INSOLATION	Mai 2008
Cumul mensuel (heures)	221
<i>Normale 1991-2000</i>	<i>273</i>
Nombre de jours avec faible ensoleillement	10
<i>Normale_{jours faible ensoleillement} 1991-2000</i>	<i>4</i>
Nombre de jours avec fort ensoleillement	10
<i>Normale_{jours fort ensoleillement} 1991-2000</i>	<i>10</i>



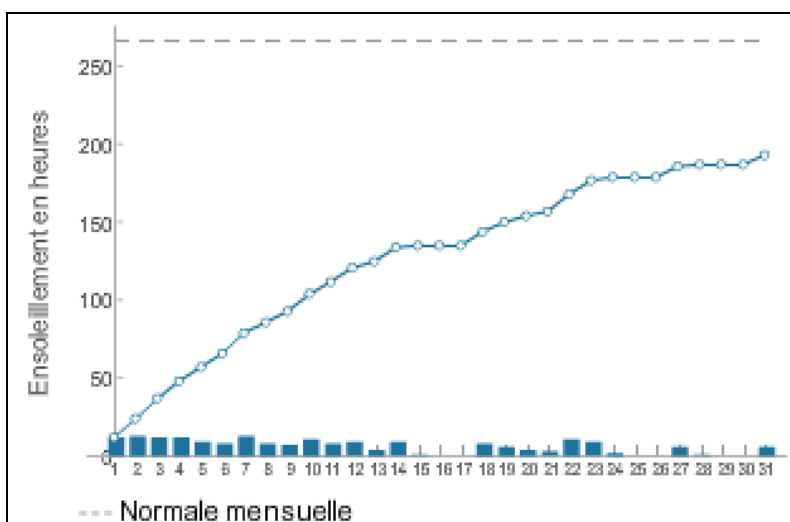
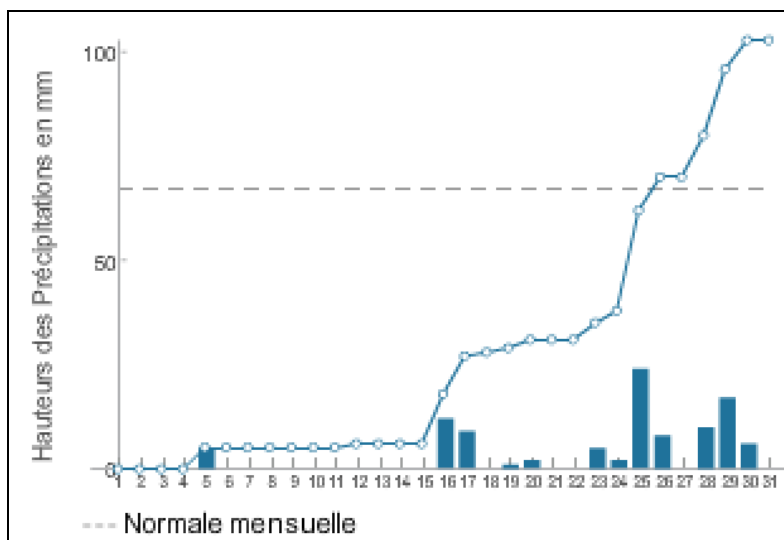
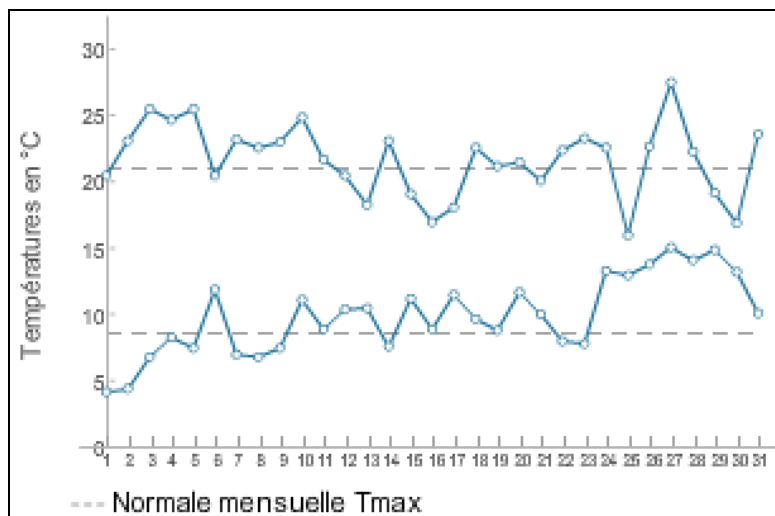
Station du Luc – mois de mai 2008

Station de Saint Auban – Château-Arnoux (44°05'N, 6°E, 460m)

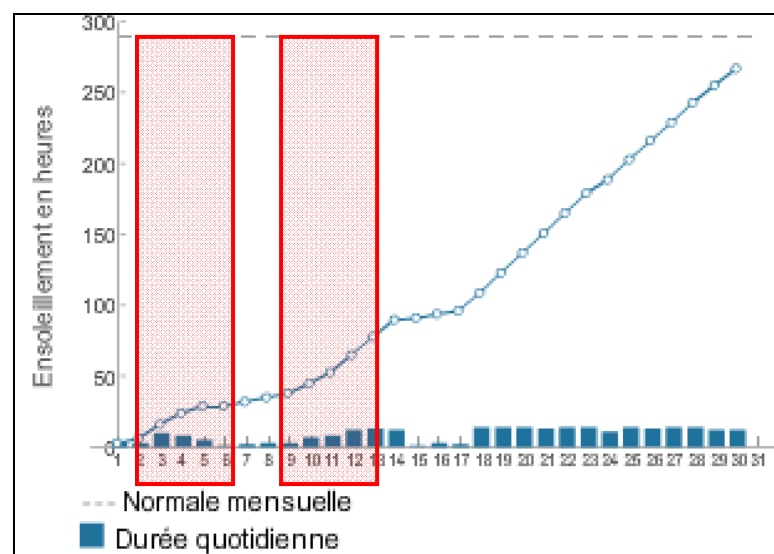
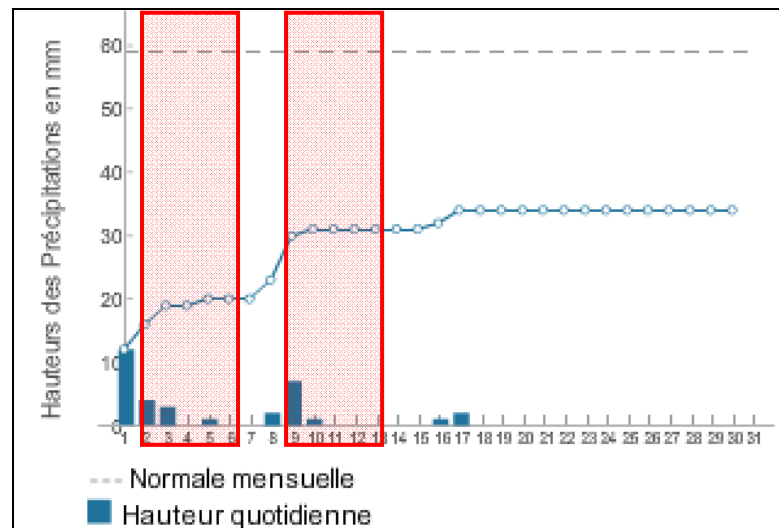
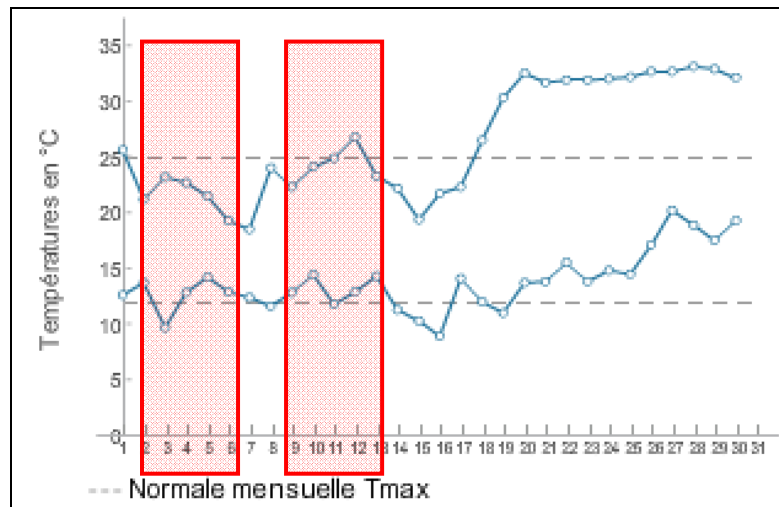
TEMPERATURES	Mai 2008	Juin 2008
T_{MIN} minimale (°C)	4,2 (01/05/08)	8,9 (16/06/08)
T_{MIN} maximale (°C)	15,1 (27/05/08)	20,2 (27/06/08)
T_{MIN} moyenne (°C)	9,9	13,8
<i>Normale_{MIN} 1971-2000</i>	8,6	12
T_{Max} minimale (°C)	16 (25/05/08)	18,5 (07/06/08)
T_{Max} maximale (°C)	27,5 (27/05/08)	33,1 (28/06/08)
T_{Max} moyenne (°C)	21,7	26,5
<i>Normale_{Max} 1971-2000</i>	21	24,9

PRECIPITATIONS	Mai 2008	Juin 2008
Cumul mensuel (mm)	102,8	34
Hauteur quotidienne la plus élevée (mm)	24,4 (25/05/08)	11,6 (01/06/08)
<i>Normale 1971-2000</i>	66,8	58,6
Nombre de jours avec précipitations	12	8
<i>Normale_{jours précipitations} 1971-2000</i>	8	7

INSOLATION	Mai 2008	Juin 2008
Cumul mensuel (heures)	193	267
<i>Normale 1991-2000</i>	266	290
Nombre de jours avec faible ensoleillement	10	7
<i>Normale_{jours faible ensoleillement} 1991-2000</i>	5	3
Nombre de jours avec fort ensoleillement	5	12
<i>Normale_{jours fort ensoleillement} 1991-2000</i>	10	12



Station de Saint Auban– mois de mai 2008



Station de Saint Auban – mois de juin 2008



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

Service géologique régional PACA
117 avenue de Luminy
BP 168
13276 MARSEILLE CEDEX 09 - France
Tél. : 04 91 17 74 77