Étude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie

J. Deparis, B. Sevin, P. Maurizot, José Perrin, S. Rad, Florence Quesnel

▶ **To cite this version:**

J. Deparis, B. Sevin, P. Maurizot, José Perrin, S. Rad, et al.. Étude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. [Rapport de recherche] Programme Radiométrie. Tome Nickel et Technologie. BRGM/RP-59829-FR, CNRT Nickel et son environnement. 2011, 84 p. ird-02160822

HAL Id: ird-02160822
https://ird.hal.science/ird-02160822

Submitted on 20 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

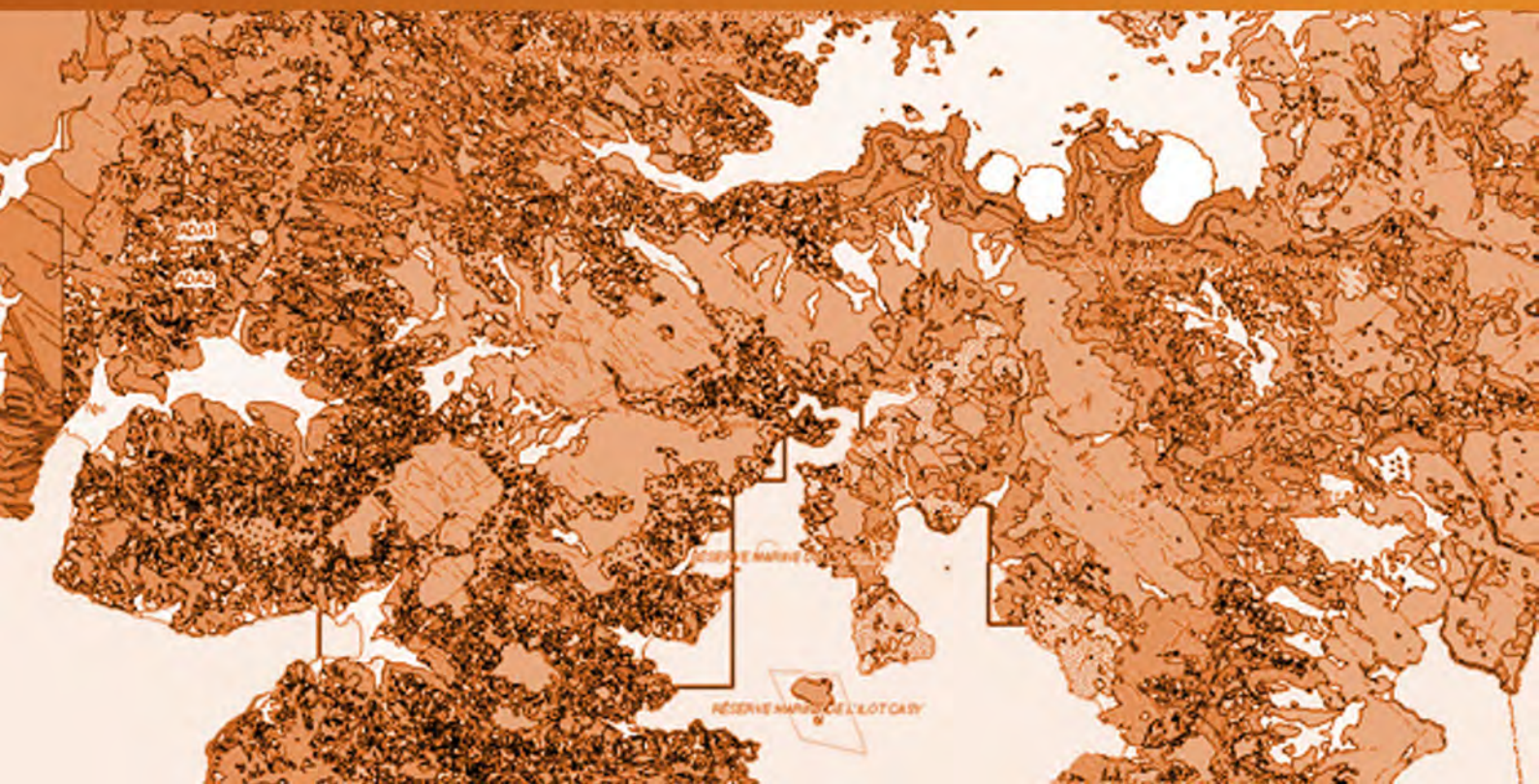
CNRT "Nickel et son environnement"

Rendu scientifique
Edition 2011

Tome Nickel et Technologie

La réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie

.



Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie

Etude financée par le CNRT « Nickel et son environnement

Ce programme n'a pas bénéficié de cofinancement

Programme de recherche appliquée lancé en 2009

Travaux réalisés par le BRGM

Projet d'une durée de 12 mois

Rendu Final de 89 pages

2011

Titre : Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotite de NC

De : Deparis J., Sevin B., Maurizot P., Perrin J., Rad S. et Quesnel, F.

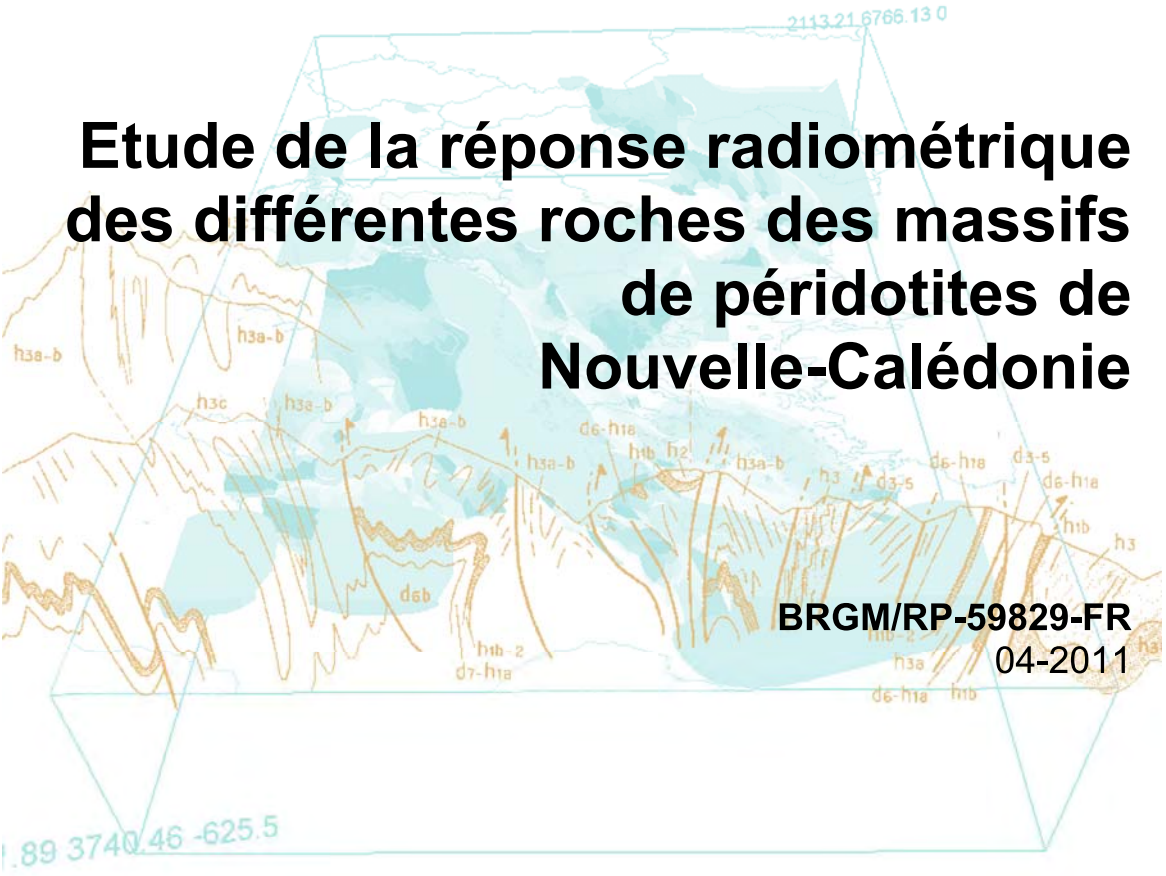
Avril 2011

LIVRABLE

CNRT NICKEL & son environnement

Projet « Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-calédonie »	José Perrin

Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie



BRGM/RP-59829-FR
04-2011

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie

BRGM/RP-59829-FR
04-2011

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Recherche du BRGM – Projet CNRT

Deparis J., Sevin B., Maurizot P., Perrin J., Rad S. et Quesnel, F.

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : G. Martelet	Nom : P. Nehlig
Date :	Date :
Signature :	Signature :

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

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés :
Nouvelle-Calédonie, latérite, altération, géophysique aéroportée, spectrométrie, gamma, uranium, thorium, potassium.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Deparis J., Sevin B., Maurizot P., Perrin J., Rad S. et Quesnel, F. (2011) - Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie, 80 p., 34 fig.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les levers de géophysique aéroportée offrent d'une manière générale une information importante en domaine minier et de surcroit dans un contexte de fort dénivelé et de zone difficilement accessible. La mesure de la radiométrie gamma spectrale est une des méthodes couramment utilisée, couplée aux mesures électriques et magnétiques. Toutefois, dans le cas particulier des massifs de péridotite et des mines de nickel supergène, la faisabilité d'une cartographie radiométrique aéroportée n'est pas évidente. En effet, les roches ultrabasiques sont peu radiogéniques et ce faible signal peut être modifié par l'altération qui contrôle les minéralisations en nickel.

Pour cette raison, le projet de recherche financé par le CNRT et le BRGM « Etude de la réponse radiométrique des différentes roches des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie » s'est attaché à analyser, avec un spectromètre au sol, les réponses radiométriques des différents éléments géologiques que l'on trouve couramment dans les massifs de péridotite et les mines de nickel. Ces mesures vont constituer une bibliothèque de réponses radiométriques en contexte néo-calédonien qui comble une lacune de données utiles pour déterminer si la méthode est transposable au mode d'acquisition aéroporté et avec quelle configuration de vol et instrumentale.

Le cortège filonien qui recoupe les péridotites et structure les massifs et leurs gisements a été la cible principale de cette étude. L'évolution du signal dans les profils d'altération a également été étudiée. Différents modes d'acquisition, ponctuels ou linéaires ont été testés. Des simulations de cartographie aéroportée ont été faites sur des zones filoniennes précisément cartographiées.

Les mesures ont montré que les massifs de péridotites sont très pauvres en potassium, uranium et thorium. Les filons sains qui traversent ces massifs sont enrichis en potassium, uranium et thorium. Ces derniers perdent leur potassium lorsqu'ils sont altérés.

Les teneurs en radioéléments mesurées dans les profils latéritiques sont faibles. Malgré cela, il a été mis en évidence une augmentation des teneurs en uranium et thorium et une diminution de la concentration de potassium dès les premiers stades d'altération.

Une simulation d'acquisition gamma-spectrométrique aéroportée a montré que pour mesurer les faibles teneurs rencontrées ici, il faut optimiser les paramètres d'acquisition. Pour que les cartes de potassium restent exploitables il est impératif de mettre en œuvre un détecteur gamma spectrométrique de gros volume (au moins 33 litres). En configuration couplée avec l'électromagnétisme, cette optimisation qui se fait au détriment de l'autonomie de vol de l'hélicoptère, induit une augmentation sensible du coût de mise en œuvre.

Sommaire

SYNTHESE 3

SOMMAIRE 5

LISTE DES ILLUSTRATIONS 6

LISTE DES TABLEAUX 8

1. CADRE DU PROJET 11

2. PRINCIPES DE BASE 13

2.1. LE CORTEGE FILONIEN RECOUPANT DES PERIDOTITES 13
2.2. PROFILS LATERITIQUES 14
2.3. LA SPECTROMETRIE GAMMA 15

3. APPLICATION EN NOUVELLE-CALEDONIE 18

3.1. APPAREILLAGE MIS A DISPOSITION DU PROJET 18
3.2. TRAITEMENTS DES DONNEES 20
3.3. MESURES ACQUISES POUR LE PROJET 23

4. RESULTATS ACQUIS 26

4.1. ENSEMBLE DES MESURES 26
4.2. COMPARAISON AVEC LES DONNEES GEOCHIMIQUES 27
4.2.1. Confrontation des teneurs géochimiques et des mesures spectroradiométriques 27
4.2.2. Les isotopes de l'uranium 28
4.2.3. Équilibre séculaire et déséquilibre 29
4.2.4. Résultats 31
4.3. COMPARAISON DES MESURES FILONS VERSUS ENCAISSANT ULTRABASIQUE DANS LE MASSIF DU SUD 34
4.3.1. Contexte 34
4.3.2. Caractérisation des péridotites 35
4.4. SITE DE LA RIVIERE DES PIROGUES 36
4.4.1. Géologie 36
4.4.2. Mesures radiométriques 37
4.4.3. Analyse des mesures en station 38
4.4.4. Modélisation cartographique 41
4.4.5. Transposition à une acquisition aéroportée 47
4.4.6. Apport de l'enregistrement continu 52
4.5. SITE DE TIEBAGHI 53
4.5.1. Géologie 53
4.5.2. Mesures radiométriques 55
4.5.3. Analyse des mesures en station 57
4.5.4. Analyse des mesures en profil et comparaison avec la TRE 59

5. CONCLUSIONS 61

6. BIBLIOGRAPHIE 63

ANNEXE 1 : DONNEES DE CALIBRATION DU SPECTROMETRE PGIS-21 65

ANNEXE 2 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'ECHANTILLONNAGE GEOCHIMIQUE 66

ANNEXE 3 : ETUDE GAMMA-SPECTROMETRIQUE REALISEE DANS LE SUBSTRAT VOLCANO-SEDIMENTAIRE 70

ANNEXE 4 : LIBRAIRIE SPECTRALE DES STATIONS DE MESURE PONCTUELLE 75

Liste des illustrations

Figure 1 : Filons acides recoupant les péridotites: Mine Georges Piles, Massif du Sud. 13

Figure 2 : Schéma conceptuel d'un profil latéritique type de Nouvelle-calédonie d'après Robineau et al (2007). 15

Figure 3 : Spectromètre PGIS21 en opération en Nouvelle-calédonie 18

Figure 4 : Spectromètre gamma PGIS21 19

Figure 5 : Exemple d'un spectre typique de rayonnement gamma (Image extraite du site internet « ressources Naturelles Canada » : http://gsc.nrcan.gc.ca/gamma/theory_e.php. 20

Figure 6 : Exemple de spectre acquis pour le projet 21

Figure 7 : Evolution de l'estimation de la précision de mesure en potassium, uranium et thorium en fonction du temps d'accumulation. 22

Figure 8 : (a) Evolution de la résolution (a) et de la position du pic (b) des spectres journaliers pour la fenêtre potassium. 23

Figure 9 : Diagramme des teneurs de potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour l'ensemble des mesures gammas spectrométriques réalisées en Nouvelle-calédonie. 26

Figure 10 : Confrontation entre les analyses de laboratoire et les mesures gamma spectrométriques de terrain pour le potassium, le thorium et l'uranium. 28

Figure 11: Description des trois chaînes radioactives naturelles représentées dans un diagramme neutron-proton, figure tirée de Allègre, 2005 29

Figure 12 : Effet de recul, figure tirée de Dosseto et al., 2008. 30

Figure 13 : Variation des rapports isotopiques de l'uranium en fonction du temps et de la granulométrie. Figure tirée de Dosseto et al., 2008. 31

Figure 14 : Rapport isotopique ($^{234}U/^{238}U$) et concentration en Uranium dans les roches et sédiments de Tiébaghi et de la rivière des Pirogues 32

Figure 15 : Comportement du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les filons sains (points rouges), les filons altérés (points grenats) et la roche encaissante saine (points bleus) 35

Figure 16 : Diagramme ternaire des concentrations relatives en potassium, uranium, thorium des péridotites du massif du sud 36

Figure 17 : Répartition de l'échantillonnage sur le site de la Rivière des Pirogues. 38

Figure 18 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sur le site de la Rivière des Pirogues 39

Figure 19 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sur le site de la rivière des pirogues (les ellipses ont un rayon égal à un demi écart type) 41

Figure 20 : Carte géologique du site de la Rivière des Pirogues (Maurizot, 1993). 42

Figure 21 : Carte radiométrique du potassium du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition. 43

Figure 22 : Carte radiométrique de l'uranium du site de la Rivière des Pirogues. . Les points représentes les stations d'acquisition. 44

Figure 23 : Carte radiométrique du thorium du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition. 45

Figure 24 : Carte radiométrique ternaire du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition 46

Figure 25 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 100 m de hauteur pour un volume de capteur de 16,8 l. 50

Figure 26 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 80 m de hauteur pour un volume de capteur de 33,6 l. 51

Figure 27 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 50 m de hauteur pour un volume de capteur de 50,4 l. 52

Figure 28 : Carte du potassium (a), de l'uranium (b), du thorium (c) et carte géologique (d) du site de la Rivière des Pirogues réalisées avec les enregistrements continus. Les points représentes les stations d'acquisition. 53

Figure 29 : Log simplifié du profil d'altération du massif de Tiébaghi. 55

Figure 30 : Répartition de l'échantillonnage sur le site de Tiébaghi. 56

Figure 31 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies du site de Tiébaghi. 57

Figure 32 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sondées. (les ellipses ont un rayon égal à un demi écart type). 59

Figure 33 : Comparaison du comptage total (a), du potassium (b), de l'uranium (c) et du thorium (d) en fonction de la résistivité de proche surface. 60

Figure 34 : Itinéraires de liaison hors contexte ultrabasique. 70

Figure 35 : Localisation des mesures des points d'affleurements géologiques 71

Figure 36 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour différentes lithologies du substrat volcano-sédimentaire en Nouvelle-calédonie..... 72

Figure 37 : Exemple d'enregistrement en continu à pied du signal gamma spectrométrique réalisé sur une lame de serpentinites en contact avec des micaschistes altérés de l'unité de la Boghen..... 73

Figure 38 : Exemple d'enregistrement en continu en voiture du signal gamma spectrométrique..... 74

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif de l'échantillonnage géophysique réalisé..... 24

Tableau 2 : Mesures gamma spectromètriques réalisées au droit des péridotites dans le massif du sud..... 35

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres statistiques (moy : moyenne ; std : écart type) pour les différentes lithologies mesurées sur le site de la rivière des Pirogues..... 40

Tableau 4 : Coefficient de sensibilité et d'atténuation d'un système aéroporté pour des cristaux de type NaI..... 48

Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres statistiques (moy : moyenne ; std : écart type) pour les différentes lithologies mesurées sur le site de Tiébaghi..... 58

Tableau 6 : Récapitulatif de l'échantillonnage géochimique réalisé..... 66

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats géochimiques..... 69

1. Cadre du projet

La cartographie géophysique aéroportée (magnétisme et radiométrie spectrale) d'un territoire intéresse de nombreux domaines des sciences de la Terre dont ceux des ressources naturelles, de la cartographie géologique et de l'environnement. Les méthodes géophysiques électriques sont aujourd'hui utilisées par les mineurs en Nouvelle-Calédonie avec succès et fournissent une image de sub-surface de qualité (tomographie électrique de résistivité ou ERT, Robineau et al, 2007). L'utilisation de méthodes aéroportées permettrait de reconnaître rapidement des emprises plus vastes. Une étude d' "avant projet sommaire pour la réalisation d'un programme de levé géophysique aéroporté de la Nouvelle-Calédonie" (Perrin, 2008) a montré que les contrastes de résistivité mis en évidence par ERT sont très certainement accessibles par les méthodes EM héliportées dont l'utilisation permettrait de dégrossir rapidement de grandes zones et de cibler la reconnaissance au sol.

Les méthodes EM peuvent être couplées à de la radiométrie (spectrométrie gamma), qui en mesurant la radioactivité naturelle (K, U, Th) permet de caractériser indirectement la nature du substrat. Les péridotites sont connues pour être peu radiogéniques. En revanche les filons de roches acides, qui structurent les massifs et guident l'altération et donc la géométrie des gisements, pourraient apporter des éléments de prospection intéressants.

Ce projet a pour objectif de déterminer si la radiométrie, dans les massifs de péridotites altérés en condition tropicale, possède un niveau de réponse suffisamment contrasté pour être exploitable en mode d'acquisition aéroporté, justifiant ainsi son couplage avec d'autres méthodes aéroportées (EM) ayant un potentiel d'application important pour la mine en Nouvelle-Calédonie. Ce potentiel est sous-exploité puisqu'il n'est pas mis en pratique par les sociétés minières qui opèrent principalement au sol en géophysique actuellement. Les conclusions de cette étude pourraient donc apporter des éléments de connaissance et de décision cruciaux pour le déploiement de ces méthodes dans la prospection minière.

Dans ce cadre, les réponses radiométriques du milieu péridotitique et de son cortège intrusif plus ou moins altéré, ont été testées par une étude au sol donnant des éléments de base pour évaluer le potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée appliquée à la mine et son environnement en Nouvelle-Calédonie.

2. Principes de base

2.1. LE CORTEGE FILONIEN RECOUPANT DES PERIDOTITES

La nappe des péridotites est recoupée par un cortège de filons d'origines et de compositions très variées : ultrabasiques, basiques, intermédiaires et acides. Ces filons ne se retrouvent jamais dans le substrat autochtone ni dans l'unité basaltique de Poya. Ils sont bien individualisés dans le corps de la nappe des péridotites mais considérablement écaillés dans sa semelle serpentineuse. Toutes ces caractéristiques indiquent clairement une origine anté-obduction.

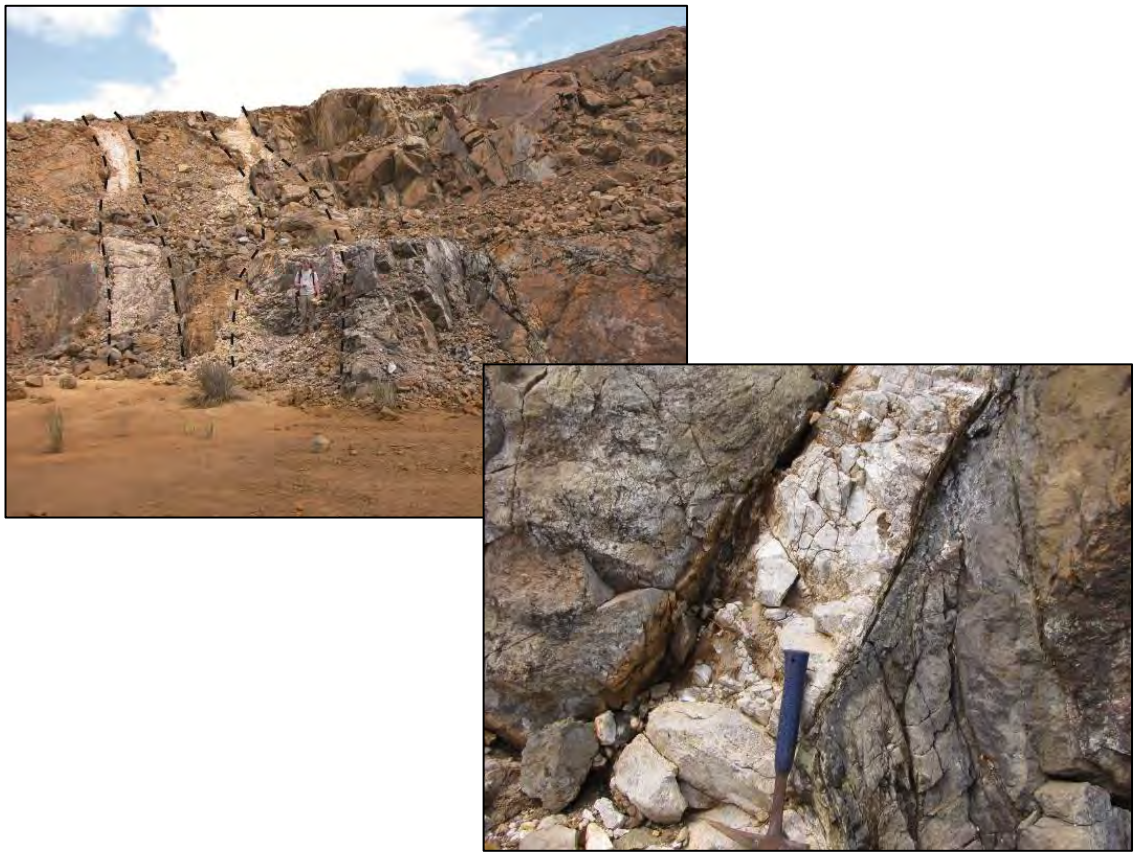


Figure 1 : Filons acides recoupant les péridotites: Mine Georges Piles, Massif du Sud.

Les filons basiques, intermédiaires et acides présentent des compositions géochimiques et des textures complexes. Cluzel et al. (2006) distinguent des granitoïdes feldspathiques, des andésites boninitiques, des microgabbros, des tonalites, des dolérites et des amphibolites. L'épaisseur des filons varie de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. Ils sont associés à un champ de fracturation serpentineuse. Certains faciès sont pegmatoïdes, avec de grands cristaux de quartz, de feldspath ou d'amphibole et des textures sub-solvus (dendritiques,

symplectiques) témoignant du rôle important d'une phase fluide. Une partie des filons présente des déformations ductiles (amphibolites). Certains présentent de multiples injections de compositions et textures variées révélant une évolution complexe. Les relations avec l'encaissant péridotitique montrent que les intrusions se sont faites dans une roche hôte qui était à faible température et en contexte fragile.

Bien que l'aspect structural de la mise en place de ce cortège intrusif et du réseau de fractures associé n'ait jamais fait l'objet d'une étude spécifique, l'analyse linéamentaire et morphologique courante permet une certaine approche grossière. Les zones filoniennes constituent en effet des lignes de faiblesse contrôlant les phénomènes supergènes d'infiltration, altération et érosion se traduisant par des alignements de crêtes ou vallées qui sont bien connus des mineurs. Ces derniers les utilisent comme guides structuraux jalonnant ou délimitant les zones minéralisées. Ce réseau s'organise généralement selon trois directions principales dont chacune peut être prépondérante selon les régions : N 135° (la plus courante), N 45° et N 0°. Les pendages associés sont très variables et les filons d'attitudes subhorizontales qui existent indubitablement ne sont pas pris en compte dans cette approche.

Génétiquement, ce cortège intrusif est aujourd'hui interprété comme mis en place en contexte supra-subduction, caractérisant une hydratation du manteau de la plaque chevauchante par la croûte de la plaque chevauchée en cohérence avec les compositions boninitiques et basaltiques de certaines amphibolites qui dériveraient partiellement de l'unité de Poya. Les âges moyens dans les filons de compositions acides du massif du Sud (U/Pb sur zircon, Cluzel et al., 2006) sont remarquablement centrés dans toute la nappe des péridotites autour de 53 Ma, âge proche de la limite Paléocène - Eocène. Des datations par la méthode Ar/Ar sur les amphibolites (Cluzel, en préparation) donnent des âges comparables.

L'hypothèse actuellement admise (Cluzel et al., 2006) place cet évènement dans le cadre d'une réorganisation d'ampleur régionale des plaques dans cette zone du Pacifique Sud Ouest. Ces changements auraient entrainé l'initiation d'une subduction à pendage vers l'Est au niveau de la dorsale du bassin océanique sud Loyauté, enfouissant l'anomalie thermique de la zone d'accrétion et favorisant l'injection des produits de fusion partielle de la plaque subduite dans le manteau de la plaque chevauchante, future nappe des péridotites. Le corollaire de cette origine intra-océanique est une composition appauvrie notamment en éléments radiogéniques puisque ne faisant pas intervenir de croûte continentale. Les teneurs en K_2O indiquées par Cluzel et al. (2006) sont inférieures à 1 % (0,9 à 0,03 %). Les zircons et sphènes qui ont permis les datations absolues, sont porteurs d'U (0,6 à 0,06 ppm) et Pb (0,1 à 4,2 ppm).

2.2. PROFILS LATERITIQUES

Les profils latéritiques sont le résultat d'une altération (bio)-physico-chimique de la roche sous des conditions climatiques intertropicales. Ces altérites sont organisées verticalement en horizons (Figure 2), avec le passage d'une roche mère fissurée à des zones de plus en plus altérées par hydrolyse vers le haut du profil (Tardy, 1993). Lorsque le profil d'altération est complet, on obtient en sommet de profil un horizon cuirassé en fer (ferricrète) dans le cas d'un substrat de péridotites.

En Nouvelle-Calédonie, sur substrat de péridotites, ces profils peuvent dépasser 50 m d'épaisseur. Durant le processus d'altération, les minéraux primaires composant les roches ultrabasiques (olivine et pyroxènes) sont détruits par hydrolyse. Une partie des éléments chimiques est exportée du profil par les nappes phréatiques (Si et Mg) et une autre partie des éléments chimique (Fe, O et H) est réassemblée pour former des minéraux secondaires (oxydes de Fer : goethite et hématite principalement). Les différents horizons du profil sont en général bien individualisés (Figure 2). Ils sont le résultat à la fois d'une percolation *per descensum* des eaux météoriques et du battement de la nappe.

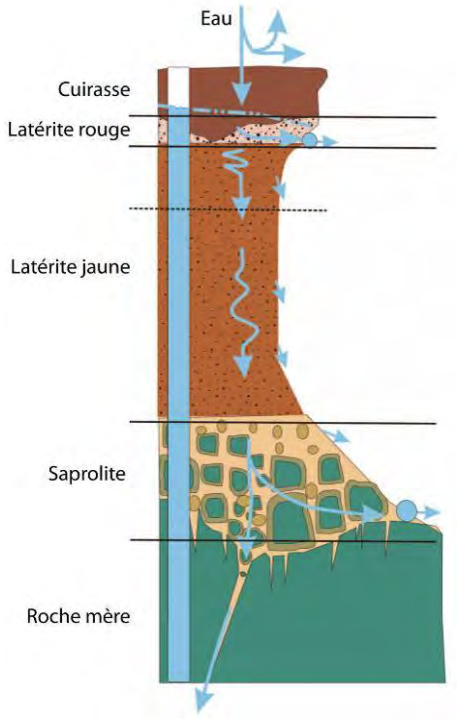


Figure 2 : Schéma conceptuel d'un profil latéritique type de Nouvelle-calédonie d'après Robineau et al (2007).

L'altération est souvent un phénomène polyphasé et il est possible d'observer la superposition sur un même profil, d'altérations survenues au cours de périodes successives et dans des conditions différentes.

Il est nécessaire de considérer l'ensemble de ces phénomènes pour assurer une lecture convenable des profils d'altération, de déconvoluer les signaux d'altération de ceux de la roche mère et d'espérer ainsi identifier la lithologie initiale ainsi que les processus qui l'ont modifiée.

2.3. LA SPECTROMETRIE GAMMA

La radiométrie par spectrométrie gamma, en mesurant la radioactivité naturelle, détermine les teneurs du sol en potassium (K), uranium (U) et thorium (Th), éléments radioactifs naturels présents à l'état de traces dans les formations géologiques. La réponse radiométrique donne accès à une signature géochimique simplifiée mais

souvent suffisante pour aider à caractériser les roches et parfois pour identifier la nature du substrat géologique. La méthode est peu pénétrante verticalement en raison de l'auto-absorption du rayonnement par le milieu. 90% des rayonnements gamma émanent des 30-45 premiers centimètres du sol (IAEA, 2003). L'intensité des émissions gamma est influencée à la fois par la minéralogie et la géochimie de la roche saine et par la nature de l'altération. En zone inondée, la présence d'une tranche d'eau métrique constitue un écran total. Pour avoir une bonne sensibilité en mode d'acquisition aéroportée, l'utilisation de la méthode requiert la mise en œuvre de capteurs lourds et volumineux à cristaux scintillants très denses d'Iodure de Sodium (NaI).

Le rayonnement gamma issu des roches est produit par la désintégration des radioéléments naturels. Les principaux radioéléments naturels ont été créés lors de la synthèse originelle de l'univers. Ils incluent ^{40}K, ^{232}Th, ^{238}U et ^{235}U. Leur période de demi-vie, de l'ordre du milliard d'années, leur permet d'être encore présents dans les roches. Seul le radioélément ^{40}K est lui-même émetteur de rayonnements gamma (la raie à 1460 keV est produite par cet élément. Pour les radioéléments Th et U, seulement certains de leurs radionucléides-fils sont émetteurs de rayonnements gamma : le ^{214}Bi pour l'^{238}U et le ^{208}Tl pour le ^{232}Th sont les plus significatifs.

Une série de calibrations, de corrections d'environnement et de configuration de mesure, selon une procédure bien établie (IAEA, 2003) permet de quantifier la répartition en radioéléments. L'analyse multi paramètres de ces résultats souvent par le biais de ratio inter éléments apporte une aide géologique décisive (Martelet, 2006).

La réponse radiométrique gamma des roches est à priori bien comprise maintenant mais c'est moins le cas de la réponse et de la distribution des radioéléments de leurs équivalents altérés. C'est seulement assez récemment qu'un intérêt s'est manifesté pour l'utilisation de la radiométrie aéroportée pour l'étude du régolithe et de la géomorphologie (Dickson et Scott, 1997 ; Wilford, 1997 ; Cook *et al.*, 1996).

Le potassium, élément majeur très abondant dans les roches (environ 2,5 % en moyenne dans la croûte), est présent dans les minéraux primaires, tels que les feldspaths potassiques et les micas. Le pourcentage de potassium est généralement élevé dans les roches felsiques acides et faible dans les roches basiques. *A contrario*, l'uranium et le thorium sont plus rares avec une teneur moyenne de 3 et 12 ppm respectivement. La faible abondance isotopique du ^{40}K (0,0118%) amène sa contribution aux mesures radiométriques au même niveau que celle de l'U et du Th.

Du point de vue géochimique les péridotites n'ont pas de potassium et leurs concentrations en uranium et en thorium sont très faibles (de l'ordre de 0,3 ppm). En revanche, de nombreux filons de roches acides recoupent les péridotites avec des teneurs en éléments radioactifs probablement plus fortes. Certains d'entre eux contiennent en particulier du zircon ce qui a permis leur datation (Cluzel et al. 2006). Ces filons et les fractures qu'ils injectent structurent les massifs de péridotites et jouent un rôle important dans le contrôle des gisements de Nickel (compartimentation, drains, écrans). On peut s'attendre à ce que les phénomènes d'altération concentrent également les radioéléments portés par les minéraux lourds (U, Th dans les zircons).

Le comportement des radioéléments dans les altérites a été étudié par le BRGM sur de nombreux levers géophysiques aéroportés en Afrique (Gabon, Guinée, Mali) et en

Guyane. On observe systématiquement un appauvrissement en potassium, lessivé dès le début de l'altération. Au contraire l'uranium et surtout le thorium portés par des minéraux lourds résistants à l'altération, sont concentrés par le phénomène d'altération et sont conservés jusque dans la cuirasse latéritique. Ainsi les couvertures latéritiques en place ne constituent pas un écran pour la radiométrie et dans les cas les plus favorables la méthode peut contribuer à l'estimation de l'importance de l'altération.

Lors du développement d'un profil latéritique, les éléments chimiques constitutifs des minéraux des roches n'ont pas tous le même comportement :

- Dans les cuirasses sont concentrés de manière résiduelle des minéraux lourds et/ou résistants associés aux augmentations des teneurs en Fer. Ces minéraux sont connus comme étant les principaux porteurs d'uranium et de thorium.

- Des phénomènes d'hydrolyse et d'argilisation de la roche mère qui évacuent très rapidement le potassium du milieu surtout s'il est contenu dans les feldspaths et micas noirs.

Les contrastes de signature radiométrique entre péridotites et filons (très faible à nulle pour les péridotites, plus forte pour les filons), amplifiés (mais aussi complexifiés) par les phénomènes d'altération, ouvrent peut être des perspectives intéressantes avec des retombées appliquées pour la prospection du Nickel. Une étude systématique au sol de ces structures dans différents contextes d'altération est donc justifiée.

3. Application en Nouvelle-calédonie

3.1. APPAREILLAGE MIS A DISPOSITION DU PROJET

Un spectromètre portable PGIS21 PicoEnvirotec nouvellement acquis par le BRGM, a été mis à disposition du projet (voir Figure 3).

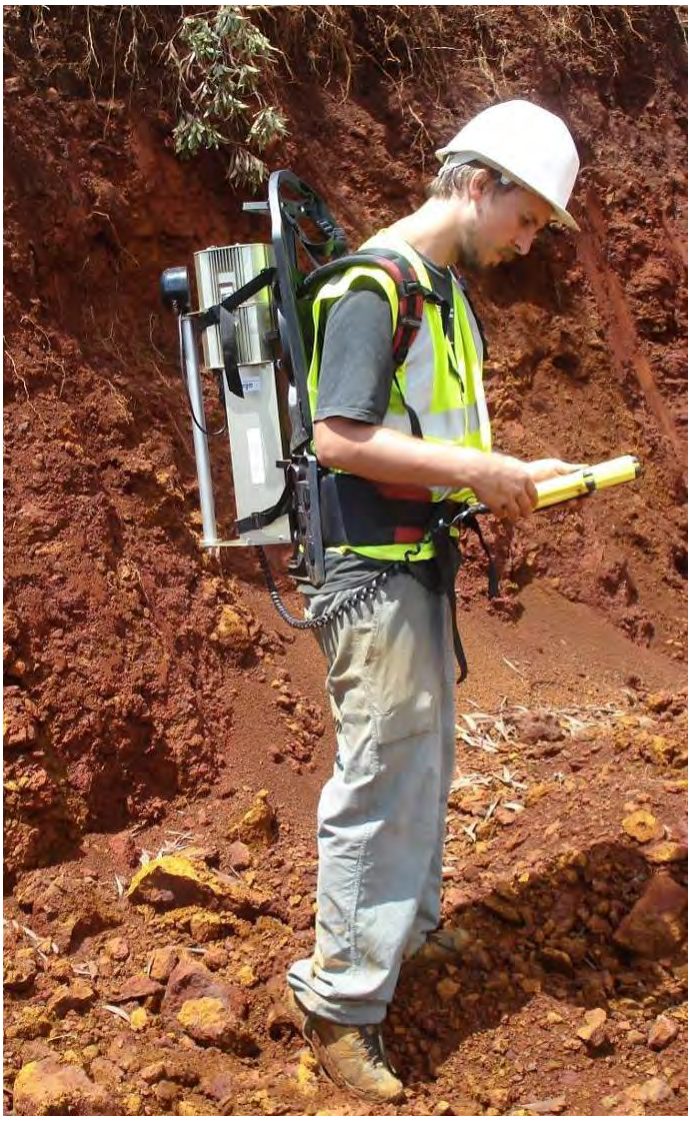


Figure 3 : Spectromètre PGIS21 en opération en Nouvelle-calédonie

Ce spectromètre du rayonnement gamma (voir Figure 4) est équipé d'un détecteur à scintillation cristallin (NaI Tl) de 0,35 litre (21 pouce cubique). Il est couplé à un

système de positionnement GPS Garmin. L'équipement est piloté par un micro-ordinateur de poche sous Windows-CE via différents logiciels permettant de paramétrer le processus de mesure, d'inspecter en temps réel les résultats et de les sauvegarder sur une carte mémoire.

Figure 4 : Spectromètre gamma PGIS21

Cet équipement a été calibré par le constructeur selon les instructions du BRGM et testé. Ces ajustements comportent :

- examen de la résolution du détecteur,
- calibration en énergie,
- vérification du processus de stabilisation automatique,
- calibration de l'effet Compton,
- diagramme de rayonnement,
- détermination de la sensibilité.

Les paramètres de calibration du spectromètre gamma PGIS-21 sont fournis en annexe n°1.

3.2. TRAITEMENTS DES DONNEES

En spectrométrie gamma le rayonnement est enregistré sous la forme d'un histogramme caractérisant le comptage relatif de chaque niveau d'énergie, de 0 à 3 MeV (Figure 5). Avec PGIS 21, la radioactivité naturelle est enregistrée par spectres gamma de 512 canaux déterminés chaque seconde.

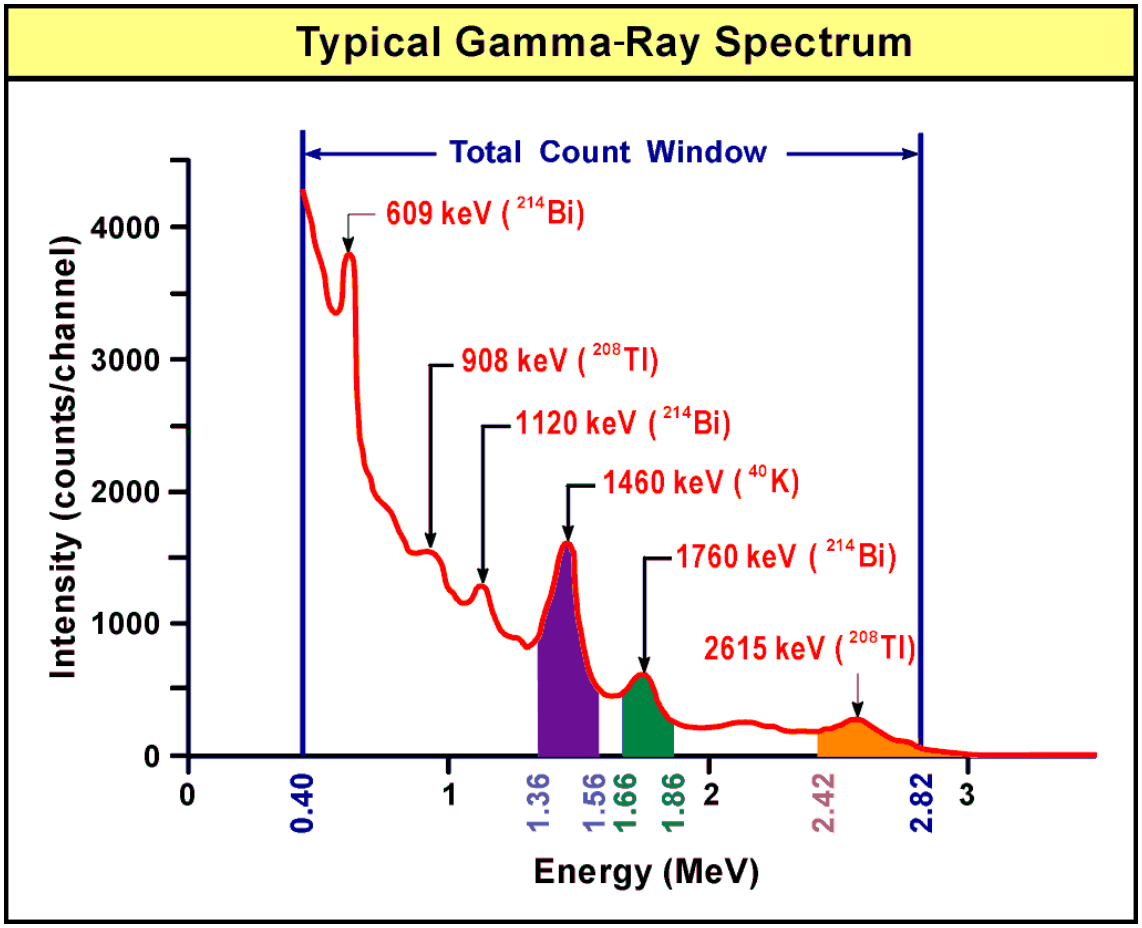


Figure 5 : Exemple d'un spectre typique de rayonnement gamma (Image extraite du site internet « ressources Naturelles Canada » : http://gsc.nrcan.gc.ca/gamma/theory_e.php.

Les spectres sont cumulés selon une constante de temps au choix de l'opérateur. La Figure 6 montre un exemple de spectre acquis au cours du projet. Le traitement des données gamma-spectrométriques a été réalisé selon la méthodologie recommandée par l'IAEA (2003) qui est l'approche standard utilisée actuellement par les opérateurs géophysiques en spectrométrie aéroportée comme au sol.

En cartographie géologique, les raies des trois radioéléments naturels les plus fréquents (potassium, uranium et thorium) sont prises en considération et quantifiées. Selon cette méthodologie de traitement des données, pour accéder aux teneurs en U et Th les intensités de la raie ^{214}Bi à 1760 keV pour l'U et de la raie ^{208}Tl à 2615 keV

pour le Th sont utilisées. Pour le potassium la détermination est directe grâce à l'utilisation de la raie ^{40}K à 1460 keV

Les spectres, calés en énergie grâce à un algorithme d'identification automatique de la raie du thorium (processus d'auto-stabilisation) sont intégrés sur des fenêtres spectrales caractéristiques correspondant à ces trois éléments et au comptage total. Les fenêtres spectrales utilisées sont :

- Comptage total : 410 – 2810 keV,
- Potassium : 1370 – 1570 keV,
- Uranium : 1660 – 1860 keV,
- Thorium : 2410 – 2810 keV.

Les comptages intégrés sont corrigés du bruit de fond Compton, puis convertis en concentration élémentaire (%), pour le potassium, et, en teneurs équivalentes (eppm) pour l'uranium et le thorium. Le comptage total est exprimé en unité de débit de dose absorbée (nano-Gray/heure). Cette conversion met en œuvre les paramètres de sensibilité du détecteur.

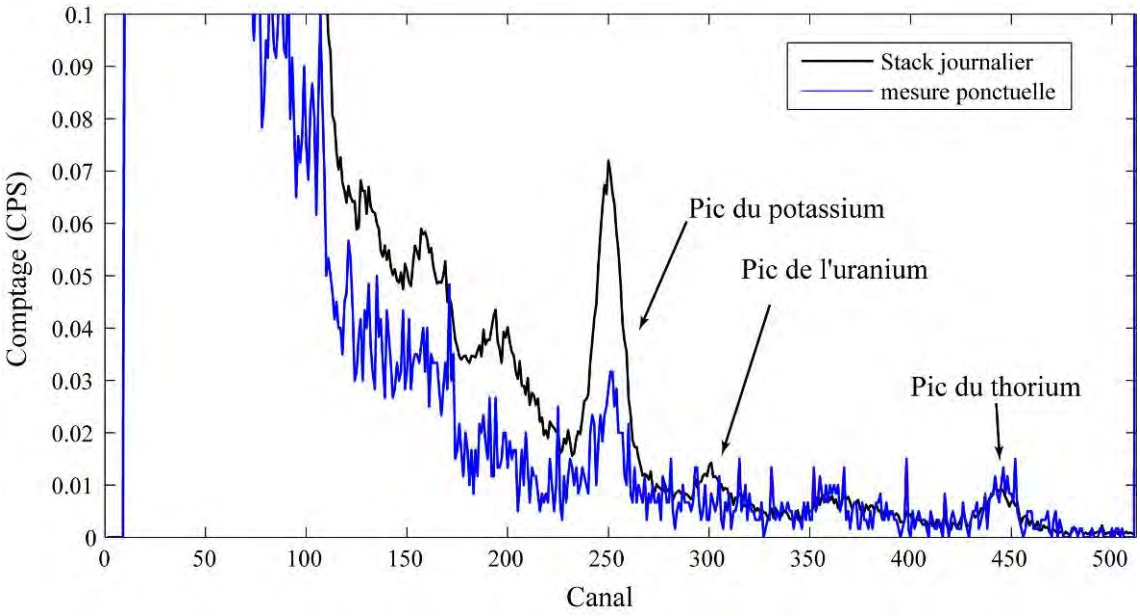


Figure 6 : Exemple de spectre acquis pour le projet

Soulignons que les teneurs de Th et U sont exprimées en équivalent-Th (eTh) et équivalent-U (eU). En effet, l 'évaluation des teneurs en U et Th à partir de l'activité gamma de leurs éléments de filiation (respectivement ^{214}Bi et ^{208}Tl) n'est rigoureusement possible que dans l'hypothèse du respect de l'équilibre séculaire des familles radioactives. Le déséquilibre apparaît lorsqu'un ou plusieurs éléments fils sont enlevés ou concentrés par des processus géochimiques. Ainsi la chaine de désintégration de l'uranium et du thorium produit des isotopes intermédiaires dont la dispersion peut fausser le calcul des teneurs équivalentes. Par exemple, dans la chaine de l'^{238}U et immédiatement avant le ^{214}Bi, du gaz radon est émis et peut se diffuser dans l'atmosphère, ce qui conduit à sous estimer la teneur en uranium.

L'importance de la diffusion du radon est fonction des variations de pression barométrique, de l'humidité ou des précipitations. Des modifications des conditions d'émanation du radon constituent souvent une source importante de perturbation de l'équilibre radioactif de l'uranium.

En raison du phénomène de fluctuation statistique inhérent aux mesures de radiométrie spectrale, la précision des résultats dépend beaucoup du choix du temps d'accumulation. Différents tests ont été faits en début de campagne pour choisir ce paramètre. La figure 7 montre un exemple de l'évolution de la précision des signaux pour le potassium, l'uranium et le thorium en fonction du temps d'accumulation. Il s'agit de données acquises en conditions défavorables, c'est-à-dire correspondant à une station où les concentrations en radioéléments sont très faibles. Les valeurs estimées de la précision relative décroissent d'abord rapidement puis lentement après 300 secondes. Le temps d'accumulation pour chaque station a donc été choisi à 300 secondes et ce à la fois pour optimiser le nombre de mesures et la précision des résultats. Les précisions maximales attendues pour les déterminations de concentrations sont donc de 8,7% pour le potassium, 13,3% pour l'uranium et 14,3% pour le thorium.

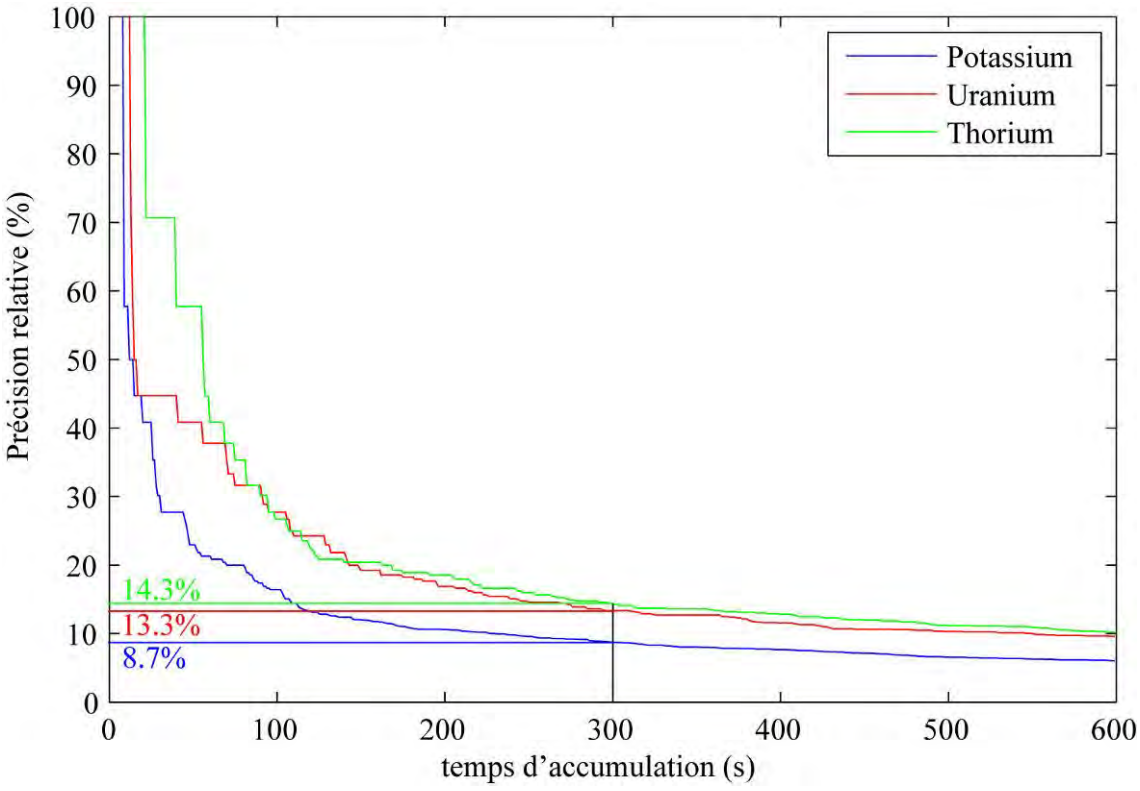


Figure 7 : Evolution de l'estimation de la précision de mesure en potassium, uranium et thorium en fonction du temps d'accumulation.

Afin de s'assurer de l'absence de dérive dans l'acquisition des spectres au cours de la mission, chaque jour l'ensemble des spectres enregistrés a été additionné pour fournir un spectre témoin. Ce spectre a été analysé pour vérifier la stabilité de la position des

pics et la résolution spectrale (largeur normalisée des raies spectrales). La résolution moyenne journalière (Figure 8a) ainsi que la position centrale du pic (Figure 8b) ont été tracés pour la fenêtre d'analyse du potassium. La Figure 8a montre que la résolution varie de 4,7 à 6,1 %. Ces valeurs sont compatibles avec la résolution attendue pour un cristal de type NaI. La position moyenne du pic (Figure 8b) a varié de 0,6 % au cours de la mission, ce qui est très faible. L'enregistrement ne présente pas de dérive significative. Les mesures réalisées lors de la mission peuvent donc être comparées directement entre elles.

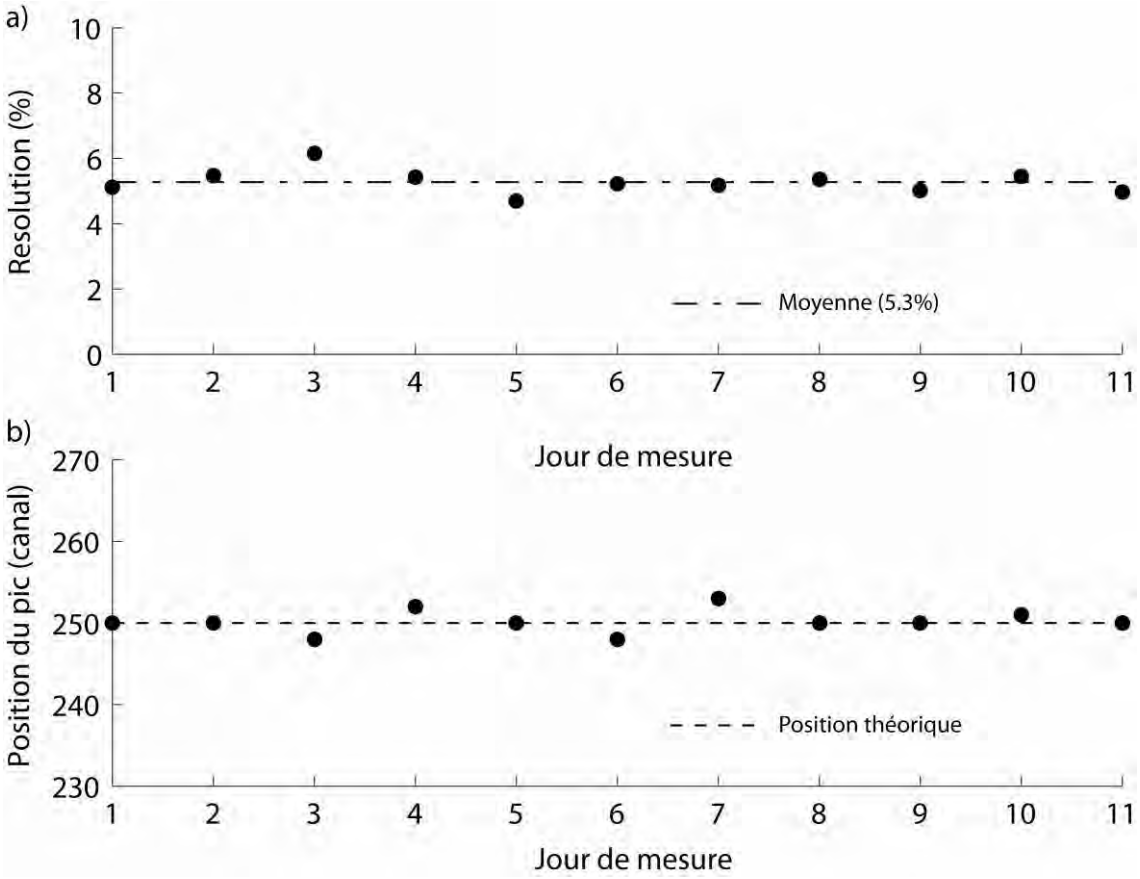


Figure 8 : (a) Evolution de la résolution (a) et de la position du pic (b) des spectres journaliers pour la fenêtre potassium.

3.3. MESURES ACQUISES POUR LE PROJET

Afin de répondre aux différents objectifs du projet, plusieurs sites ont été investigués selon différents modes d'acquisition (voir récapitulatif Tableau 1).

Tableau 1 : Récapitulatif de l'échantillonnage géophysique réalisé.

Lieu	Objectif	Nombre de stations ponctuelles	Distance de profils continus	Observations
Massif du Sud	Mesure filons / encaissant	33		Evaluation du contraste filon / encaissant
Rivière des Pirogues	Modélisation d'une couverture régulière maillée (surface de 0,4 km^2)	134	8 km à pied	6 échantillons de roche pour analyses en géochimie isotopique
Tiébaghi	Evaluation méthodologique des mesures en zone de latérite épaisse et de cuirasse	60	10 km en voiture, 5,4 km à pied	5 échantillons de roche pour analyses en géochimie isotopique
Itinéraire de transfert entre Nouméa et Tiébaghi	*Mesures sur différentes formations géologiques*	*42*	*400 km en voiture, 1 km à pied.*	*Valorisation de l'itinéraire (non prévu au projet)*

Lors de la campagne de terrain, il a été réalisé à la fois des mesures ponctuelles et des relevés linéaires en acquisition continue à raison d'un point de mesure par seconde. Afin d'augmenter le niveau et la précision du signal, les spectres sont additionnés et moyennés:

- toutes les secondes pendant 300 secondes pour les stations ponctuelles,
- au pas de 20 et 60 secondes en fonction de l'objectif pour les profils linéaires en continus.

Le capteur est positionné au droit de l'objet géologique à mesurer à environ 80 cm de hauteur. C'est donc une mesure d'ambiance qui est enregistrée, intéressant un certain volume de roche et non pas une mesure au contact concernant un volume réduit.

Dans le Massif du Sud on s'est attaché à prendre les mesures sur les filons et leur encaissant ultrabasique, le tout, à différents degrés d'altération. Lorsque cela était possible plusieurs stations de mesures ont été réalisées sur des profils complets d'altération.

Dans le secteur de l'embouchure de la Rivière des Pirogues, l'objectif a été, sur un site filonien connu et cartographié précisément (Maurizot, 1993), de modéliser la réponse

spectrale sur une surface par des levés ponctuels et linéaires en acquisition continues, dans un contexte de couverture latéritique modérément épaisse.

Dans le secteur de Tiébaghi, l'objectif a été, sur un site structuré en sillons et rides et reconnues par tomographie de résistivité et sondages, d'évaluer les réponses spectrales, par des levés ponctuels et linéaires en acquisition continues, en contexte de latérite épaisse et cuirassée.

L'objectif final était :
- de constituer une bibliothèque de réponses spectrales qui puisse être organisées dans des matrices telles que lithologie versus altérite, ou filon versus encaissant.
- de modéliser la réponse spectrale sur une surface comportant un champ filonien visible ou masqué sous altérite.

Outre cet ensemble de mesures géophysiques, douze faciès géologiques représentatifs ont été échantillonnés pour effectuer une caractérisation géochimique isotopique. Les coordonnées des points et leurs contextes géologiques sont décris en annexe 2.

4. Résultats acquis

4.1. ENSEMBLE DES MESURES

L'ensemble des mesures, y compris celles enregistrées dans le substrat volcano-sédimentaire, en dehors du contexte ultrabasique, peut être analysé en confrontant deux à deux, par diagrammes binaires, les valeurs des trois éléments radiogéniques (U, Th et K). La figure 9 met en évidence les faibles valeurs radiométriques mesurées en général dans les massifs de péridotites, des valeurs plus importantes pour les filons recoupants qui se différencient parfois nettement de leur encaissant ultrabasique et enfin des valeurs fortes pour les autres formations du substrat volcano-sédimentaire.

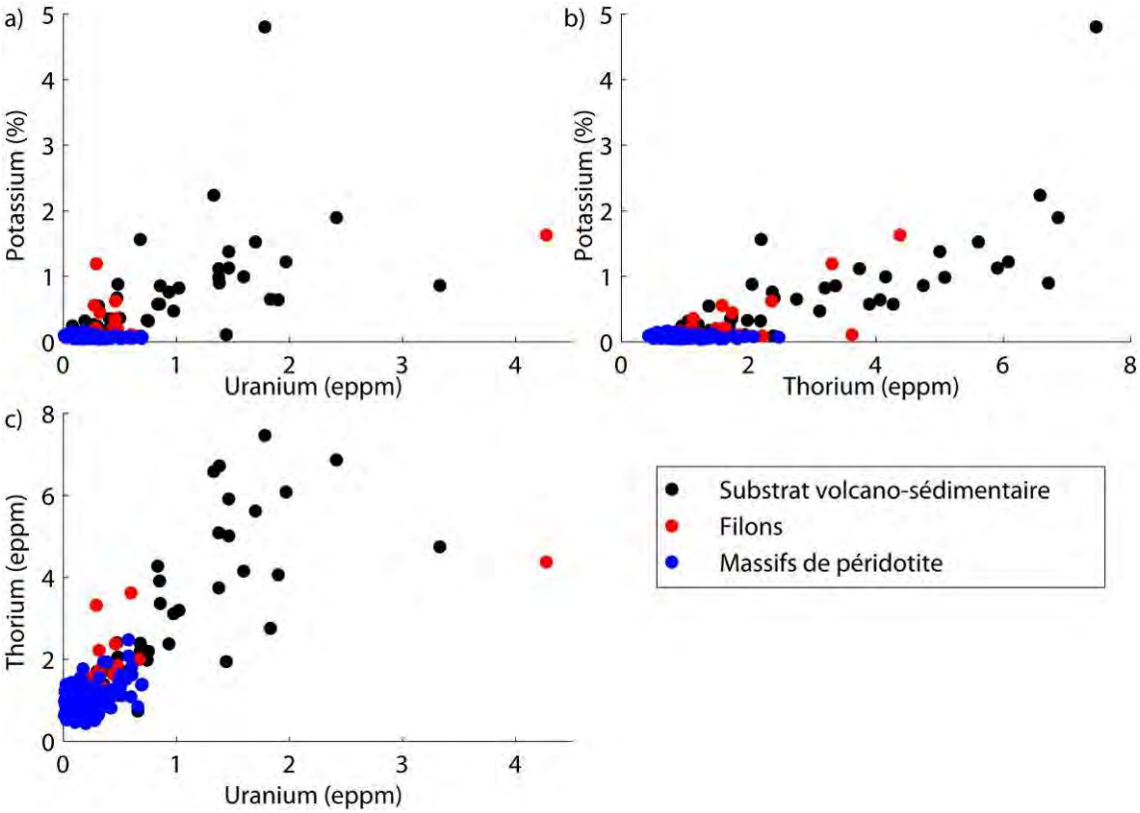


Figure 9 : Diagramme des teneurs de potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour l'ensemble des mesures gammas spectrométriques réalisées en Nouvelle-Calédonie.

4.2. COMPARAISON AVEC LES DONNEES GEOCHIMIQUES

Des échantillons des différents faciès lithologiques et faciès d'altération ont été collectés au cours de la mission. L'analyse par géochimie isotopique de ces échantillons permet d'une part de confronter les concentrations obtenues par les analyses de laboratoire aux mesures fournies par le spectroradiomètre et d'autre part d'étudier l'équilibre séculaire de la chaine de décroissance de l'Uranium ; Cette connaissance permet de valider les déterminations de concentration par gamma-spectrométrie et d'étudier en détail l'intensité de l'altération ainsi que les interactions eau-roche.

4.2.1. Confrontation des teneurs géochimiques et des mesures spectro-radiométriques

La figure 10 présente une comparaison des teneurs U, Th et K mesurées par spectrométrie gamma (en ordonnée) et par analyses géochimiques (en abscisse). Parmi les douze échantillons, les 3 types de faciès prélevés sont distingués : les filons, les faciès mixtes et les latérites. Les teneurs sont très faibles à l'exception de deux échantillons du faciès mixte ; les points des filons ont des teneurs intermédiaires en potassium et thorium. L'échantillon de latérite est totalement déprimé en K et U mais montre un peu de thorium résiduel.

On constate que pour les faibles teneurs géochimiques, les valeurs spectro-radiométriques sont plus élevées. Pour le potassium, au-delà de 0,1 % en géochimie ou spectro-radiométrie, la corrélation est assez bonne. Le comportement pour les faibles concentrations de potassium peut-être relié au seuil de détection du spectro-radiomètre que l'on évalue à 0,07% pour cet élément.

Pour le Thorium, on note un schéma analogue, c'est-à-dire une surestimation par le spectro-radiomètre dans les plages de faibles valeurs géochimiques. L'effet de seuil de détection est moins net mais on observe une grande dispersion pour les teneurs géochimiques inférieures à 0.2 ppm Th. La corrélation est bonne lorsque les teneurs géochimiques augmentent, toutefois elle n'est pas strictement proportionnelle en raison d'un défaut de calibration du spectro-radiomètre ou/et d'un effet de site : en effet le volume de roche contribuant à la mesure spectro-radiométrique (de l'ordre du m^3) est beaucoup plus important que celui de l'échantillon analysé en laboratoire, ce qui peut expliquer une dilution des concentrations déterminées sur le terrain. Par ailleurs il y a probablement un effet de matrice lié à la composition minéralogique des péridotites qui n'est pas pris en compte par la méthodologie de calibration sur blocs de ciment.

Concernant l'Uranium on retrouve le même schéma. Aux critères évoqués ci-dessus s'ajoutent un biais lié aux déséquilibres de la chaine radioactive de l'Uranium, la restitution en teneur équivalente d'Uranium par gamma-spectrométrie étant basée sur la raie du ^{214}Bi, ainsi la sous estimation en radio-spectrométrie du point de concentration géochimique 0.7ppm semble liée à un très fort déséquilibre radioactif (voir paragraphe 4.2.3). Le seuil de mesure en uranium du spectro-radiomètre est de l'ordre de 0.1 ppm. Le faible nombre de mesures avec de fortes teneurs géochimiques et leur dispersion ne permettent pas de qualifier plus précisément la calibration du gamma spectromètre de terrain.

D'une manière générale, dans l'échantillonnage réalisé il y a beaucoup d'échantillons de faibles teneurs (environ 60% des points) pour lesquelles le spectroradiomètre n'est pas assez sensible pour fournir des mesures significatives. Les quelques points de plus fortes teneurs ne sont pas assez nombreux pour établir un réétalonnage in-situ fiable.

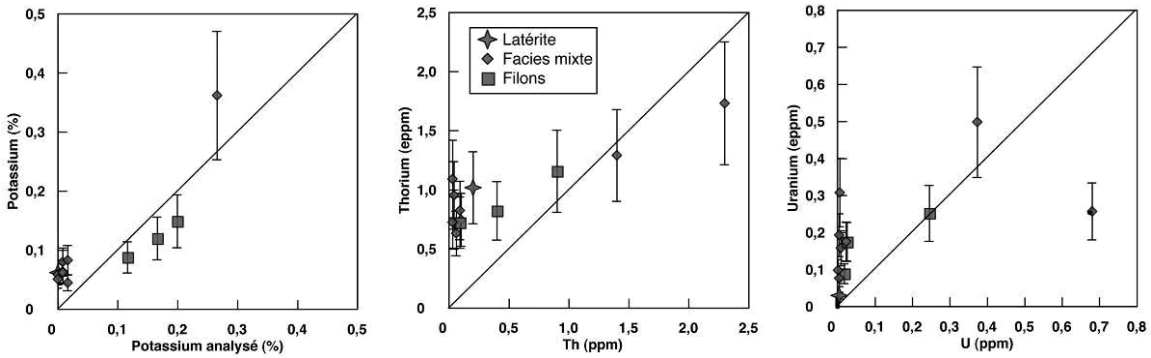


Figure 10 : Confrontation entre les analyses de laboratoire et les mesures gamma spectrométriques de terrain pour le potassium, le thorium et l'uranium.

4.2.2. Les isotopes de l'uranium

Il existe trois chaînes de décroissance radioactive : celle de l'^{238}U, de l'^{235}U et du ^{232}Th. Les trois chaînes aboutissent chacune à un isotope stable du plomb : ^{206}Pb, ^{207}Pb et ^{208}Pb. Cette étude porte sur les radionucléides suivant ^{238}U (4,47 10^9 ans), et l'^{234}U (248 000 ans) de la chaîne de décroissance de l'^{238}U. Les séries de l'uranium présentent l'avantage d'avoir des périodes de demi-vie du même ordre de grandeur que les processus d'altération (de la dizaine de milliers d'années aux millions d'années) et peuvent ainsi être utilisées pour estimer les temps d'interaction eau-roche.

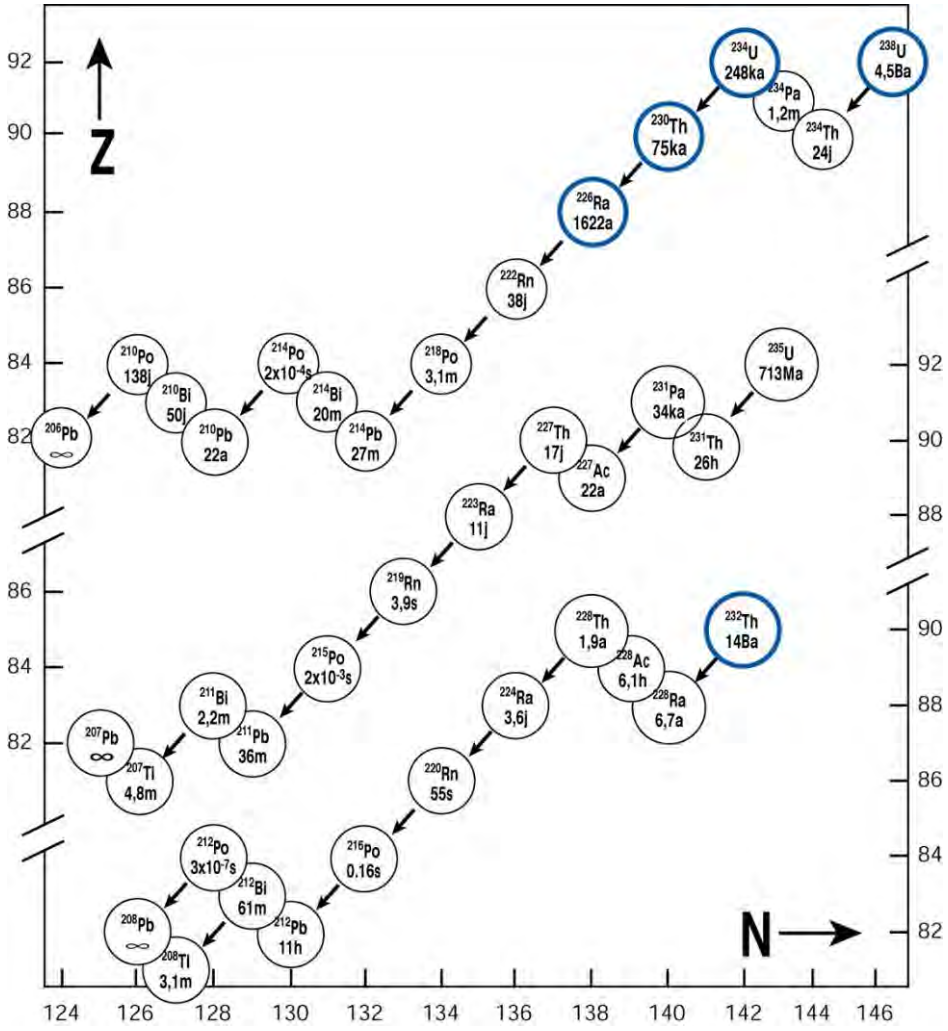


Figure 11: Description des trois chaînes radioactives naturelles représentées dans un diagramme neutron-proton, figure tirée de Allègre, 2005.

4.2.3. Équilibre séculaire et déséquilibre

L'activité A d'un radionucléide N est le produit du nombre d'atomes N de l'isotope par sa constante de désintégration λ. Dans un système resté clos durant un temps significatif (supérieur à 5 fois la période de demi-vie du radionucléide), l'isotope parent (de plus grande période de désintégration) impose son taux de décroissance à l'ensemble de la chaîne. Elle se retrouve dans un état de décroissance stationnaire appelé équilibre séculaire.

L'équilibre séculaire est atteint lorsque les activités des nucléides père et fils sont égales :

$$N_p \lambda_p = N_f \lambda_f$$

Dans ce cas, le taux de production de l'isotope stable final est égal au taux de désintégration du parent initial.

Pour la série de l'^{238}U, si le système évolue en système clos durant un million d'années (environ cinq fois la période de l'^{234}U), l'équilibre séculaire est atteint. Les rapports d'activité sont alors à l'équilibre et (^{234}U/^{238}U) = 1.

Un fractionnement entre l'^{234}U et l'^{238}U peut se produire à l'interface eau-roche. Lors de sa désintégration l'^{238}U émet une particule alpha. Cette émission qui s'accompagne d'une libération d'energie très importante, peut endommager le réseau cristallin et provoquer l'éjection de l'isotope fils hors de son site cristallographique (10 à 20 nm) par effet de recul (comme un canon). Lorsque l'isotope fils est situé en surface à l'interface eau-roche il est alors préférentiellement lessivé par rapport à l'isotope père encore inséré dans le réseau cristallin au cœur des grains de roche.

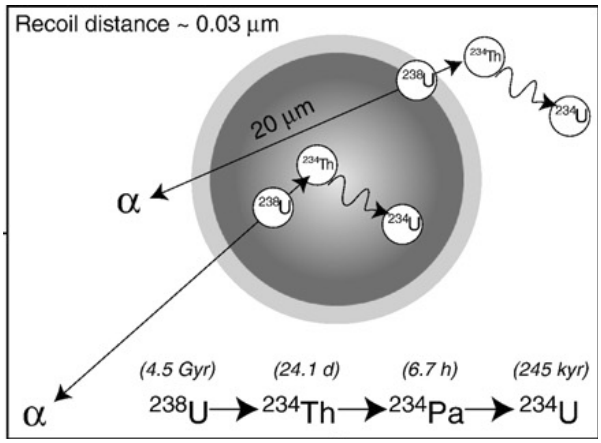


Figure 12 : Effet de recul, figure tirée de Dosseto et al., 2008.

Les rapports d'activité (^{234}U/^{238}U) sont alors :

- < 1 dans la phase solide, c'est-à-dire la phase résiduelle après altération ;
- > 1 dans la phase dissoute des rivières ;
- égal à 1 lorsque la roche est saine donc à l'équilibre.

La figure 13 montre l'évolution des rapports isotopiques de l'uranium en fonction du temps et de la granulométrie (Dosseto et al., 2008).

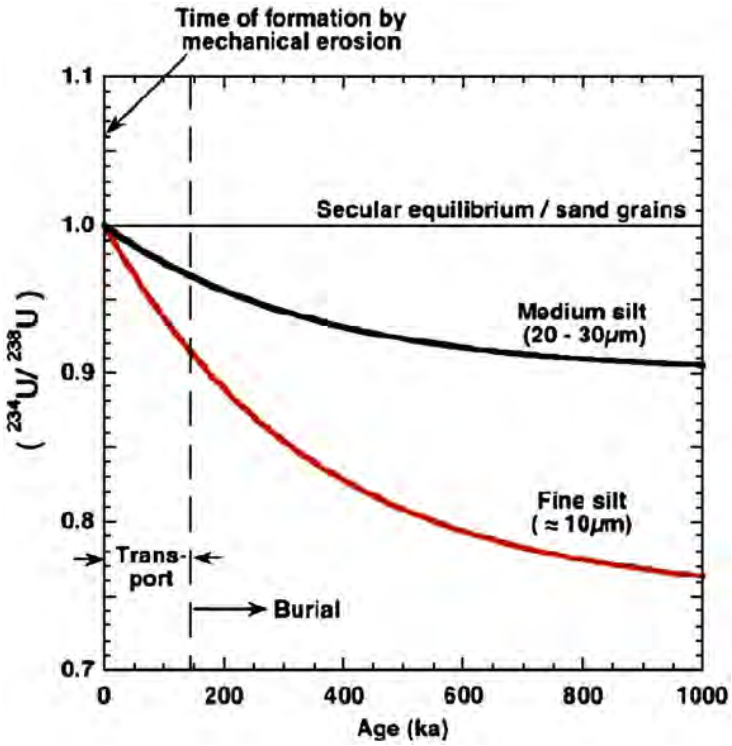


Figure 13 : Variation des rapports isotopiques de l'uranium en fonction du temps et de la granulométrie. Figure tirée de Dosseto et al., 2008.

Durant les phases d'altération, la variation des rapports isotopiques dépend du temps et de la granulométrie des sédiments entre le début du processus. Au-delà d'un million d'année, le sédiment se trouve à l'état stationnaire qui ne dépend que de la taille du grain.

4.2.4. Résultats

Mesures analytiques

Au préalable à la mesure isotopique, il a été procédé à une préparation chimique de l'échantillon de façon à obtenir une quantité purifiée d'uranium. L'uranium est ainsi séparé de sa matrice par chromatographie sur résine échangeuse d'ions. Pour les roches et les sédiments, une étape de mise en solution par attaque acide est nécessaire auparavant.
Au cours de la préparation de l'échantillon, l'apport en uranium lié aux réactifs utilisés et à la manipulation est inférieur à 250 pg. Des corrections de blanc de chimie ont été apportées, les rapports d'activité étant considéré à l'équilibre.
La composition isotopique de l'uranium a été mesurée sur ICP-MS à multi-collection Neptune (ThermoElectron). La mesure de la composition isotopique se fait selon la méthode dite de « standard-bracketing » en normalisant au standard NBS960 afin de corriger du biais de masse instrumental et de sa dérive au cours du temps.
Chaque mesure isotopique est corrigée du « blanc » qui correspond au milieu d'introduction contenant l'échantillon (HNO3 3%) et au bruit de fond instrumental.

Pour chaque échantillon, les erreurs sont données à 2σ (double écart-type). Elle est en moyenne inférieure à 4%. Compte tenu des faibles quantités, les échantillons ont été passés deux fois (deux séquences consécutives).

Présentation des résultats

La figure 14 présente les résultats des analyses ($^{234}U/^{238}U$) des rapports isotopiques de l'uranium en fonction de la concentration dans les échantillons prélevés sur les deux sites Massif de Tiébaghi et Rivière des Pirogues (voir la description géologique en Annexe 2).

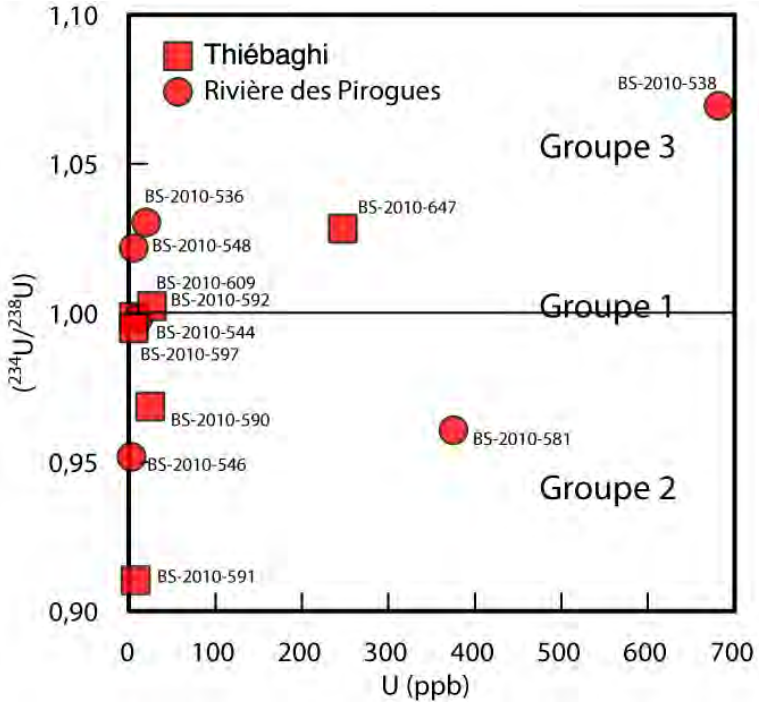


Figure 14 : Rapport isotopique ($^{234}U/^{238}U$) et concentration en Uranium dans les roches et sédiments de Tiébaghi et de la rivière des Pirogues.

On distingue trois groupes de points :

Groupe 1 : les échantillons sont à l'équilibre séculaire ($^{234}U/^{238}U$) = 1, il s'agit des échantillons soit de roche-mère non altérée dont l'âge est, de façon évidente, > 1Ma (dunite ou filon de gabbro) soit des blocs de roche saine au sein du profil d'altération (saprolite riche en garniérite ou latérite). Ces échantillons sont tous très faiblement concentrés en uranium.

Groupe 2 : les échantillons sont appauvris en ^{234}U avec un rapport isotopique ($^{234}U/^{238}U$) < 1. Il s'agit d'échantillons qui ont subi l'effet de recul avec un lessivage préférentiel de l'^{234}U expliquant ainsi cet appauvrissement. Ces rapports s'expliquent

parfaitement bien lorsqu'il s'agit d'alluvions, présence de sédiments produits lors de l'altération (exemple de l'échantillon d'alluvion prélevé sur le site de la rivière des Pirogues dont le rapport ($^{234}U/^{238}U$) = 0,9612±46). Les échantillons les plus appauvris en ^{234}U sont des harzburgites saprolitisées de la rivière des Pirogues, qui montrent une intensité d'altération plus forte, bien observée sur le terrain. Certains échantillons de roche, bien que supposés à l'équilibre, sont tout de même appauvri en ^{234}U. Cela traduit l'intensité de l'altération chimique sous régime tropical qui n'est pas toujours visible sur le terrain (affleurements de pyroxénite de la rivière des Pirogues et de dunite saine à Tiébaghi). L'échantillon de harzburgite serpentinisée présente un fort déséquilibre avec un rapport ($^{234}U/^{238}U$) = 0.9692±176, qui s'explique par la serpentinisation et le régime d'altération. L'ensemble des roches présentent de faibles teneurs en uranium alors que l'échantillon prélevé dans les alluvions est cent fois plus uranifères, dénotant probablement la présence de minéraux lourds porteurs de l'uranium. Il n'est pas possible à ce stade d'identifier les minéraux porteurs de l'uranium avec certitude. Mais il est à envisager que la baddeleyite ou/et la zirconolite, des oxydes de zirconium, soient les porteurs de l'uranium. En effet, ces minéraux ont été observés en association avec des chromites ou des péridotites dans des contextes comparables (Cabella & al., 1997 ; Zaccarinie & al., 2004 ; Rajesh & al,. 2006).

Groupe 3 : les échantillons sont légèrement enrichis en ^{234}U avec un rapport ($^{234}U/^{238}U$) > 1. Pour la plupart le déséquilibre est très faible, il s'agit de filon ou de roche quasi à l'équilibre séculaire. Un échantillon de la rivière des Pirogues est anormalement enrichi en ^{234}U avec une forte concentration en uranium (U=680 ppb), et une valeur ($^{234}U/^{238}U$) = 1,0700±44, il s'agit de latérite colluvionnée de la rivière des Pirogues. Ces valeurs peuvent s'expliquer par un apport de minéraux lourds dans la rivière, suivis de phases de remaniement récent permettant des échanges entre la phase aqueuse (rapport > 1) et la phase solide. Outre ces échanges, l'uranium peut s'adsorber sur la matière organique (ou précipiter par phénomènes d'oxydo-réduction ?), ces phases peuvent alors être enrichies en ^{234}U et présenter des rapports ($^{234}U/^{238}U$) > 1.

Conclusion : L'analyse des rapports isotopiques de l'uranium permet d'évaluer l'état d'altération du système en fonction de l'écart à l'équilibre séculaire. Il apparaît en raison du régime tropical où l'altération chimique est importante, que la roche-mère à l'affleurement présente déjà un faible état de déséquilibre radioactif, indépendamment de son âge ou de la lithologie. Quant aux échantillons prélevés dans des colluvions, ils présentent une trop grande hétérogénéité pour évaluer l'état d'équilibre du système. Afin d'étudier l'intensité de l'altération une étude complémentaire d'un profil carotté serait nécessaire.

En ce qui concerne les minéraux porteurs de l'uranium, bien que l'on remarque un enrichissement très important dans les fractions remaniées, il n'est pour l'instant pas possible d'identifier avec certitude les porteurs sans analyses complémentaires.

4.3. COMPARAISON DES MESURES FILONS VERSUS ENCAISSANT ULTRABASIQUE DANS LE MASSIF DU SUD

4.3.1. Contexte

La comparaison binaire des teneurs en potassium, uranium et thorium des filons par rapport à leur encaissant ultrabasique est illustrée par les diagrammes de la figure 15.

Si l'on compare les roches saines entre elles, les filons se distinguent nettement de leur encaissant, ce dernier étant très appauvri en radioéléments. Ceci est particulièrement sensible pour le potassium et pour le thorium, mais moins systématique pour l'uranium. Dans l'encaissant, la teneur du potassium varie de 0,05 à 0,2 % contre 0,22 à 1,63 % au droit des filons. Pour le thorium, la teneur dans l'encaissant varie de 0,79 à 1,5 eppm contre 1 à 4,27 eppm en filon. Dans l'encaissant, la teneur en uranium varie de 0,012 à 0,48 eppm contre 0,27 à 0,46 eppm au droit des filons. Les teneurs les plus élevés en uranium et thorium ont été mesurées au droit des amphibolites saines. Une valeur anormalement élevée dans les trois éléments est enregistrée dans un filon de granitoïde à quartz biotite (> 4 eppm de U et Th et > 1,5 % de K).

Les teneurs en uranium des filons altérés sont comparables à celles des filons sains (0,17 à 0,67 eppm). Les teneurs en thorium des filons sains et altérés sont également comparables (0,59 à 4,37 eppm). Par contre la teneur en potassium des filons altérés est systématiquement très faible (0,07 à 0,11%), cet élément étant donc lessivé.

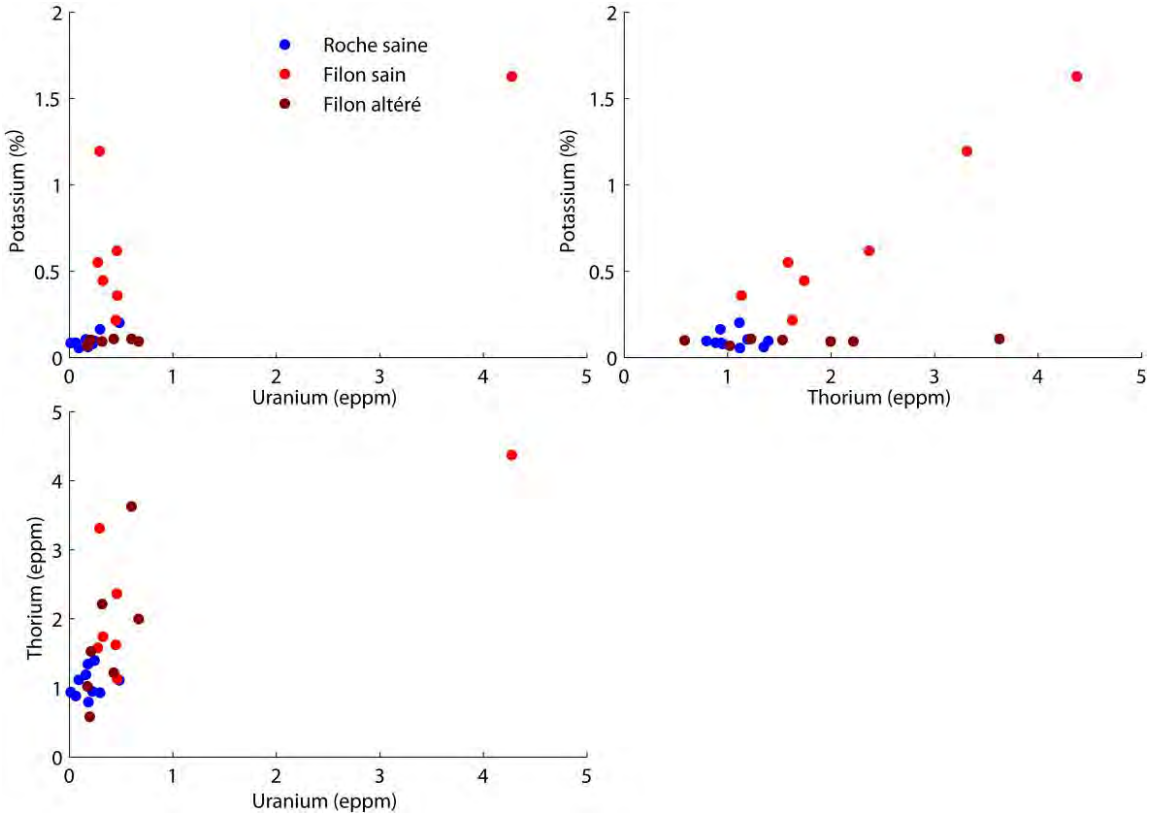


Figure 15 : Comportement du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les filons sains (points rouges), les filons altérés (points grenats) et la roche encaissante saine (points bleus)

4.3.2. Caractérisation des péridotites

Différentes mesures gamma spectrométriques ont été réalisées au droit de différents types de péridotites que l'on retrouve dans le massif du sud. Les roches sondées sont des harzburgites, des wehrlites, des amphibolites et des dunites. Les mesures sont récapitulées dans le Tableau 2. Une analyse graphique est proposée sous forme d'un diagramme ternaire figure 12.

Tableau 2 : Mesures gamma spectromètriques réalisées au droit des péridotites dans le massif du sud.

Géologie	Potassium (%)	Uranium (eppm)	Thorium (eppm)	Dose Totale (nGray/h)
Harzburgite saine	0.08	0.22	0.95	4.81
Harzburgite très saine	0.17	0.29	0.93	6.26
Wehrlite	0.09	0.06	0.88	3.85
Amphibolite saine	0.20	0.48	1.11	8.28
Dunite chromifère saine.	0.08	0.01	0.94	3.71
Dunite	0.11	0.16	1.19	5.44

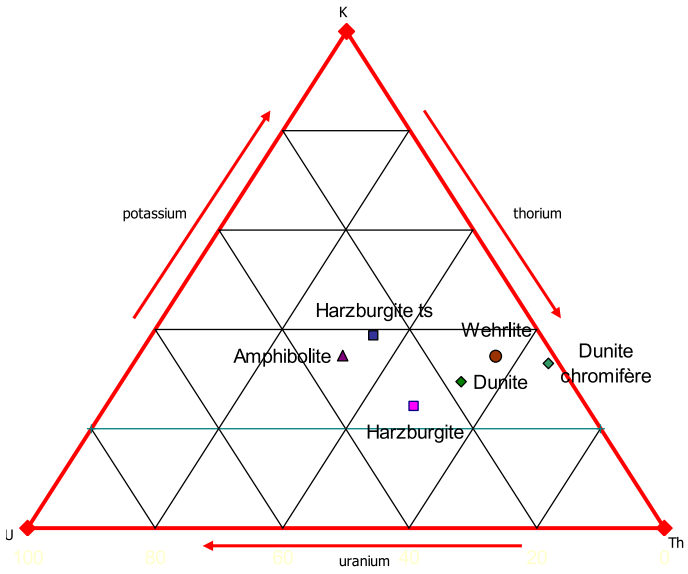


Figure 16 : Diagramme ternaire des concentrations relatives en potassium, uranium, thorium des péridotites du massif du sud

L'amphibolite saine montre la plus forte réponse radiogénique à la fois pour les trois éléments mesurés. Les valeurs en potassium sont très faibles pour les péridotites, la teneur maximum étant de 0,2% pour l'amphibolite saine. Les variations de teneur en uranium et thorium apparaissent utiles à différencier les lithologies avec une diminution du rapport U/Th depuis le pôle amphibolite jusqu'au pôle dunite chromifère, via harzburgite, dunite, wehrlite. La dynamique pour l'uranium est importante mais les teneurs restent très faibles, ce qui rend les caractérisations radiométriques très difficiles à réaliser avec précision.

4.4. SITE DE LA RIVIERE DES PIROGUES

4.4.1. Géologie

Cette zone, où le réseau filonien est associé à une minéralisation en platine, a fait l'objet d'une cartographie détaillée (Maurizot, 1993). La couverture latéritique y est moyennement importante, avec des profils pouvant atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur. Le profil général est cependant incomplet puisqu'il n'y a pas de cuirasse sommitale. L'encaissant est essentiellement dunitique avec quelques passées wehrlitiques. Ce substrat non altéré apparaît au sein de ravines naturelles (lavakas) échancrées dans la couverture latéritique. L'abondant réseau filonien est de composition pyroxénitique et gabbroïque avec souvent ces deux lithologies associées dans un même filon : pyroxènite aux épontes, gabbros pegmatoïde souvent folié au centre.

Les filons les plus larges sont de dimensions métriques à décamétriques. La direction principale des filons est E-W, à pendage vertical ou fort vers le Nord. On relève une direction secondaire N 20° à N 45° à pendages verticaux, correspondant à des filons d'épaisseur plus modeste, centimétrique à décimétrique. Ces deux familles

s'interpénètrent et sont donc contemporaines. Les filons de pyroxénite sont nombreux, en moyenne un tous les dix à vingt mètres. On peut supposer a priori que leur contenu radiogénique y est très déprimé et que la réponse spectrale sera faible. Les filons de composition gabbroïque sont plus épars mais plus larges. On en compte cinq à six, espacés d'une centaine de mètres. On peut espérer une réponse spectrale plus significative sur ces objets. Il n'y a pas de filons de type granitoïde.

Cette situation est très représentative de l'ensemble filonien dans les massifs de péridotites qui sont majoritairement composés de roches de compositions gabbroïques à felsiques, beaucoup plus rarement granitoïdes.

4.4.2. Mesures radiométriques

Au total, il a été réalisé 134 stations de mesures et 8 km de profils linéaires en acquisition continue. Les points de mesures sont localisés sur la figure 17.

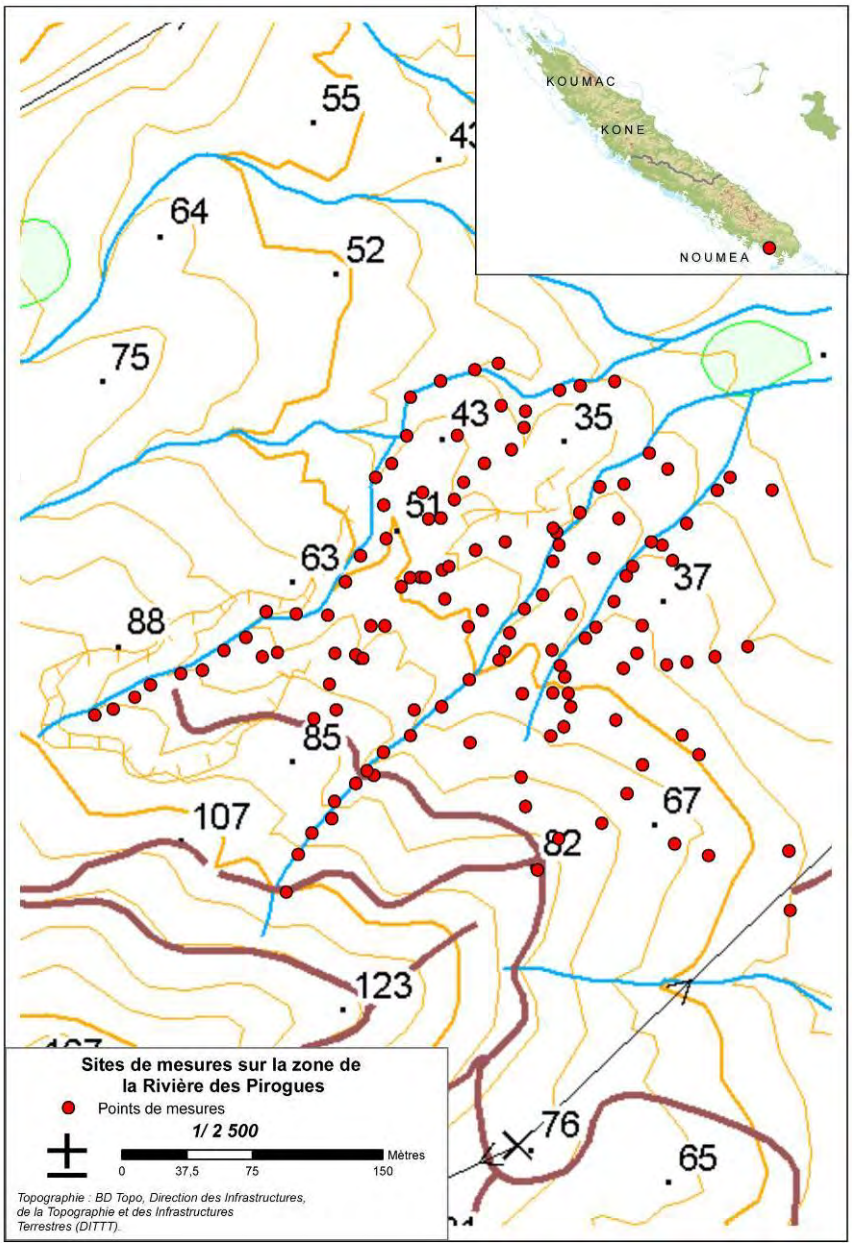


Figure 17 : Répartition de l'échantillonnage sur le site de la Rivière des Pirogues.

4.4.3. Analyse des mesures en station

Pour les mesures acquises en mode station, la comparaison binaire des teneurs en potassium, uranium et thorium pour les différents types de lithologie et pour l'ensemble des points du secteur est présentée dans les diagrammes de la figure 18

Ces diagrammes montrent :

- De faibles teneurs d'ensemble en potassium pour les différentes lithologies (de 0,05 à 0,1 %) avec cependant des teneurs plus élevées mais toujours faibles en valeur absolue pour les gabbros.

- Un enrichissement relatif des latérites en uranium et thorium.

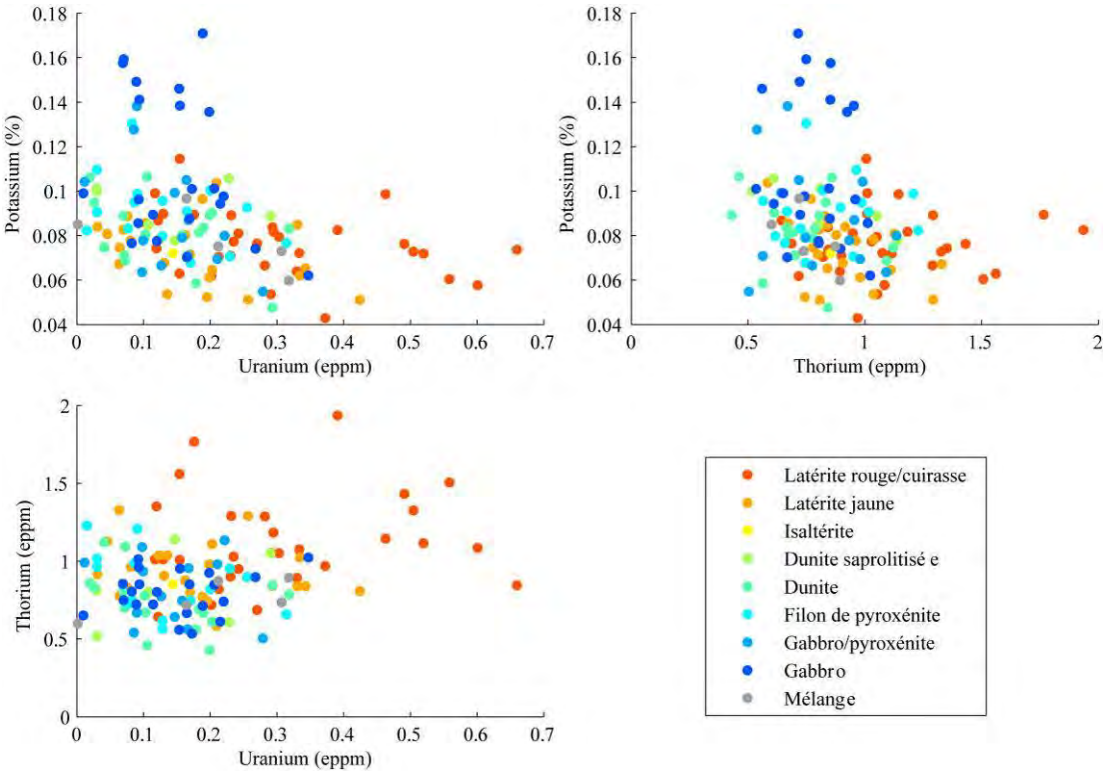


Figure 18 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sur le site de la Rivière des Pirogues.

Ces tendances peuvent être confirmées et mieux appréhendées en utilisant les paramètres statistiques par groupe lithologique. La moyenne, l'écart type et le nombre de mesures sont récapitulés dans le tableau 3 pour chaque lithologie concernée. Les résultats sont montrés sous forme de graphiques binaires en figure 19 où les ellipses représentent la dispersion des mesures à un demi-écart type.

On retrouve les faits marquant suivants:

- Des teneurs moyennes en potassium déprimées pour tous les types de lithologies.

- Des teneurs très légèrement supérieures en potassium pour les filons sains par rapport à leur encaissant (0,09 à 0,11% pour les filons et 0,08% pour l'encaissant).

- Une nette tendance à la diminution des teneurs en potassium en fonction du degré d'altération, cet élément étant donc lessivé.

- De faibles teneurs moyennes en uranium et thorium (valeurs comprises entre 0,13 à 0,15 ppm pour l'uranium et 0,75 à 0,85 ppm pour le thorium) pour les filons sains qui sont dans la même gamme que celle mesurée sur l'encaissant sain.

- Des teneurs en uranium et thorium enrichies relativement dans les altérites par rapport au substrat sain.

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres statistiques (moy : moyenne ; std : écart type) pour les différentes lithologies mesurées sur le site de la rivière des Pirogues.

Lithologie	K_{moy} (%)	K_{std}	U_{moy} (eppm)	U_{std}	Th_{moy} (eppm)	Th_{std}	Nombre de mesures
latérite rouge/cuirasse	0,08	0,01	0,31	0,15	1,11	0,30	31
latérite jaune	0,07	0,01	0,17	0,11	0,92	0,18	23
Isaltérite	0,07		0,14		0,85		1
Dunite saprolitisée	0,09	0,01	0,14	0,11	0,82	0,24	6
Dunite	0,08	0,02	0,14	0,09	0,74	0,19	17
Filon de pyroxénite	0,09	0,02	0,13	0,09	0,85	0,20	15
Gabbro/pyroxénite	0,09	0,02	0,14	0,07	0,80	0,21	14
Gabbro	0,11	0,03	0,15	0,08	0,79	0,14	22
Mélange	0,08	0,01	0,20	0,13	0,76	0,12	5

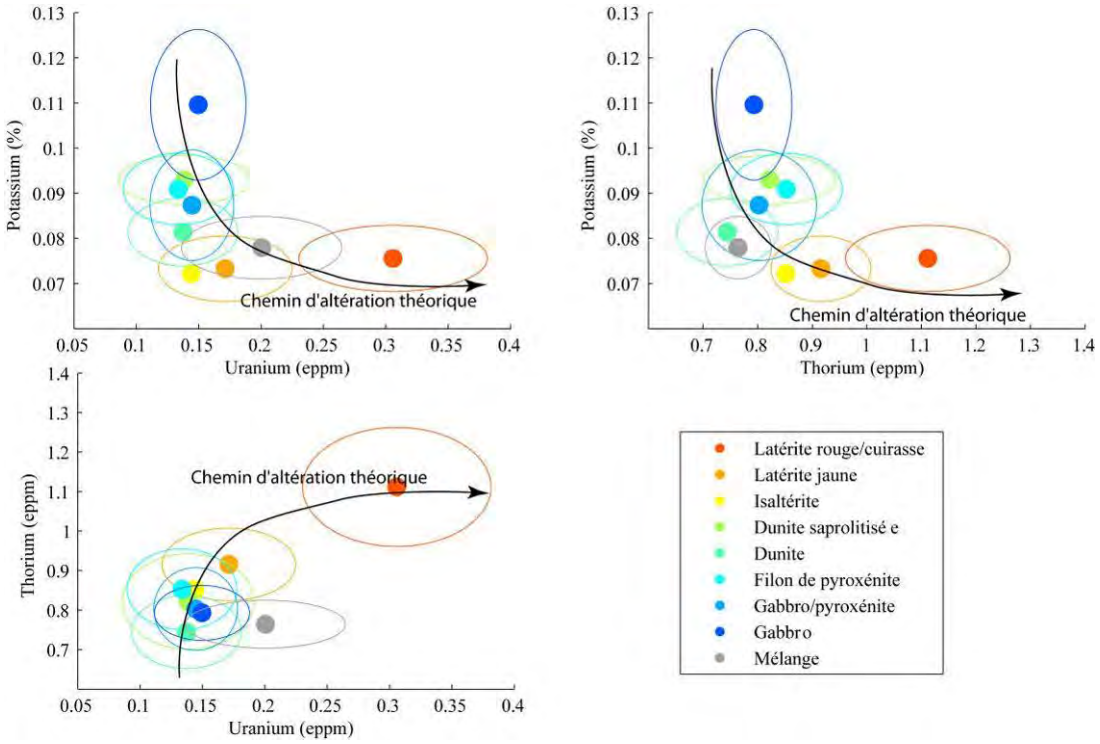


Figure 19 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sur le site de la rivière des pirogues (les ellipses ont un rayon égal à un demi écart type)..

4.4.4. Modélisation cartographique

Les points acquis en mode station ont permis de réaliser des grilles de valeurs radiométriques du site de la rivière des pirogues pour les trois éléments radiogéniques que l'on peut comparer à la carte géologique (figure 20). Les grilles ont été maillées au pas de 8 mètres avec un interpolateur de type courbure minimum.

Pour le potassium (figure 21), le passage des principaux filons de gabbros affleurant en fond de lavaka sont marqués. En revanche les replats latéritiques sont appauvris en cet élément et les filons sont là masqués.

Pour l'uranium (figure 22) et le thorium (figure 23), ce sont les principales zones latéritiques qui sont marquées par de plus fortes concentrations. Mais la trace des filons sous masque latéritique n'apparaît pas. La structuration du réseau filonien ne ressort pas sous la couverture latéritique.

Enfin la figure 24 présente une combinaison ternaire des trois radioéléments. Les zones où le potassium est majoritaire apparaissent en rouge. Ce sont les principales zones de filons. Les zones appauvries en radioéléments ont des couleurs pâles et correspondent aux mesures réalisées à l'intérieur des Lavakas. Enfin, les plateaux latéritiques ont des couleurs vives qui se situent entre le vert et le bleu, en raison de concentrations plus fortes en thorium et uranium.

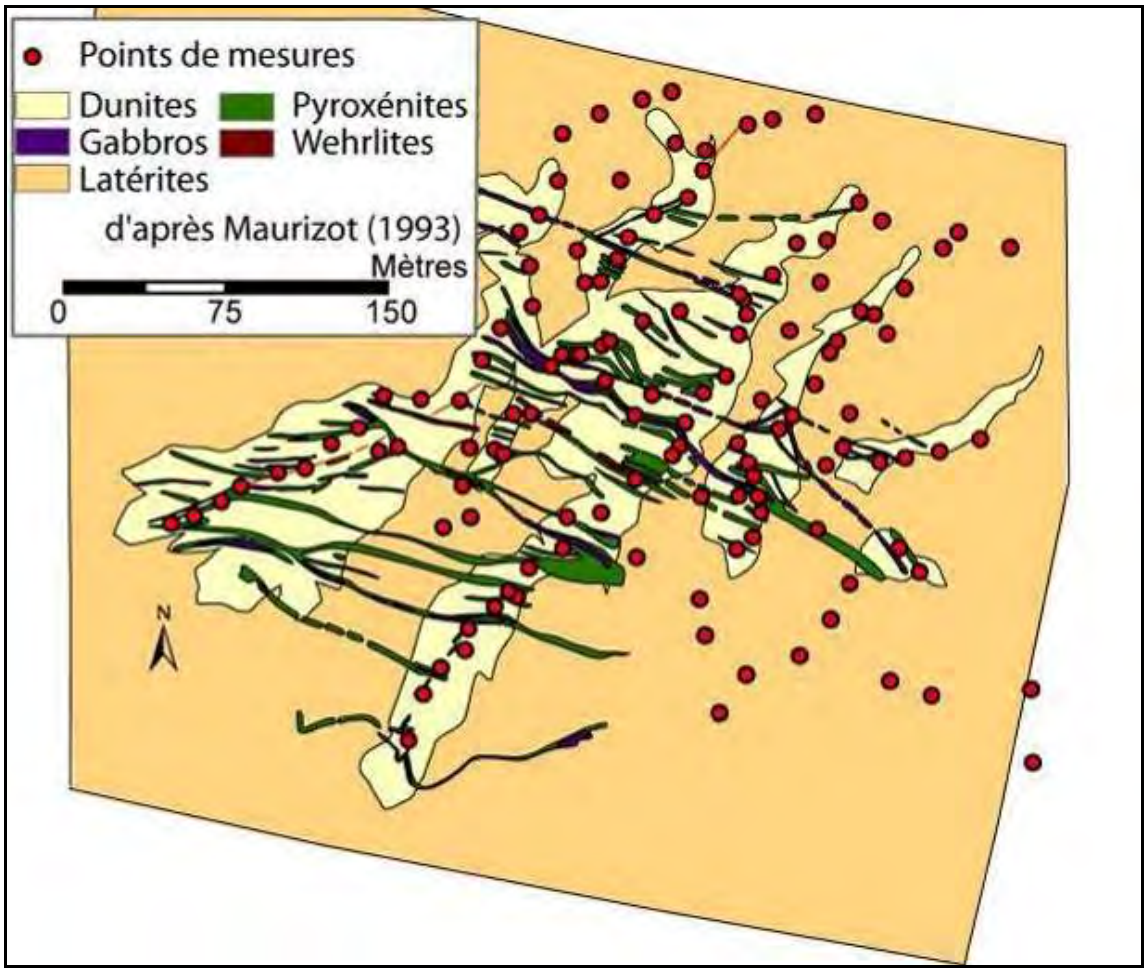


Figure 20 : Carte géologique du site de la Rivière des Pirogues (Maurizot, 1993).

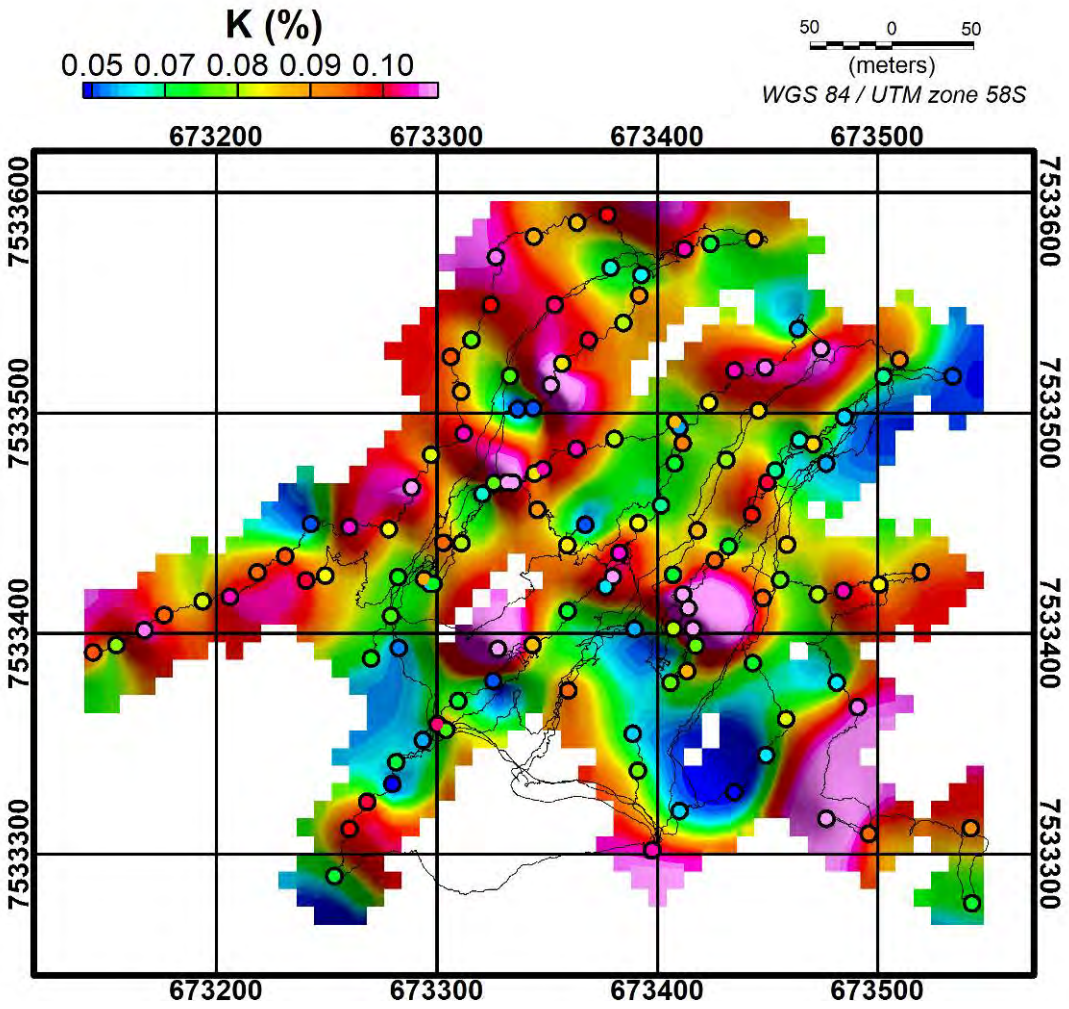


Figure 21 : Carte radiométrique du potassium du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition

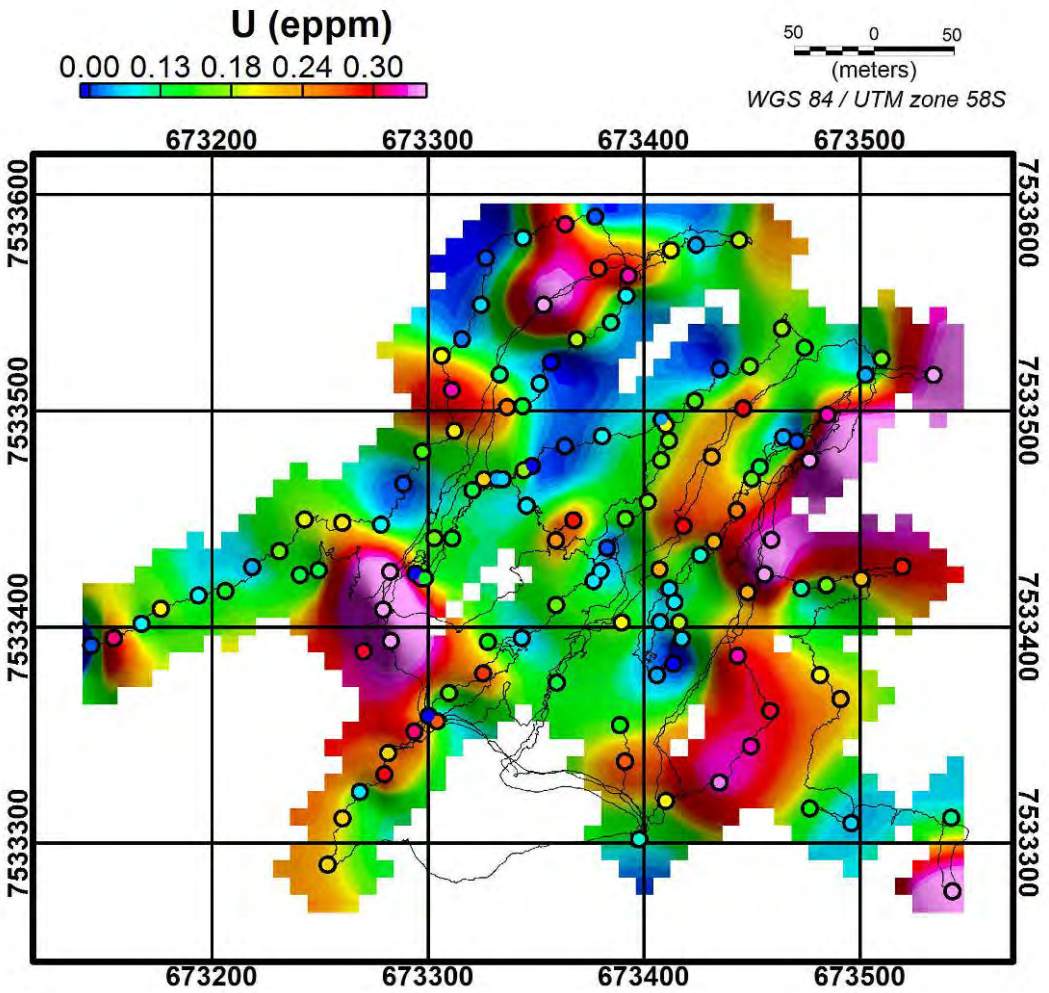


Figure 22 : Carte radiométrique de l'uranium du site de la Rivière des Pirogues. . Les points représentes les stations d'acquisition

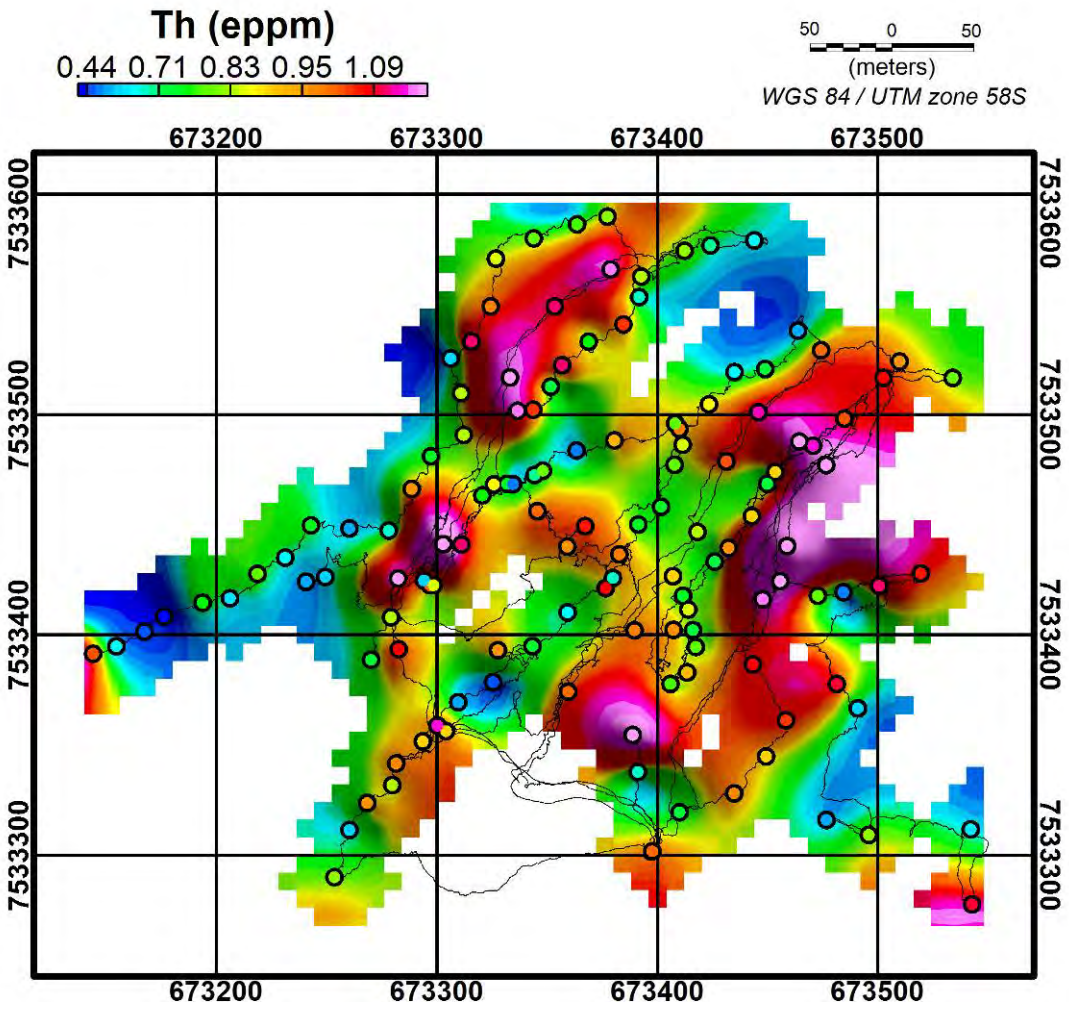


Figure 23 : Carte radiométrique du thorium du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition

.

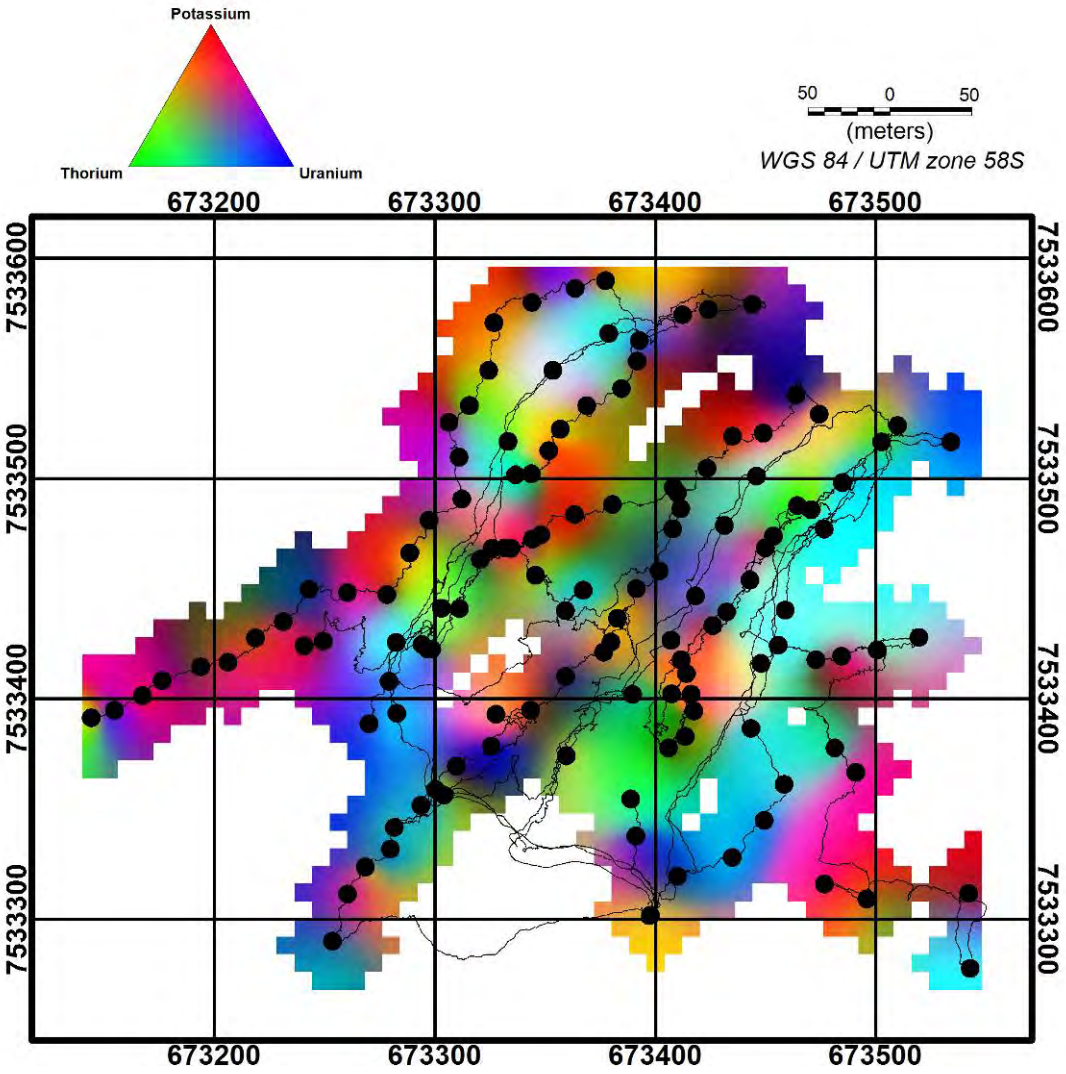


Figure 24 : Carte radiométrique ternaire du site de la Rivière des Pirogues. Les points représentes les stations d'acquisition

4.4.5. Transposition à une acquisition aéroportée

En radiométrie spectrale, avec certaines configurations instrumentales, le bruit statistique de mesure peut devenir prépondérant et dégrader significativement les résultats jusqu'à rendre inopérante la méthode. Cela peut être facilement le cas en mise en œuvre aéroportée, en particulier en contexte faiblement radiogénique, en raison d'altitude de vol (garde au sol) trop importante, d'un volume de détecteur trop faible, compte-tenu d'un temps d'accumulation imposé (1 seconde) afin de ne pas dégrader la résolution spatiale.

Nous nous proposons d'étudier l'influence de différents paramètres d'acquisition sur le bruit de mesures radiométriques aéroportées en contexte de Nouvelle-Calédonie. L'approche théorique développée ici néglige l'effet lié aux variations du volume d'investigation (changement d'empreinte au sol) face à un milieu hétérogène. Ce propos sera illustré avec le résultat de simulations numériques d'acquisition géophysique héliportée calculées à partir des mesures au sol enregistrées sur le site de la Rivière des Pirogues.

Le comptage théorique enregistré avec un détecteur NaI de volume V (en litres) ayant une sensibilité volumique So (en cps / cc unit / litre) face à un sol ayant une concentration C en émetteurs gamma s'exprime par la relation suivante (IAEA, 1979) :

$$No = C * So * V \qquad (1)$$

En aéroportée, avec une garde au sol H, selon la loi d'atténuation, cette mesure peut-être formulée par :

$$N_h = N_o * e^{-\mu * H} \qquad (2)$$

μ coefficient d'absorption par l'air

On utilise souvent la notation $A_t = e^{-\mu}$, coefficient d'atténuation.

$$N_h = C * S_o * V * A_t^H = C * S_h * V \qquad (3)$$

S_h, sensibilité à l'altitude H s'exprime conformément à la loi d'atténuation

$$S_h = S_o * A_t^H$$

La fluctuation gaussienne sur les comptages mesurés s'exprime :

$$Bcps = \sqrt{N_h} = C^{0.5} * S_o^{0.5} * V^{0.5} * A_t^{H/2}$$

Selon la formule 3 qui relie le comptage à la concentration, ce bruit peut être converti en unité de concentration:

$$Bcc = C^{0.5} * S_o^{-0..5} * V^{-0.5} * A_t^{-H/2}$$

Avec C : concentration sol, S : sensibilité du capteur (Cps/ccUnit/l), V : volume du capteur (L), A_t : coefficient d'atténuation du rayonnement gamma dans l'air et H : garde au sol simulée (m).

Tableau 4 : Coefficient de sensibilité et d'atténuation d'un système aéroporté pour des cristaux de type NaI

Coefficients	*Atténuation (At)*	*Sensibilité (S) (Cps/ccUnit/l)*
CT (nGy/h)	0,9927	1,56
K (%)	0,9909	5,9
Eq.U (ppm)	0,9917	0,58
Eq.Th (ppm)	0,9931	0,29

Pour un cristal de type NaI, le tableau 4 donne les valeurs standards des coefficients d'atténuations et de sensibilités d'un système aéroporté.

Le volume standard des détecteurs NaI utilisés en aéroportée est contraint par la taille des cristaux unitaires (256 cubic inch = 4.2 litre), conditionnés par pack de 4 cristaux = 16.8 l. Ainsi les dispositifs utilisent 1 ou 2 packs = 16,8 ou 33,6 l en configuration héliportée et des volumes plus importants de 2, 2,5 ou 3 packs (33,6 ; 42,0 ou 50,4 litres) en configuration aéroportée avion. La limitation est imposée non pas par le volume, mais par le poids des détecteurs : 150 kg / pack.

En radiométrie aéroportée , l'altitude de vol est choisie prioritairement en fonction des critères de relief et des installations au sol afin de satisfaire aux règles de sécurité demandées par l'aviation civile lors de l'instruction du dossier de dérogation de vol rasant. Les capacités du porteur (en particulier portance et taux de montée) entrent en ligne de compte : en hélicoptère une garde au sol réduite à 50 m peut être envisageable, mais nécessite alors l'utilisation d'un appareil puissant (bi-turbine) plus coûteux à mettre en œuvre. En vol couplé EM avec un dispositif suspendu en nacelle, la garde au sol (cristaux dans l'hélicoptère) est de facto augmentée de la suspente, le minimum est alors d'environ 80 m.

Pour étudier les différentes options d'acquisition aéroportée, trois simulations sont proposées :

- La première (figure 25) correspond à une acquisition couplée EM – gamma spectrométrie standard (garde au sol 100 m, petit détecteur de 16,8 l).
- La deuxième simulation (figure 26) correspond à une acquisition couplée EM – gamma spectrométrie optimisée (garde au sol 80 m, 33,6 l de détecteur). Augmenter la taille de détecteur en dispositif couplé EM peut se révéler très pénalisant car l'augmentation de la charge embarquée se fait alors au détriment de l'autonomie (moins de carburant embarqué). Cette configuration, un peu moins réaliste, est proposée car elle donne une réponse équivalente à celle obtenue avec un temps d'intégration augmenté à 2 s. Ce paramétrage associé à une vitesse de vol réduite (72 km/h = 20 m/s) donne encore une résolution spatiale correcte (40 m).
- Enfin, la dernière simulation (figure 27) correspond à une acquisition gamma spectrométrique seule, optimisée pour un contexte faiblement radiogénique par l'utilisation d'un très gros détecteur (50,4l) opéré à très faible altitude (50 m).

Les résultats de simulation sont présentés en comparaison des grilles des mesures obtenues au sol (colonne de gauche).
Les simulations illustrent l'amélioration de la résolution des contrastes radiométriques avec l'augmentation du volume du capteur et la diminution de la garde au sol.

Ceci est crucial pour le canal potassium pour lequel il sera difficile avec l'aéroportée de rendre compte des très faibles contrastes rencontrés dans ce contexte de très faibles teneurs. En effet seule la troisième simulation (50,4 l opéré à 50 m) donne une carte potassium conforme à la référence au sol. Avec les paramètres de la première simulation, la carte apparaît inexploitable et le bruit reste encore prépondérant pour la deuxième simulation.

Pour l'uranium et le thorium, les simulations ne donnent pas de cartes aussi dégradées que pour le potassium. Le signal aéroporté reste exploitable avec un paramétrage de l'acquisition tel que celui de la première simulation (16,8 l – 100 m).

L'espacement entre lignes de vol n'est pas pris en compte lors de ces simulations. Il n'intervient pas sur le pouvoir de détection de la méthode, mais doit être adapté en fonction de la taille des objets à étudier pour permettre une restitution optimum de la complexité géologique en carte. Pour ce choix il faut également considérer que l'altitude de vol modifie sensiblement l'empreinte au sol de la mesure. Avec une garde au sol de 80-100 m, le rayon d'investigation est de l'ordre de 125 m. Un espacement de 250 m permet donc une investigation complète de toute la surface au sol, mais il faut souligner que ce paramètre a une très forte incidence sur le coût du lever.

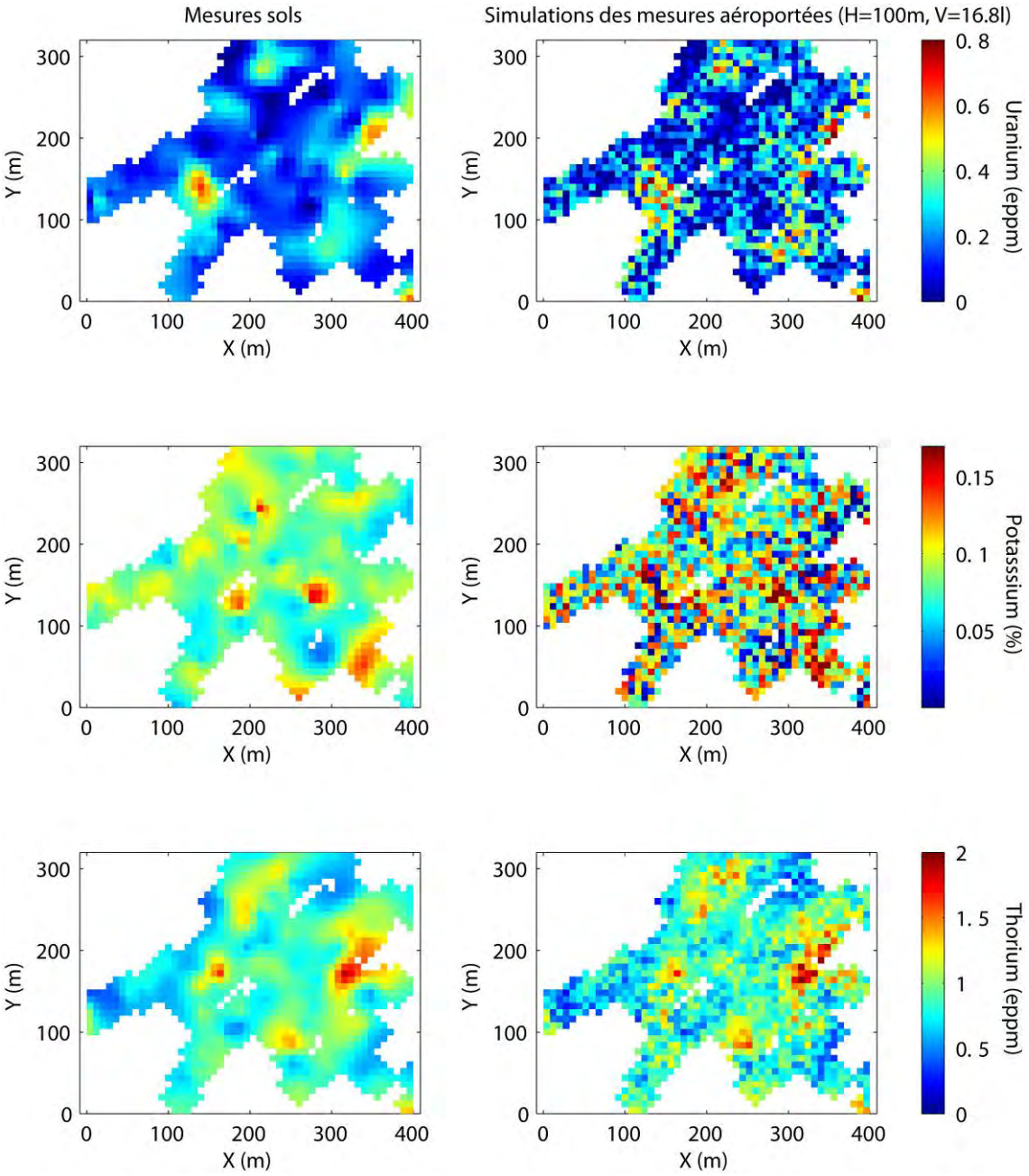


Figure 25 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 100 m de hauteur pour un volume de capteur de 16,8 l.

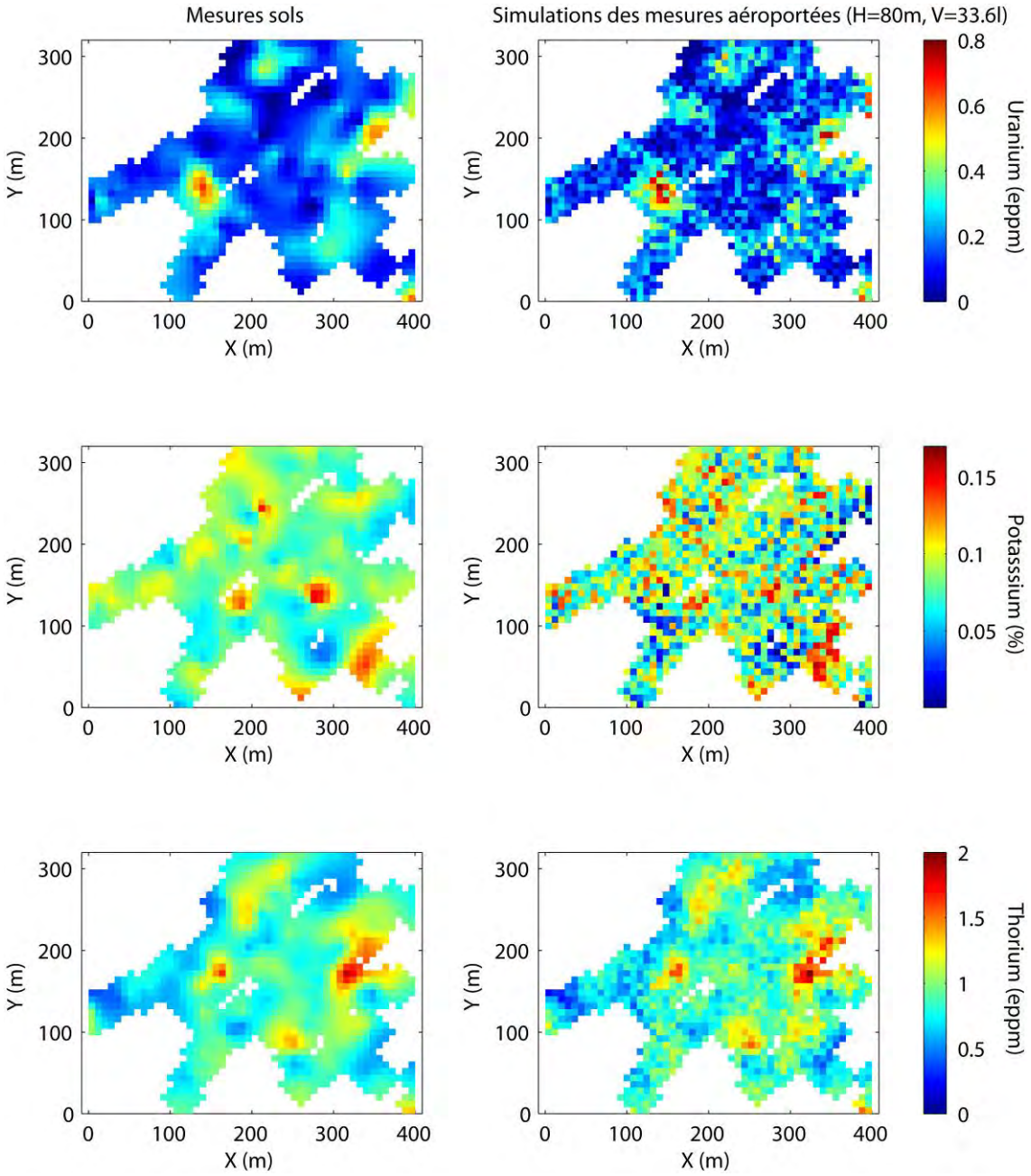


Figure 26 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 80 m de hauteur pour un volume de capteur de 33,6 l.

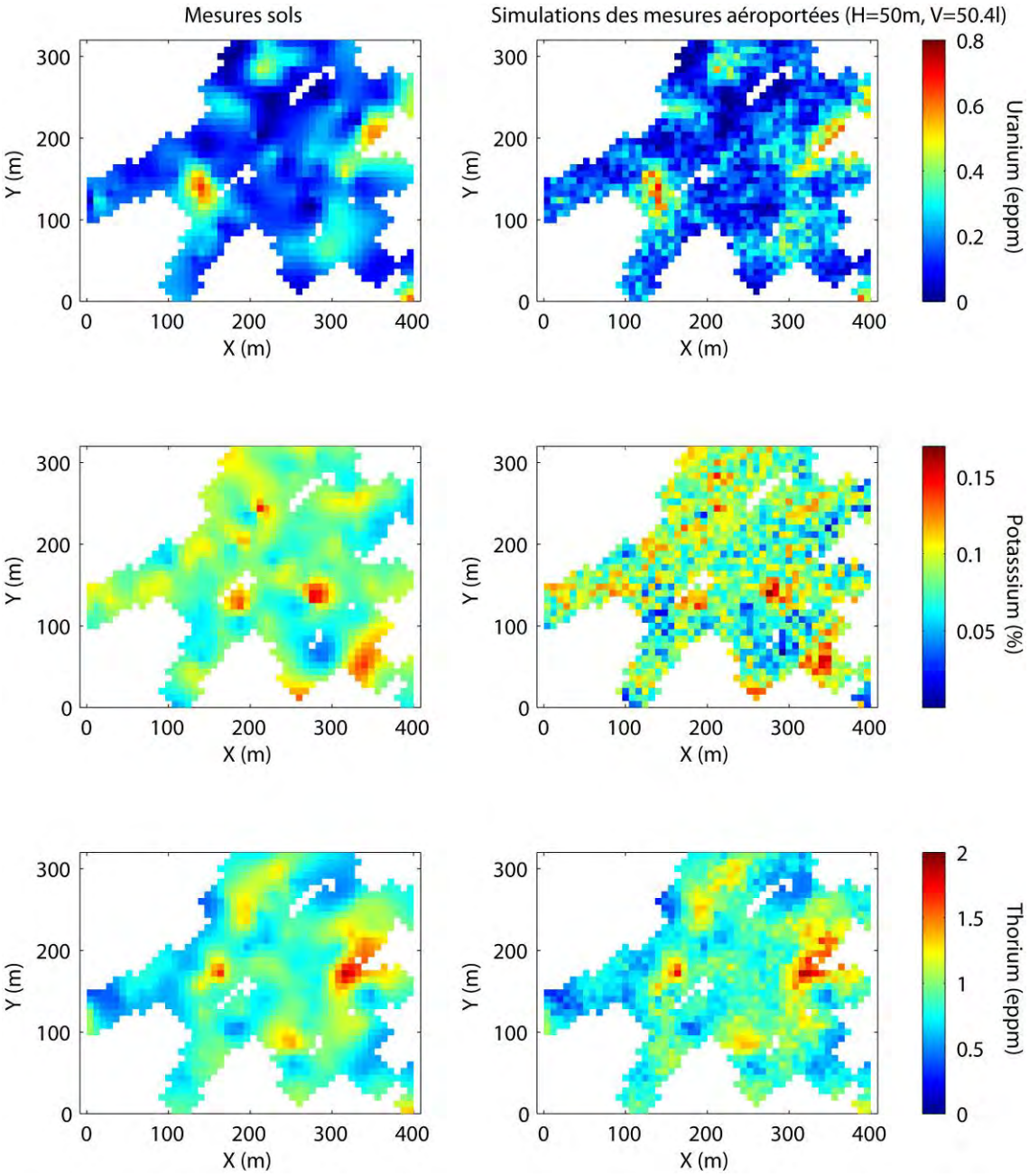


Figure 27 : A gauche, grilles de valeurs radiométriques obtenues au sol sur le site de la Rivière des Pirogues, à droite, les variables correspondantes pour une acquisition aéroportée à 50 m de hauteur pour un volume de capteur de 50,4 l.

4.4.6. Apport de l'enregistrement continu

Les données acquises en continu ont été ré-échantillonnées au pas de 60 secondes afin d'obtenir une estimation correcte des teneurs mesurées tout en ayant une résolution spatiale adéquate (50 mètres pour une vitesse de déplacement de 3 km/h).

Les grilles ont été maillées au pas de 5m Les résultats des variables géophysiques sont proches des cartes produites en mode station (figure 28a b et c). Par contre la résolution spatiale est améliorée. Les plateaux de latérite (faible teneur en potassium et forte teneur en uranium et thorium) sont mieux définis ainsi que les affleurements rocheux (forte teneur en potassium et faible teneur en uranium et thorium). La résolution de cette carte est optimale compte tenu des cheminements réalisés, pour autant, on ne fait pas apparaître la structuration des filons sous le masque latéritique.

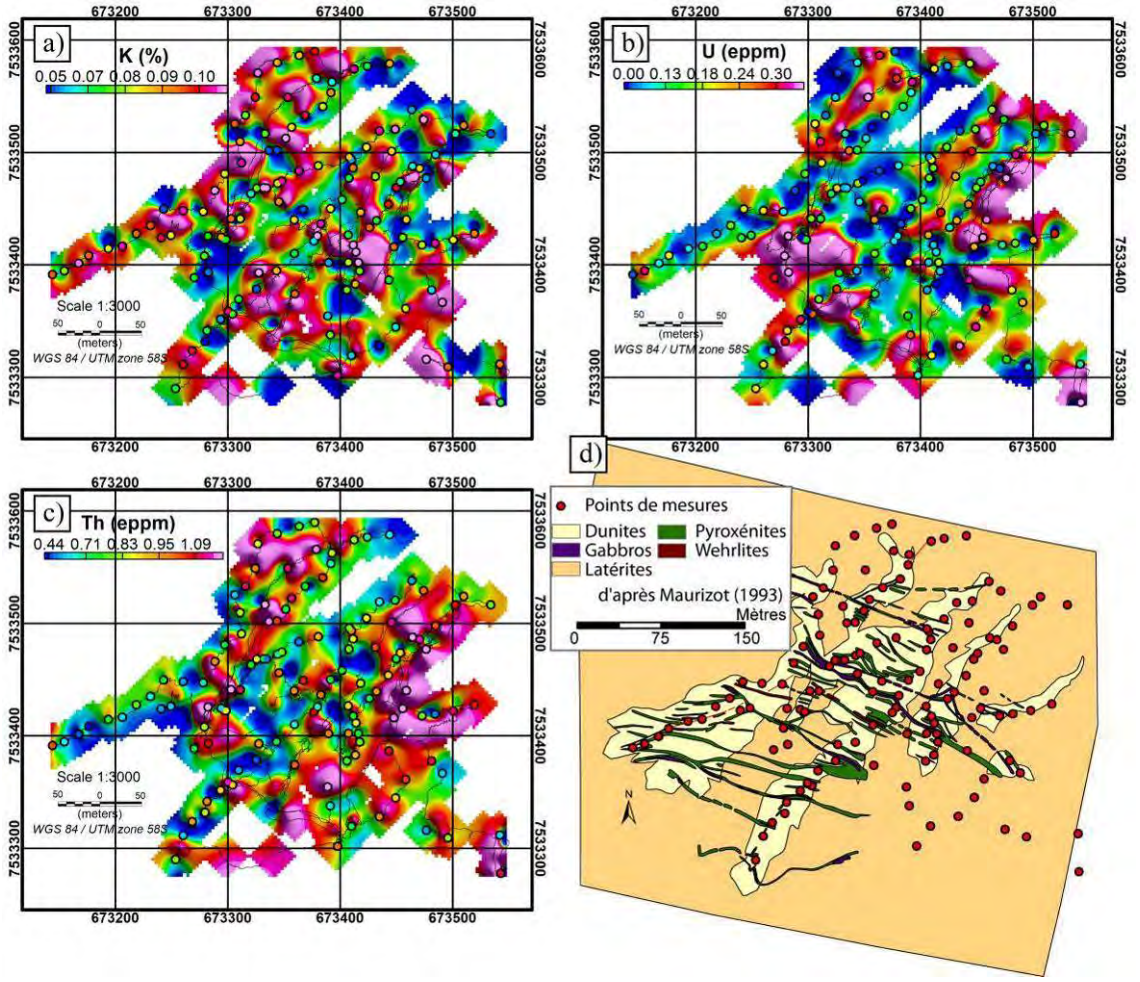


Figure 28 : Carte du potassium (a), de l'uranium (b), du thorium (c) et carte géologique (d) du site de la Rivière des Pirogues réalisées avec les enregistrements continus. Les points représentes les stations d'acquisition.

4.5. SITE DE TIEBAGHI

4.5.1. Géologie

Long de 20 km, large de 8 km, le massif de Tiébaghi est bordé à l'Ouest par le lagon et à l'Est par la Vallée de la Néhoué. Ce massif est recouvert d'un manteau d'altérites

épais, qui dessine un dôme, culminant à près de 600 mètres à l'Est et descendant en pente douce vers le lagon au Sud-Ouest. Sur les rebords du plateau, les reliefs s'accentuent et les flancs abrupts du dôme sont parcourus de torrents qui permettent d'observer des péridotites relativement peu altérées.

Ce massif est recoupé par un ensemble filonien connu des exploitants miniers, visible notamment dans l'ancienne exploitation de la mine de chrome (Chromical). La composition la plus couramment rencontrée est celle d'une roche feldspathique gabbroïque, à grands cristaux pegmatoïdes d'amphibole et plagioclase. Des compositions plus acides, de granitoïdes à biotite sont localement connues.

Sur la zone du plateau, le gisement de nickel en cours d'exploitation (SLN) est fortement structuré en sillons et crêtes. On peut supposer que les sillons plus profondément latéritisés correspondent à des zones fracturées et filoniennes. Plusieurs familles de structures (4 au total) sont décrites dans la littérature : N 110°, N 135°, N 0°et N 60°. La direction principale étant N 135°. La structuration en sillon a été étudiée par l'exploitant, par la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique (TRE). Les profils latéritiques du plateau de Tiébaghi, ont un niveau de latérite rouge peu développé et sont surmontés par une cuirasse sommitale de 3 à 4 mètres d'épaisseur souvent massive (figure 29). L'épaisseur moyenne des altérites est importante (40 mètres). Dans ce site, les structures filoniennes sont donc complètement masquées.

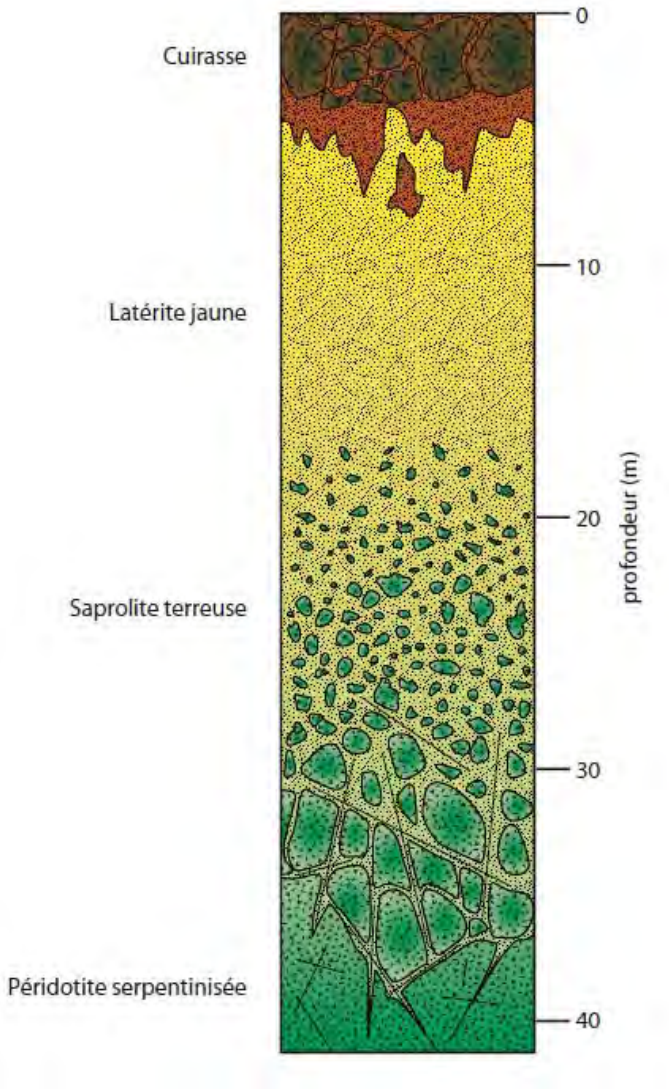


Figure 29 : Log simplifié du profil d'altération du massif de Tiébaghi.

4.5.2. Mesures radiométriques

Au total, il a été acquis 60 stations de mesures et 8 km de profils en continu. La figure 30 montre la position des points de mesure sur le site.

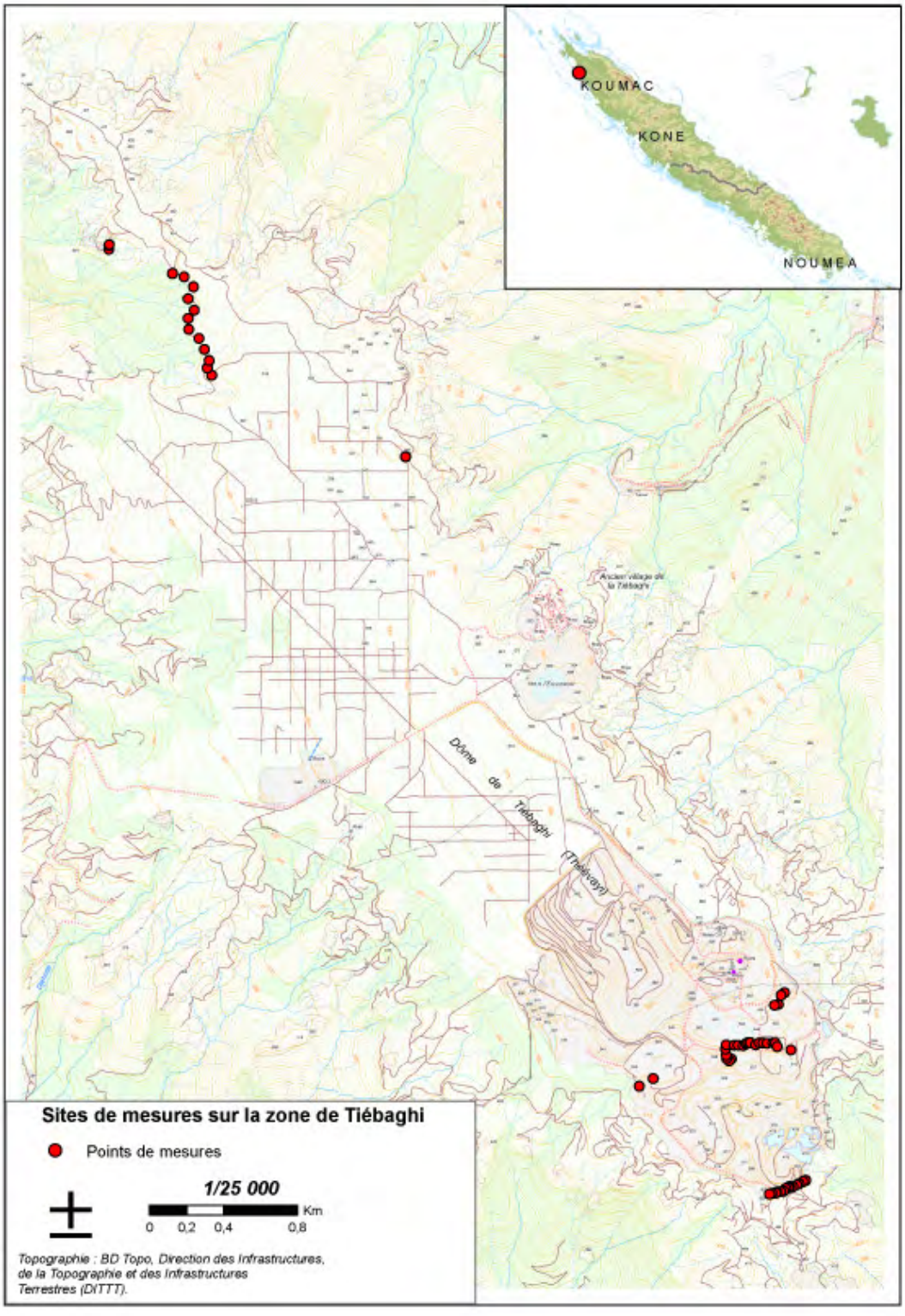


Figure 30 : Répartition de l'échantillonnage sur le site de Tiébaghi.

4.5.3. Analyse des mesures en station

La figure 31 présente l'analyse des mesures acquises en mode station sur le site minier de Tiébaghi pour les trois éléments radiogéniques par diagrammes binaires. La moyenne, l'écart type et le nombre de mesures sont récapitulés dans le tableau 5 pour chaque lithologie mesurée.

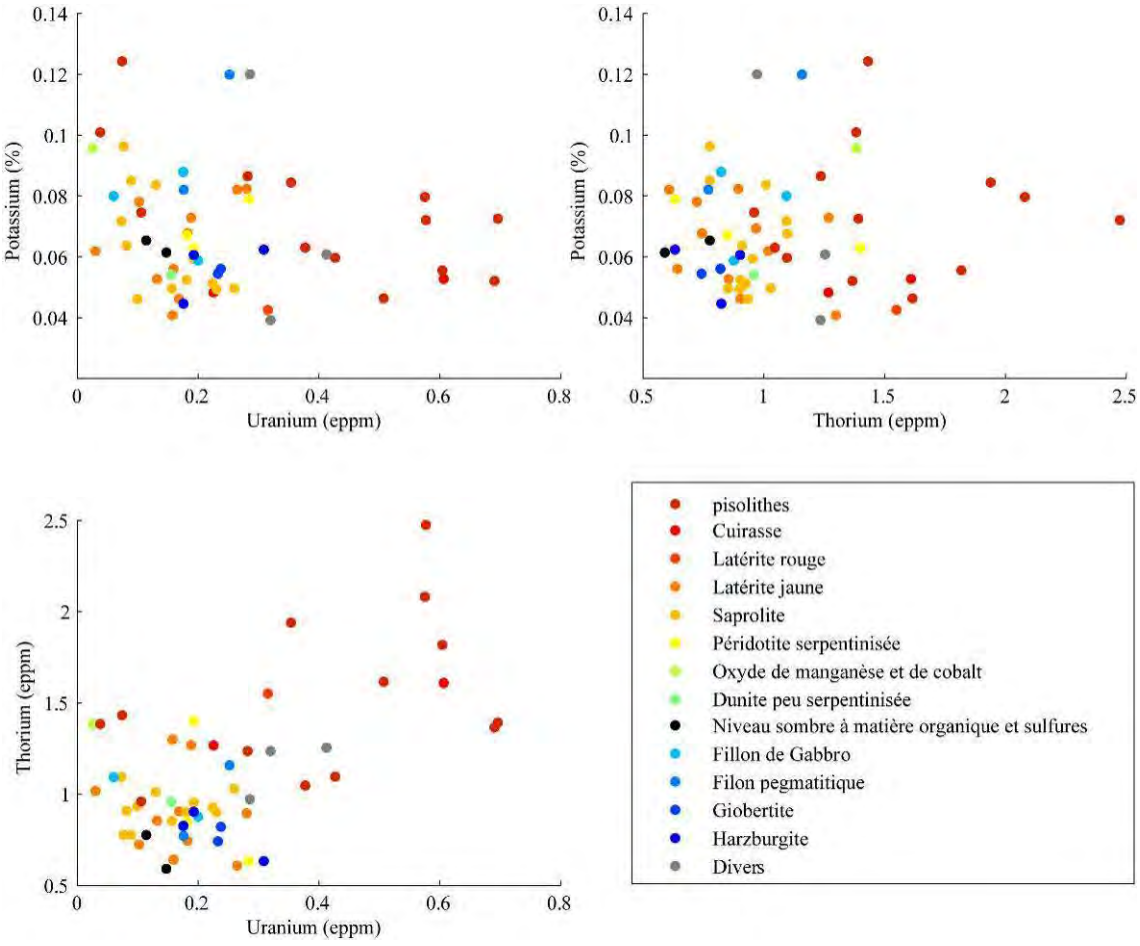


Figure 31 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies du site de Tiébaghi.

Le nombre total de mesures réalisées sur le site de Tiébaghi est moins important que sur celui du site de la Rivière des Pirogues. Pour chaque lithologie, les mesures montrent une dispersion importante, mais si l'on regarde les données moyennées, elles restent organisées et cohérentes par rapport à ce qui a été mis en évidence sur le site de la Rivière des Pirogues.

Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres statistiques (moy : moyenne ; std : écart type) pour les différentes lithologies mesurées sur le site de Tiébaghi.

Lithologie	K_{moy} (%)	K_{std}	U_{moy} (eppm)	U_{std}	Th_{moy} (eppm)	Th_{std}	Nombre de mesures
Cuirasse	0,05	0,27	0,42	0,00	1,44	0,24	2
Latérite rouge	0,04		0,32		1,55		1
Latérite jaune	0,06	0,09	0,15	0,01	0,90	0,23	11
Saprolite	0,06	0,08	0,14	0,02	0,94	0,10	13
Péridotite serpentinisée	0,07	0,06	0,22	0,01	0,96	0,40	3
Oxyde de manganèse et de cobalt	0,10		0,03		1,38		1
Dunite peu serpentinisée	0,05		0,16		0,96		1
Pisolithes	0,07	0,23	0,41	0,02	1,53	0,44	13
Matière organique	0,06	0,02	0,13	0,00	0,68	0,13	2
Filon de Gabbro	0,08	0,07	0,15	0,02	0,93	0,14	3
Filon pegmatitique	0,10	0,05	0,21	0,03	0,96	0,27	2
Giobertite	0,06	0,00	0,24	0,00	0,78	0,06	2
Harzburgite	0,06	0,07	0,23	0,01	0,79	0,14	3,00
Mélange	0,07	0,07	0,34	0,04	1,15	0,16	3,00

Les mesures réalisées au droit des filons de gabbro et pyroxénite montrent une faible teneur en uranium et thorium (valeurs comprises entre 0,13 à 0,15 ppm pour l'uranium et 0,75 à 0,85 ppm pour le thorium) qui sont dans la même gamme que celles mesurées sur l'encaissant. Les teneurs en potassium restent très faibles mais contrastées. Seul les oxydes de manganèse présentent des teneurs plus élevés, cela peut s'expliquer par des minéraux du type cryptomélane et todorokite déjà signalés en Nouvelle-Calédonie (Lorca & al., 1991). Les filons présentent des teneurs plus importantes en potassium que la roche en place (0,09 à 0,11 % pour les filons et 0,08 % pour l'encaissant).

Si pour chaque lithologie on considère la moyenne des mesures (figure 32) on constate que le centre de gravité des points représentatifs de chaque lithologie suit un cheminement logique depuis les roches saines jusqu'aux roches très altérées. Au cours de ce chemin, le potassium est lessivé et le couple uranium - thorium concentré. Les valeurs les plus faibles en potassium et les valeurs les plus fortes en U - Th se trouvent dans les diverses latérites, les niveaux pisolithiques et la cuirasse.

Ces résultats sont cohérents avec ceux précédemment présentés sur le site de la Rivière des Pirogues.

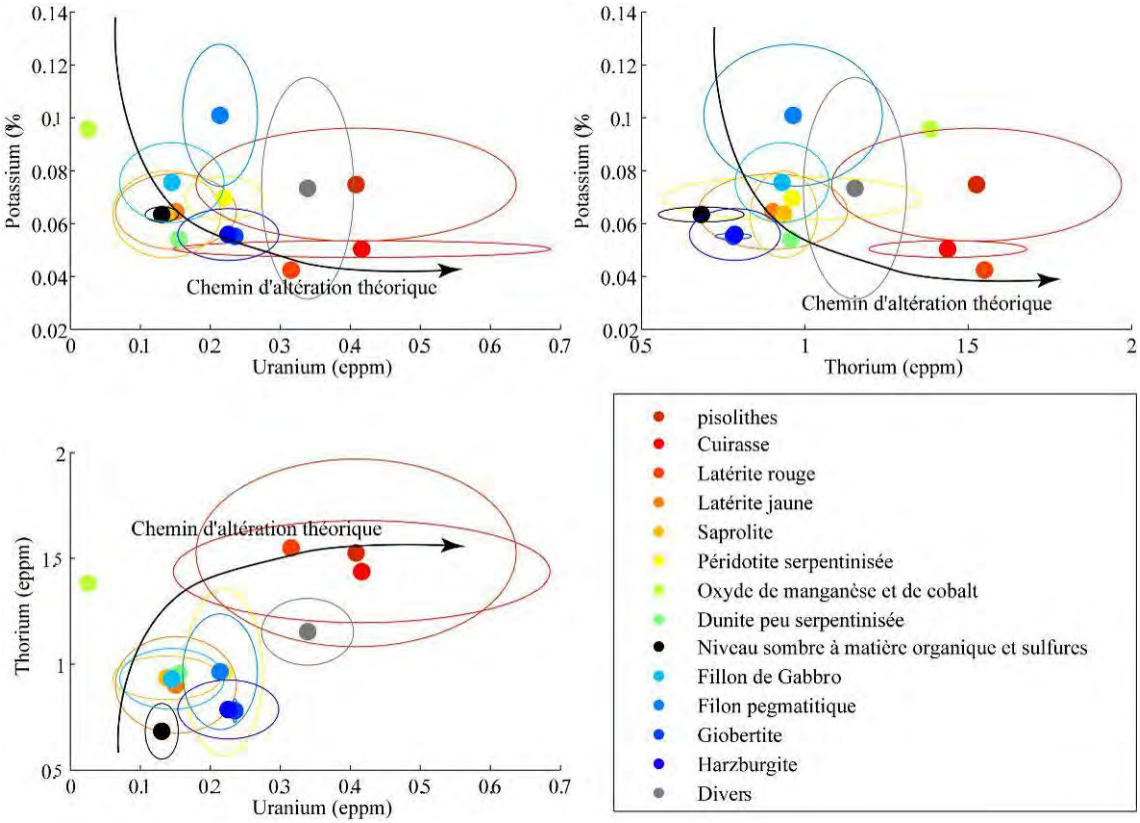


Figure 32 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour les différentes lithologies sondées. (les ellipses ont un rayon égal à un demi écart type).

4.5.4. Analyse des mesures en profil et comparaison avec la TRE

Sur ce site très vaste, nous n'avons pas procédé à des mesures systématiques avec une densité suffisamment resserrée pour pouvoir fournir une grille, en revanche des profils en acquisition continue ont été réalisés au droit de plusieurs profils de tomographie de résistivité existants.

Les données radiométriques acquises en mode continu ont été additionnées au pas de 20 secondes, permettant d'avoir un nombre suffisant de données afin de les corréler avec les résultats des profils électriques. En raison de la faible profondeur d'investigation de la méthode gamma spectrométrique, seules les données électriques superficielles sont utilisées.

La figure 33 compare les données gamma spectrométriques pour le comptage total (a), le potassium (b), l'uranium (c) et le thorium (d) en fonction de la résistivité superficielle. Aucune corrélation n'est visible entre les quatre canaux radiométriques et la résistivité de proche surface.

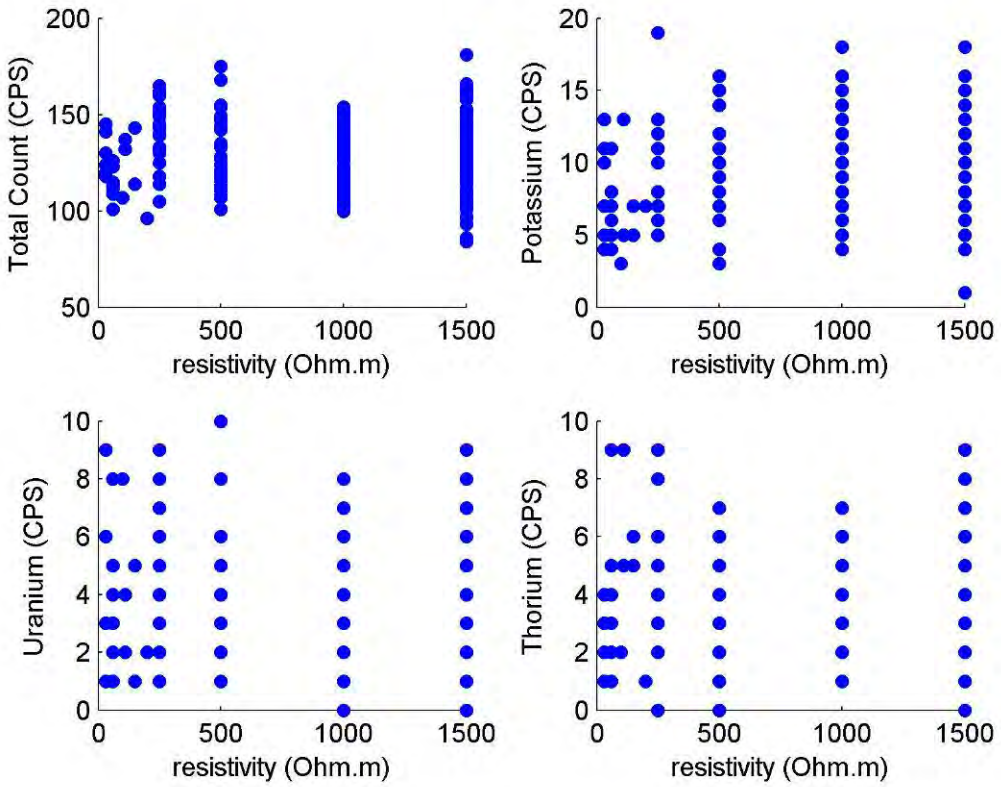


Figure 33 : Comparaison du comptage total (a), du potassium (b), de l'uranium (c) et du thorium (d) en fonction de la résistivité de proche surface.

5. Conclusions

Un spectromètre portable de rayonnement gamma PGS21 de PicoEnvirotec a été utilisé afin de mesurer les contrastes et les niveaux de réponse radiométrique des trois éléments potassium, uranium et thorium, dans le contexte des mines de nickel de Nouvelle-Calédonie. L'objectif était de tester les réponses radiométriques des péridotites et de leur cortège intrusif à différents degrés d'altération par une étude au sol, puis d'extrapoler cette réponse à une étude aéroportée et enfin évaluer les possibilités de couplage avec d'autres méthodes (EM) aéroportée.

Plusieurs sites ont été investigués selon différents modes d'acquisition : mesures ponctuelles au droit des filons et dans leur encaissant ultrabasique, relevés linéaires en acquisition continu, le tout, à différents degrés d'altération des roches. Deux zones ont en outre étaient testées (Rivière des Pirogues et massif de Tiébaghi) en couverture plus systématique afin de couvrir des zones surfaciques simulant un lever aéroporté. La cartographie réalisée en acquisition en mode continu permet d'avoir une meilleure résolution que la cartographie réalisée en acquisition en mode station.

Une bibliothèque de réponses spectrales totalisant 269 stations d'acquisitions ponctuelles dans différentes lithologies des massifs de péridotite et 18 km linéaires en acquisition continue a été constituée.

L'ensemble des résultats acquis permet d'étudier le comportement des trois éléments radiogéniques dans la roche saine comme dans les profils d'altération et dans les zones couvertes systématiquement de reconstituer une cartographie gamma spectrale au sol et de simuler son équivalent aéroporté.

Les mesures réalisées au droit des péridotites montrent que ces roches contiennent très peu de potassium, d'uranium et de thorium. Les amphibolites s'en distinguent avec des teneurs en radioéléments un peu plus élevées.

En valeur absolue, les quantités mesurées sont généralement faibles, par exemple le potassium dépasse rarement 1,5 % (dans les filons) alors que sa teneur moyenne dans la croûte continentale est de l'ordre de 3 %. Pour cet élément, les contrastes entre filons sains et encaissant sains sont cependant nets, dans un ratio de 1 pour 2. Les valeurs absolues pour l'uranium et le thorium sont également faibles ainsi que les contrastes. L'uranium n'offre pas de contraste significatif entre filon et encaissant à la différence du thorium.

L'altération produit une redistribution des éléments radiogéniques. Le potassium, très mobile, est rapidement lessivé dès les premiers stades d'altération alors que l'uranium et le thorium sont concentrés dans les stades ultimes (latérites et cuirasses). A ce stade nous n'avons pas identifié les minéraux porteurs des éléments radiogéniques et leurs transformations.

La couverture surfacique réalisée sur le secteur de la Rivière des Pirogues montre que les filons sont décelables dès lors qu'ils sont affleurants. En revanche, ils disparaissent sous le masque latéritique, ici modéré, et la structuration régionale n'apparaît pas.

Des simulations de levers héliportés ont été réalisées à partir de la cartographie radiométrique faite au sol sur le site des Pirogues. Elles montrent que les paramètres d'acquisition optimaux nécessaires à la radiométrie spectrale aéroportée dans ce contexte peu radiogénique (garde au sol de 50 mètres pour un volume de 50,4 litres), ne permettent pas de faire une acquisition couplée avec l'EM. En acquisition EM/spectrométrie couplée standard (garde au sol de 100 mètres avec un volume de détecteur de 16,8 litres), la carte de potassium –mesure très importante pour l'étude des filons- produite sera inexploitable. Par contre il est possible de réaliser un vol héliporté (altitude de 80 m) avec couplage EM en améliorant les paramètres pour la spectrométrie gamma, c'est-à-dire en adaptant une garde au sol réduite à 80 m et en portant le volume du détecteur à 33,6 litre. Les cartes d'uranium et de thorium produites alors permettront de faire ressortir fidèlement la gamme de variation attendue face aux variations d'altération ; toutefois les mesures de potassium restent en limite du pouvoir de détection de la méthode.

Les résultats sur Tiébaghi nous permettent de renforcer et compléter les conclusions du site de la rivière des Pirogues. En premier lieu, les filons intrusifs sont plus riche en potassium que l'encaissant. L'enrichissement en uranium et thorium est aussi observée lorsque l'altération augmente. Les oxydes de manganèse ont les teneurs les plus importantes en potassium. Ainsi les porteurs présumés du potassium seraient au sein des filons d'oxydes de manganèse. Nous n'avons pas trouvé de corrélation entre les valeurs de résistivités et les éléments radiogéniques sur le site de Tiébaghi.

6. Bibliographie

Allègre C., 2005 - Géologie isotopique, Belin.

Cabella R., Gazzotti M., Lucchetti G., 1997 – Loveringite and baddeleyite in layers of chromian spinel from the Bracco ophiolitic unit, Northern Apennines, Italy. The Canadian Mineralogist. Vol.35 899-908.

Cluzel D., Meffre S., Maurizot P, Crawford A.J., 2006 - Earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific; evidence from preobduction dikes in the ophiolite of New Caledonia. Terra Nova. Vol. 18, 395–402.

Cluzel D., Jourdan F., Meffre S., Maurizot P., Lesimple S., en preparation - Lowermost Eocene MORB-like amphibolites from the sole of the ultramafic allochthon of New Caledonia; 39Ar-40Ar, U-Pb, and geochemical evidence for subduction inception at a spreading ridge.

Cook SE, Corner RJ, Groves PR & Grealish GJ., 1996 - Use of airborne gamma radiometic data for soil mapping. Australian Journal of Soil Research, 34, 183–94.

Dickson B.L., Scott K.M., 1997 - Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. AGSO J. Aust. Geol. Geophys. 17, 187–200.

Dosseto A., Bourdon B., Turner S.P., 2008 - Uranium-series isotopes in river materials: Insights into the timescales of erosion and sediment transport, Earth and Planetary Science Letters, 265, 1-17.

IAEA, 1979 - Gamma Ray Surveys in uranium Exploration, Technical Reports Series No. 186, IAEA, Vienna.

IAEA -TECDOC-1363, 2003 - Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry.

Lorca S., Monchoux P., 1991 – Supergene cobalt minerals from New Caledonia. Canadian Mineralogist. Vol. 29, 149 – 161.

Martelet G., Truffert C., Tourlière.B., Ledru P., Perrin.J. , 2006 - Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana)., International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8, issue 3, p. 208-223

Maurizot P., 1993 - Inventaire des ressources minières de la métropole et des départements et territoires d'Outre-mer. Prospection des éléments du groupe du platine dans le Massif du Sud (Nouvelle-Calédonie). Campagne 1993. Rap. BRGM R 37 788, 107 p., 18 fig., 15 tabl., 1 pl., 5 ann.

Perrin J., 2008 – Avant projet sommaire pour la realisation d'un programme de levé géophysique aéroporté de la Nouvelle-calédonie – Rapport Final – BRGM/RP-56384-Fr – 51p, 2 tabl., 21 ill.

Rajesh V.J., Yokoyama K., Santosh M., Arai S., Oh C.W., Kim S.W., 2006 – Zirconolite and baddeleyite in an ultramafic suite from Southern India: Early ordovician carbonatite-type melts associated with extensional collapse of the Gondwana crust. The Journal of Geology, 2006, Volume 114, 171 – 188.

Robineau B., Join J.L., Beauvais A., Parisot J-C. & Savin C. 2007 - Geoelectrical imaging of a thick regolith developed on ultramafic rocks: groundwater influence. Australian Journal of Earth Sciences 49, 3 – 162.

Tardy Y., 1993 - Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson, 459 p.

Zaccarini F., Stumpfl F., 2004 – Zirconolite and Zr-Th-U minerals in chromites of the Finero complex, Western Alps, Italy : evidence for carbonatite-type metasomatism in a subcontinental mantle plume. The Canadian Mineralogist. Vol.42, 1825 – 1845.

Wilford J.R., Bierwirth P.N., Craig M.A., 1997 - Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil-regolith mapping and applied geomorphology. AGSO J. Aust. Geol. Geophys. 17, 201–216.

Annexe 1 : Données de calibration du spectromètre PGIS-21

1 - Calibration en Energie :

Selon le réglage usine du spectromètre les fenêtres spectrales sont les suivantes =

Canal	Fenêtre spectrale (canaux)
Potassium (1370 – 1570 keV)	234 - 268
Uranium (1660 – 1860 keV)	284 - 318
Thorium (2410 – 2810 keV)	412 - 480

2 – Coefficients Compton et Sensibilités :

Ces coefficients de calibration ont été calculés à partir de mesures sur 4 blocs de calibration (« Cement PADS ») de concentration connue en utilisant la procédure IAEA (IAEA, 2003) :

Coefficient	**Valeur**
Compton	
Alpha (Th dans U)	0.5267
BETA (Th dans K)	0.6792
GAMMA =(U dans K)	0.9904
A (U dans Th)	0.0316
B (K dans Th)	0.0017
G (K dans U)	0.0013
Sensibilité	
Ksens	3.242
Usens	0.2727
Thsens	1.272

Annexe 2 : Tableau récapitulatif de l'échantillonnage géochimique

Identification	X (UTM 58S)	Y (UTM 58S)	Altitude	Géologie	Site
BS_2010_536	673351,6	7533512,65	50	Filon de gabbro altéré blanc/rouge	Rivière des pirogues
BS_2010_538	673336,61	7533501,71	56,3	Latérite colluvionnée.	Rivière des pirogues
BS_2010_544	673391,35	7533450,09	53,4	Dunite saine et blocs de saprolite.	Rivière des pirogues
BS_2010_546	673376,55	7533421,25	57,6	Affleurement de pyroxénite de dunite rocheuse.	Rivière des pirogues
BS_2010_548	673343,34	7533394,88	63,5	Pyroxénites sur ancienne piste.	Rivière des pirogues
BS_2010_581	440351,26	7710144,42	35,8	Alluvions de péridotites ou/et basaltes.	Tiébaghi
BS_2010_590	418882,19	7735953,88	516,3	Harzburgite serpentinisée.	Tiébaghi
BS_2010_591	418870,3	7735944,33	524,1	Harzburgite saprolitisée.	Tiébaghi
BS_2010_592	418857,85	7735955,65	528,4	Latérite jaune-rougeâtre.	Tiébaghi
BS_2010_597	418919,91	7736026,22	527,1	Saprolite riche en garniérite.	Tiébaghi
BS_2010_609	419131,05	7736019,85	536,8	Filon de gabbro altéré, rose-jaunâtre.	Tiébaghi
BS_2010_647	415529,39	7734595,85	26,1	Filon pegmatitique bien blanc.	Tiébaghi

Tableau 6 : Récapitulatif de l'échantillonnage géochimique réalisé.

	(234U/238U)	Erreur (2σ)	Ag	Al2O3	As	B	Ba	Be (	Bi (	CaO	Cd	Ce	Co
			0.2	0.2	20	10	10	2	10	0.1	2	0.1	5
			mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg
BS-2010- 592	**0.9992**	**0.0238**	< LQ	8.8	85	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2	1.33	189
BS-2010- 544	**0.9985**	**0.0107**	< LQ	0.5	85	< LQ	15	< LQ	< LQ	< LQ	4	< LQ	711
BS-2010- 536	**1.0308**	**0.0119**	< LQ	36	51	< LQ	30	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1.11	66
BS-2010- 609	**1.0027**	**0.0095**	< LQ	23.6	77	< LQ	77	< LQ	< LQ	< LQ	2	6.75	4489
BS-2010- 597	**0.9954**	**0.0180**	< LQ	10.4	74	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2	0.35	679
BS-2010-538	**1.0700**	**0.0044**	< LQ	7.9	89	< LQ	17	< LQ	< LQ	< LQ	6	6.13	826
BS-2010- 546	**0.9523**	**0.0259**	< LQ	< LQ	40	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0.1	2	< LQ	168
BS-2010- 590	**0.9692**	**0.0176**	< LQ	1.9	45	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1.6	2	0.42	106
BS-2010- 647	**1.0288**	**0.0039**	< LQ	17.7	45	< LQ	32	< LQ	< LQ	0.7	< LQ	6.93	9
BS-2010- 591	**0.9109**	**0.0318**	< LQ	3.4	57	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0.2	2	0.85	1132
BS-2010- 548	**1.0223**	**0.0419**	< LQ	1.4	57	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2.8	2	0.28	64
BS-2010- 581	**0.9612**	**0.0046**	< LQ	13.5	83	< LQ	236	< LQ	< LQ	3.7	< LQ	39.7	79

	Cr	Cu	Dy	Er	Eu	Fe2O3t	Gd	Ho (	K2O	La	Li	Lu	MgO
	10	5	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	10	0.1	0.2
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
BS-2010- 592	16068	72	1.56	1.49	0.15	63.5	0.74	0.41	< LQ	0.32	< LQ	0.33	1
BS-2010- 544	19168	11	< LQ	< LQ	< LQ	65.7	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1.8
BS-2010- 536	1374	21	0.7	0.44	0.21	5.95	0.79	0.15	0.24	1.45	11	< LQ	< LQ

BS-2010- 609	3889	45	1.88	1.24	0.45	27.8	1.43	0.42	0.14	4.33	< LQ	0.21	0.3
BS-2010- 597	19802	28	0.48	0.4	< LQ	23.7	0.32	0.12	< LQ	0.59	< LQ	< LQ	3.3
BS-2010-538	14162	49	1.19	0.73	0.28	71.2	1.24	0.26	< LQ	1.58	< LQ	0.11	0.3
BS-2010- 546	1896	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	13.8	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	39.9
BS-2010- 590	2009	15	0.14	0.13	< LQ	7.73	< LQ	< LQ	< LQ	0.21	< LQ	< LQ	36.5
BS-2010- 647	43	< LQ	2.64	2.09	0.45	0.29	2.4	0.65	0.2	3.87	26	0.4	8.4
BS-2010- 591	4030	9	1.59	1.57	0.14	10.9	0.82	0.45	< LQ	0.26	< LQ	0.27	26.1
BS-2010- 548	1291	< LQ	0.21	0.15	< LQ	12.7	0.18	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	27.2
BS-2010- 581	317	109	7.78	4.71	1.95	9.55	7.39	1.67	0.32	18.8	21	0.65	3.9

	MnO	**Mo**	**Na2O**	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**P2O5**	**PF (Perte au feu à 1000°C)**	**Pb**	**Pr**	**Sb**	**SiO2**	**Sm**
	0.02	5	0.2	20	0.1	10	0.05	0.1	10	0.1	10	0.2	0.1
	%	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg
BS-2010- 592	0.12	< LQ	< LQ	< LQ	0.68	15349	< LQ	13.88	< LQ	0.14	68	7	0.31
BS-2010- 544	0.77	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	9796	< LQ	12.75	< LQ	< LQ	87	12.7	< LQ
BS-2010- 536	0.03	< LQ	< LQ	< LQ	2.23	2785	< LQ	15.72	< LQ	0.41	< LQ	40.4	0.53
BS-2010- 609	3.8	< LQ	< LQ	< LQ	3.99	5455	< LQ	13.94	< LQ	0.97	< LQ	26.7	1.03
BS-2010- 597	0.05	< LQ	< LQ	< LQ	0.77	13928	< LQ	14.28	< LQ	0.17	74	39.7	0.2
BS-2010-538	0.93	< LQ	< LQ	< LQ	3.31	3351	< LQ	14.19	< LQ	0.69	45	1.2	0.91
BS-2010- 546	0.2	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2155	< LQ	6.87	< LQ	< LQ	< LQ	38.7	< LQ
BS-2010- 590	0.11	< LQ	< LQ	< LQ	0.2	2062	< LQ	9.43	< LQ	< LQ	15	42.1	< LQ
BS-2010- 647	< LQ	< LQ	6.6	< LQ	5.58	161	< LQ	7.77	< LQ	1.21	< LQ	58.1	1.66
BS-2010- 591	0.24	< LQ	< LQ	< LQ	0.71	27938	< LQ	14.37	< LQ	0.13	23	38.2	0.36

BS-2010- 548	0.25	< LQ	< LQ	< LQ	0.33	267	< LQ	0.71	< LQ	< LQ	23	54.1	0.14
BS-2010- 581	0.31	< LQ	2	< LQ	22.9	177	0.06	13.11	< LQ	5.27	38	51.8	5.89

	Sn	**Sr**	**Tb**	**Th**	**TiO2**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**
	10	5	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	10	10	0.1	20	0.1	5	20
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
BS-2010- 592	11	< LQ	0.2	0.2	0.11	0.25	5.38	247	< LQ	8.5	< LQ	1.87	338	< LQ
BS-2010- 544	< LQ	< LQ	< LQ	0.1	< LQ	< LQ	9.69	128	< LQ	0.5	< LQ	0.1	394	< LQ
BS-2010- 536	< LQ	30	0.11	0.09	0.19	< LQ	19.30	94	< LQ	4.9	< LQ	0.4	66	< LQ
BS-2010- 609	11	23	0.27	0.4	0.64	0.21	26.23	287	< LQ	6.5	< LQ	1.44	147	51
BS-2010- 597	11	< LQ	< LQ	0.04	0.11	< LQ	4.35	315	< LQ	3.7	< LQ	0.41	366	< LQ
BS-2010-538	< LQ	< LQ	0.2	1.4	0.36	0.1	680.35	313	< LQ	5.6	< LQ	0.66	396	45
BS-2010- 546	< LQ	< LQ	< LQ	0.03	< LQ	< LQ	1.57	< LQ	13	0.1	< LQ	< LQ	89	< LQ
BS-2010- 590	< LQ	< LQ	< LQ	0.09	< LQ	< LQ	22.94	49	< LQ	0.9	< LQ	0.16	45	< LQ
BS-2010- 647	< LQ	55	0.39	0.9	0.22	0.31	245.66	15	< LQ	23.2	26	2.28	17	113
BS-2010- 591	11	< LQ	0.18	0.06	< LQ	0.23	7.09	87	11	14.4	< LQ	1.37	587	< LQ
BS-2010- 548	< LQ	< LQ	< LQ	0.03	0.09	< LQ	4.14	62	< LQ	1.2	< LQ	0.17	66	< LQ
BS-2010- 581	< LQ	98	1.25	2.3	1.28	0.66	374.41	298	< LQ	45	49	4.33	100	115

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats géochimiques

Annexe 3 : Etude gamma-spectrométrique réalisée dans le substrat volcano-sédimentaire

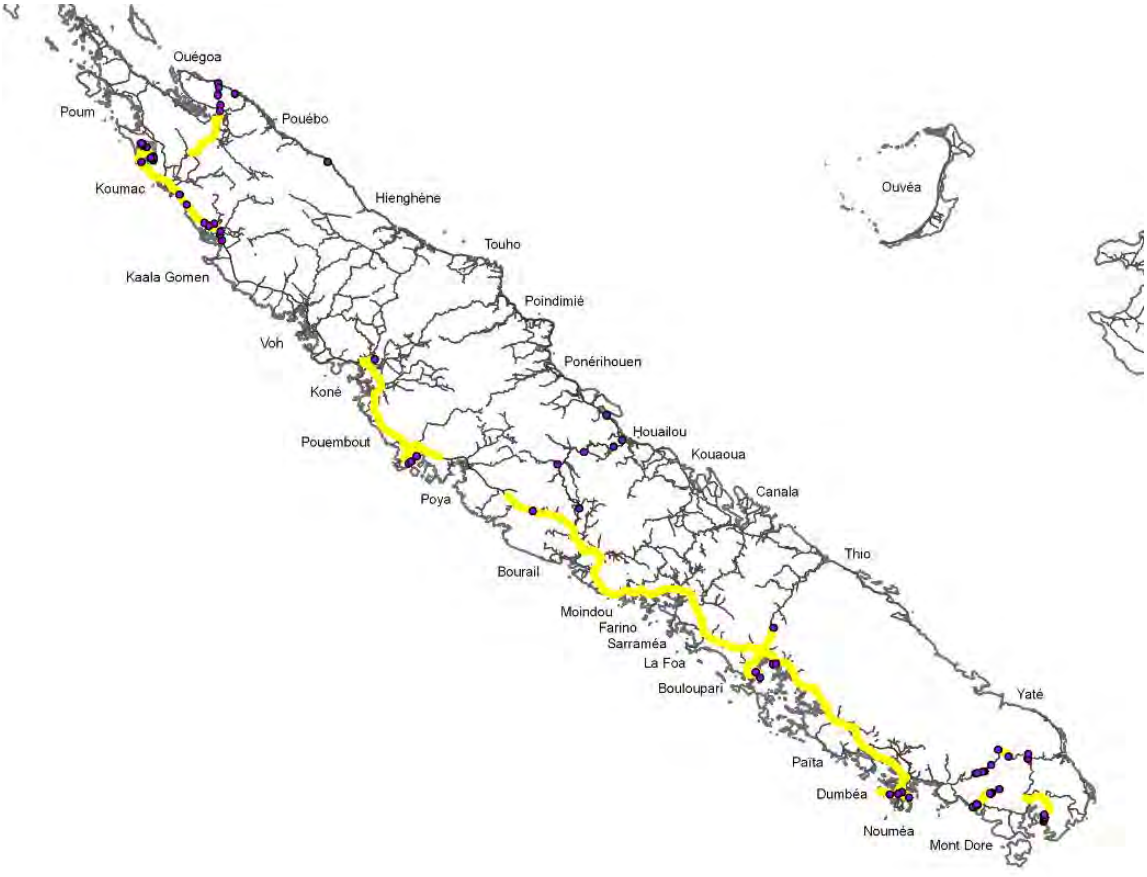


Figure 34 : Itinéraires de liaison hors contexte ultrabasique.

Afin de valoriser l'itinéraire entre le Massif du Sud et Tiébaghi, des enregistrements ont été réalisés sur des zones caractéristiques de différentes unités géologiques du substrat volcano-sédimentaire (figure 34). Les mesures ont été faites soit en continu soit en stations ponctuelles. Les plages de valeurs acquises pourront être utiles dans la perspective d'un levé aéroporté gamma radiométrique sur l'ensemble de la Grande-Terre.

Mesures en stations ponctuelles

Les mesures en stations ponctuelles sont présentées sur la figure 35 en fonction de la dose totale absorbée sur le fond de la carte géologique.

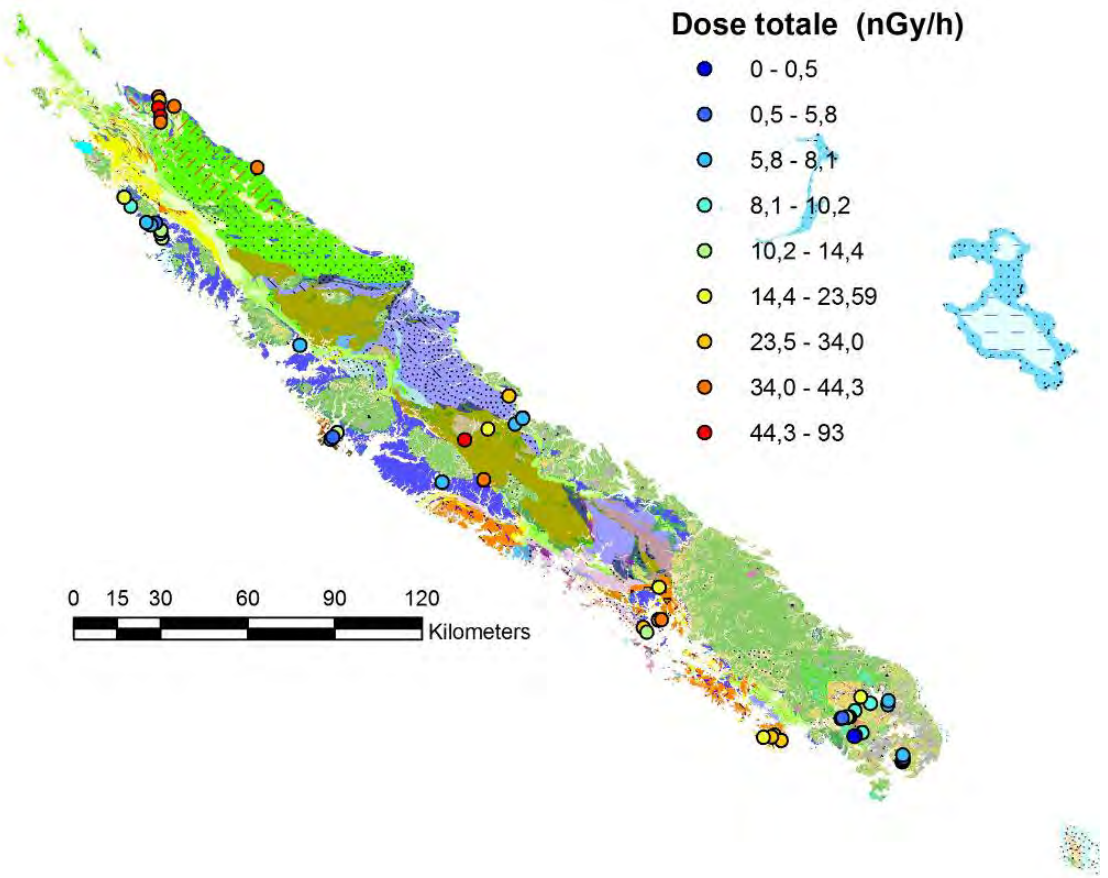


Figure 35 : Localisation des mesures des points d'affleurements géologiques

Les gammes de mesures (figure 36) pour le potassium, le thorium et l'uranium sont plus importantes que pour les sites miniers. En effet, les teneurs en uranium varient de 0 à 4,5 ppm, les teneurs en thorium varient de 0 à 8 ppm et les teneurs en potassium varient de 0 à 5% alors que les teneurs mesurées varient sur les sites miniers de 0 à 0,7 ppm pour l'uranium, de 0 à 1,6 ppm pour le thorium et 0 à 0,1% pour le potassium.

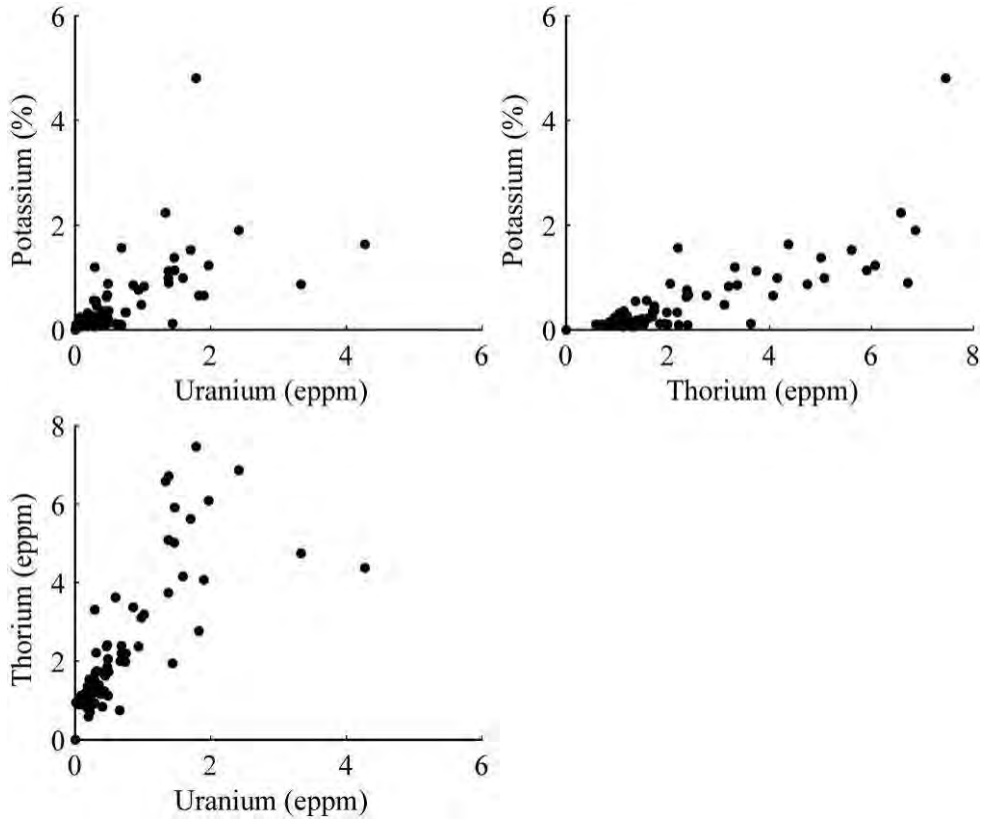


Figure 36 : Comportement moyen du potassium en fonction de l'uranium (a), du potassium en fonction du thorium (b) et du thorium en fonction de l'uranium (c) pour différentes lithologies du substrat volcano-sédimentaire en Nouvelle-calédonie.

Mesures en acquisition continue

Deux profils gamma spectrométriques acquis en continu à pied ou en voiture ont été étudiés afin de démontrer la potentialité de la méthode pour l'aide à la cartographie géologique.

Exemple d'acquisition « à pied »

Un exemple d'acquisition à pied de signal gamma spectrométrique a été réalisé dans un contexte de cartographie de lame de serpentinite recoupant l'unité de la Boghen représentée ici par des micaschistes altérés (isaltérite). Ces lames sont potentiellement amiantifères et donc reliées à un risque sanitaire. Le signal gamma spectrométrique a été additionné au pas de 20 secondes afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Sur la figure 37, on observe clairement un appauvrissement en uranium (a), potassium (c) et thorium (c) de la serpentinite par rapport aux isaltérites de micaschiste. Le contact cartographié et visible sur le terrain se traduit nettement dans les mesures gamma spectrométriques.

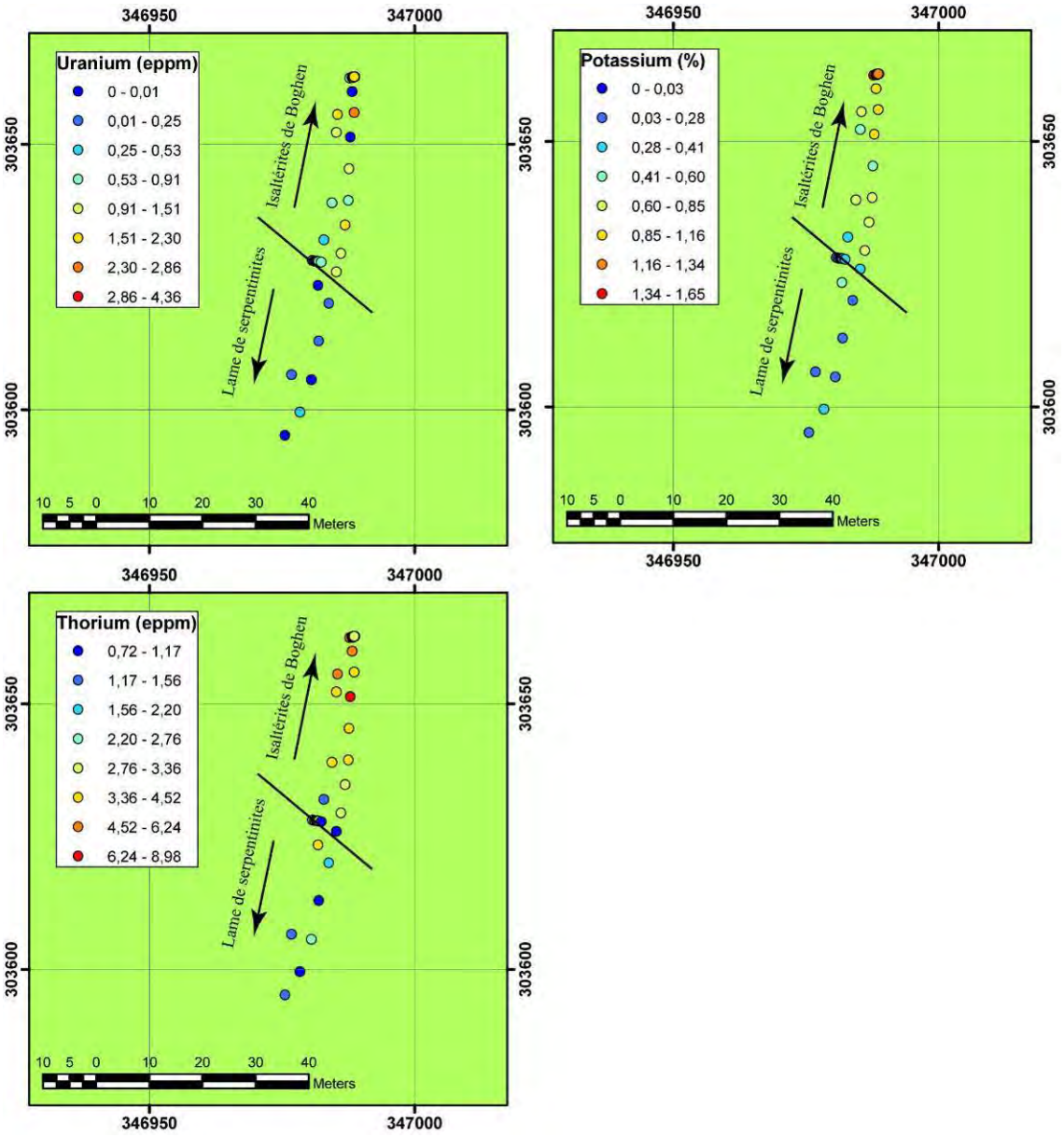


Figure 37 : Exemple d'enregistrement en continu à pied du signal gamma spectrométrique réalisé sur une lame de serpentinites en contact avec des micaschistes altérés de l'unité de la Boghen.

Exemple d'acquisition en voiture

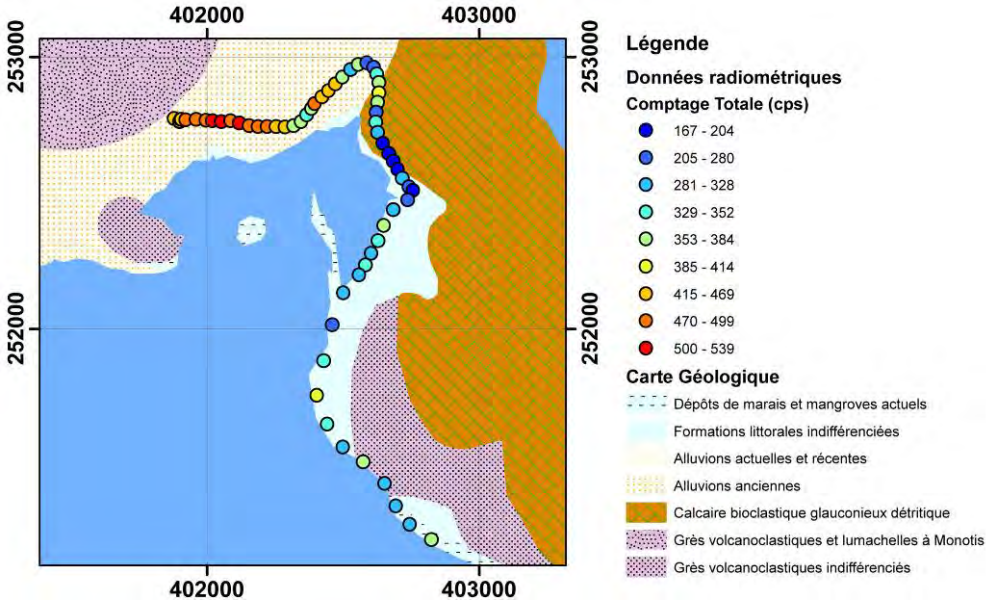


Figure 38 : Exemple d'enregistrement en continu en voiture du signal gamma spectrométrique.

Le signal gamma spectrométrique a aussi été enregistré lors des déplacements en voiture. La figure 38 montre un exemple d'enregistrement du comptage total. Les signaux ont été ré-échantillonnés au pas de 20 secondes. La vitesse de déplacement de la voiture varie de 5 km/h pour les points enregistrés au Nord de la carte à 20 km/h pour les points enregistrés au Sud. Le comptage total est clairement corrélé avec les formations géologiques. Le niveau de comptage est de l'ordre de 500 cps lorsque les mesures sont effectuées dans les alluvions anciennes. Il diminue à 200 cps lorsque l'on est dans le calcaire bioclastique. Pour les formations littorales, le nombre de coups par seconde varie de 280 à 350. On observe aussi des variations haute résolution qui peuvent être associées à des éléments locaux non cartographiés.

Conclusions

Ces quelques mesures révèlent une variation importante des teneurs en potassium, uranium et thorium mesurées au droit des différents affleurements types, qui seraient cartographiables par un lever gamma spectrométrique aéroporté.

Annexe 4 : Librairie spectrale des stations de mesure ponctuelle

Latitude (°)	Longitude (°)	Date	Id	Géologie	Potassium (%)	Uranium (eppm)	Thorium (eppm)
-22.2084	166.6786	25/08/2010	BS_2010_389	Filon quartzo-feldspathique à muscovite (filon dy type granitoïde). Fortement saprolitisé. Présence de blocs de pyroxénite emballé dans la latérite autour du filon.	0.217	0.447	1.625
-22.1647	166.8368	25/08/2010	BS_2010_390	Harzburgite saine. Pas de présence de latérite.	0.079	0.223	0.951
-22.1661	166.8372	25/08/2010	BS_2010_391	Dalle de cuirasse au bord du Lac de Yaté (surement contemporain du fluvio-lacustre). Cuirasse mitée plutât grossière.	0.075	0.349	1.310
-22.1530	166.8377	25/08/2010	BS_2010_392	Harzburgite très saine dans virage.	0.165	0.295	0.930
-22.1613	166.7779	26/08/2010	BS_2010_393	Filon leucocrate très altéré. Pas de quartz visible mais uniquement des feldspaths. Filon plutât du type micro-gabbro.	0.093	0.316	2.216
-22.1419	166.7462	26/08/2010	BS_2010_394	Filon leucocrateà feldspath, quartz et mica. Type granitoïde. Présence de myrmekite et d'enclaves de péridotites dans le filon.	0.620	0.460	2.367
-22.1848	166.7262	26/08/2010	BS_2010_395	Niveau de kaolinite pris dans la masse du fluvio-lacustre. Beaucoup de niveaux ferrugineux.	0.111	0.479	1.850
-22.2032	166.7065	26/08/2010	BS_2010_396	Filon blanc riche en quartz associéà des feldspaths et quelques micas (filon de type granitoïde).	1.627	4.273	4.373
-22.2031	166.7027	26/08/2010	BS_2010_397	Sur butte, nombreux éléments de silice associéà un filon. L'altération des plagioclases est rosée. L'encaissant semble être des wehrlites.	0.102	0.210	1.528
-22.2044	166.6992	26/08/2010	BS_2010_398	Zone d'altération sur filon, riche en silicie et kaolinite. Pas de phyllite.	0.108	0.599	3.625
-22.2071	166.6839	26/08/2010	BS_2010_399	Affleurement de cumulat frais associéà filon (silice et feldspath) altéré.	0.069	0.176	1.021
-22.3430	166.8845	20/09/2010	BS_2010_400	Altérites de gabbro cumulat. Couleurs vertes-blanches.	0.094	0.214	0.716
-22.3425	166.8850	20/09/2010	BS_2010_401	Blocs de roches dures type wehrliteà plagioclases.	0.086	0.063	0.883
-22.3419	166.8855	20/09/2010	BS_2010_402	Faciès type du gabbro cumulat. Bien lité.	0.055	0.091	1.119
-22.3377	166.8858	20/09/2010	BS_2010_403	Altérites de gabbro cumulat. Argile très blanche, kaolinite?	0.111	0.167	1.006
-22.3381	166.8875	20/09/2010	BS_2010_404	Décanteur rempli de saprolite et de latérite de wehrlite et de gabbo cumulat. Mesure d'ambiance.	0.108	0.252	1.158

-22.3332	166.8867	20/09/2010	BS_2010_405	Gabbro cumulat sain au bord de route.	0.109	0.431	1.224
-22.3330	166.8883	20/09/2010	BS_2010_406	Affleurement de dunite dans un creek.	0.105	0.158	1.191
-22.3311	166.8891	20/09/2010	BS_2010_407	Latérite rouge et granaille au niveau d'un talus de bord de route.	0.053	0.287	1.315
-22.3225	166.8864	20/09/2010	BS_2010_408	Cuirasse partiellement démantelée.	0.095	0.376	1.150
-22.2962	166.6817	20/09/2010	BS_2010_409	Filon de pyroxénite encaissé dans une lavaka.	0.096	0.129	0.564
-22.2962	166.6818	20/09/2010	BS_2010_410	Filon de pyroxénite encaissé dans une lavaka.	0.080	0.128	0.617
-22.2962	166.6821	20/09/2010	BS_2010_411	Entre deux lavakas, mesure sur latérite rouge au niveau d'un replat.	0.073	0.504	1.326
-22.2962	166.6822	20/09/2010	BS_2010_412	Filon de gabbro altéré, teinte rouge caractéristique.	0.062	0.347	1.022
-22.2962	166.6822	20/09/2010	BS_2010_413	Même filon qu'en 413 mais roche plus saine, altération plutât blanche des feldspaths.	0.085	-0.002	0.599
-22.2958	166.6826	20/09/2010	BS_2010_414	Large filon de pyroxénite alterné avec du gabbro altéré (rouge-blanc).	0.159	0.070	0.749
-22.2957	166.6827	20/09/2010	BS_2010_415	Point resseré de la lavaka avec de la dunite en roche.	0.081	0.183	0.692
-22.2959	166.6827	20/09/2010	BS_2010_416	Filon de gabbro altéré dans une lavaka.	0.086	0.092	1.012
-22.2960	166.6828	20/09/2010	BS_2010_417	Entre deux lavakas, mesure sur latérite rouge au niveau d'un replat.	0.081	0.242	0.950
-22.2962	166.6830	21/09/2010	BS_2010_418	Filon de gabrro/pyroxénite, blanc altéré.	0.138	0.090	0.670
-22.2968	166.6823	21/09/2010	BS_2010_419	Filon de gabbro blanc altéré, encaissé dans filon plus large de pyroxénite.	0.074	0.268	0.896
-22.2965	166.6825	21/09/2010	BS_2010_420	Filon de gabbro altéré (blanc).	0.139	0.155	0.954
-22.2972	166.6846	26/09/2010	BS_2010_430	Entre deux lavakas, latérite rouge, latérite colluvionnée et blocs de saprolite (dunite et pyroxénite).	0.087	0.122	0.643
-22.2975	166.6846	26/09/2010	BS_2010_431	Surface de latérite rouge et de latérite colluvionnée avec quelques cailloutis de saprolite et de pyroxénite.	0.072	0.520	1.115
-22.2972	166.6842	26/09/2010	BS_2010_432	Début de lavaka, latérite plutât jaune.	0.089	0.076	0.830
-22.2971	166.6840	26/09/2010	BS_2010_433	Filon de gabbro dans une lavaka/creek resserré.	0.146	0.154	0.560
-22.2967	166.6841	26/09/2010	BS_2010_434	Pyroxénite altérée et saprolite de dunite.	0.106	0.228	0.609
-22.2966	166.6840	26/09/2010	BS_2010_435	Point sur latérite colluvionnée et latérite in situ. Autour on observe des blocs de pyroxénite altérée.	0.065	0.203	1.111
-22.2961	166.6844	26/09/2010	BS_2010_436	Dunite saprolitisée et latérite jaune dans une lavaka resserrée.	0.089	0.290	1.051
-22.2962	166.6842	26/09/2010	BS_2010_437	Pyroxénite saine et gabbro altéré.	0.080	0.221	1.135
-22.2962	166.6841	26/09/2010	BS_2010_438	Filon de gabbro altéré très blanc dans une partie resserrée de la lavaka.	0.101	0.173	0.535
-22.2962	166.6839	26/09/2010	BS_2010_439	Surface rouge typique de l'altération d'un gabbro.	0.078	0.120	0.801

-22.2962	166.6838	26/09/2010	BS_2010_440	Replat latéritique entre deux lavakas.	0.076	0.491	1.432
-22.2956	166.6839	26/09/2010	BS_2010_441	Filon de pyroxénite encaissé dans une lavaka.	0.082	0.015	1.228
-22.2958	166.6837	27/09/2010	BS_2010_442	Latérite rouge et latérite colluvionnée dans une partie resserrée d'une lavaka.	0.097	0.164	0.719
-22.2528	166.7506	04/10/2010	BS_2010_444	Filon acide bien blanc et assez sain. Quartz, feldspath et possiblement biotite.	0.552	0.275	1.583
-22.2528	166.7506	04/10/2010	BS_2010_444 b	Filon acide bien blanc et assez sain. Quartz, feldspath et possiblement biotite.	0.000	0.000	0.000
-22.2527	166.7506	04/10/2010	BS_2010_445	Filon acide bien blanc et assez sain. Quartz, feldspath et possiblement biotite.	1.195	0.293	3.311
-22.2525	166.7510	04/10/2010	BS_2010_446	Amphibolite saine coupant deux filons acides blancs.	0.204	0.482	1.112
-22.2525	166.7510	04/10/2010	BS_2010_447	Filon de roche acide sain encaissé dans de la dunite saine.	0.359	0.462	1.133
-22.2525	166.7508	04/10/2010	BS_2010_448	Dunite chromifère saine.	0.085	0.012	0.939
-22.2529	166.7506	04/10/2010	BS_2010_449	Plan fracturé dans dunite saine.	0.100	0.197	0.585
-22.2530	166.7510	04/10/2010	BS_2010_450	Isaltérite rosée-blancheatre de roche acide.	0.206	0.290	1.492
-22.2626	166.7286	05/10/2010	BS_2010_452	Filon partiellement altéré de roche acide: quartz, feldspath et biotite.	0.095	0.670	1.995
-22.2628	166.7286	05/10/2010	BS_2010_453	Gabbro cumulat (encaissant du filon précédent 452).	0.061	0.181	1.348
-22.2644	166.7249	05/10/2010	BS_2010_454	Roche acide (quartz, feldspath et biotite) blanche assez saine encaissé dans du gabbro cumulat.	0.447	0.323	1.742
-22.2645	166.7249	05/10/2010	BS_2010_455	Gabbro cumulat encaissant le filon précédent (454).	0.096	0.182	0.796
-22.2637	166.7229	05/10/2010	BS_2010_455	Gabbro cumulat encaissant le filon précédent (454).	0.096	0.243	1.395
-22.2637	166.7229	05/10/2010	BS_2010_456	Affleurement de lattes blanches amiantifères associéesà un filon acide.	0.000	0.000	0.000
-22.2965	166.6808	20/10/2010	BS_2010_457	Filon de pyroxénites assez frais.	0.091	0.030	1.016
-22.2965	166.6809	20/10/2010	BS_2010_458	Filon de pyroxénite encaissé dans de la dunite altérée en boule.	0.077	0.314	0.657
-22.2964	166.6810	20/10/2010	BS_2010_459	Dunite saine recouverte de blocs de pyroxénites et de dunites (dont certains saprolitisés).	0.106	0.105	0.460
-22.2963	166.6811	20/10/2010	BS_2010_460	Dunite saine et pyroxénite métrique sur le bord de la lavaka.	0.089	0.199	0.428
-22.2963	166.6812	20/10/2010	BS_2010_461	Dunite saine avec des blocs de pyroxéniites et de dunites. Filon de gabbro décimétrique sur le bord de la lavaka.	0.079	0.101	0.776
-22.2963	166.6814	20/10/2010	BS_2010_462	Blocs de dunites et de pyroxénites dans une partie resserrée d'une lavaka. Paroi en latérite.	0.099	0.147	0.641
-22.2962	166.6815	20/10/2010	BS_2010_463	Partie resserrée de la lavaka avec des blocs de dunites et pyroxénites. Latérite et saprolite sur les bords de la lavaka.	0.089	0.070	0.804

-22.2961	166.6816	20/10/2010	BS_2010_464	Filon de pyroxénite décimétrique avec de la dunite saprolitisée autour.	0.091	0.165	0.667
-22.2960	166.6817	20/10/2010	BS_2010_465	Paroi de latérite colluvionnée et des blocs de pyroxénites et de dunites.	0.052	0.195	0.745
-22.2960	166.6819	20/10/2010	BS_2010_466	Partie encaissée avec de la latérite colluvionnée et de la dunite saprolitisée.	0.104	0.209	0.584
-22.2960	166.6821	20/10/2010	BS_2010_467	Recoupement de deux lavakas avec au sol de la dunite saine et des blocs de pyroxénites et de dunites.	0.080	0.103	0.671
-22.2958	166.6822	20/10/2010	BS_2010_468	Filon de pyroxénite métriqueà proximité de dunite saprolitisée.	0.110	0.031	0.963
-22.2957	166.6822	20/10/2010	BS_2010_469	Eboulis de pyroxénites et de dunites. Blocs de dunites, de serpentines et de pyroxénites au sol.	0.079	0.158	0.746
-22.2956	166.6824	20/10/2010	BS_2010_470	Filon de gabbro altéré encaissé dans de la dunite saprolitisée.	0.101	0.206	0.847
-22.2954	166.6824	20/10/2010	BS_2010_471	Latérite colluvionnée et blocs de pyroxénites et dunites, dans partie ouverte de la lavaka.	0.085	0.330	0.839
-22.2953	166.6823	20/10/2010	BS_2010_472	Dunite saine et quelques blocs de dunites et de pyroxénites.	0.090	0.203	0.612
-22.2952	166.6824	20/10/2010	BS_2010_473	Dunite saine et quelques blocs de dunites et de pyroxénites.	0.075	0.041	1.121
-22.2950	166.6825	20/10/2010	BS_2010_474	Filon de pyroxénite métrique et dunite saine.	0.095	0.086	0.986
-22.2949	166.6825	20/10/2010	BS_2010_475	Dunite saine.	0.106	0.020	0.859
-22.2948	166.6827	21/10/2010	BS_2010_476	Dunite serpentinisée et sable au sol.	0.085	0.107	0.802
-22.2947	166.6829	21/10/2010	BS_2010_477	Dunite saine et cailloutis de serpentinite, pyroxénite et dunite.	0.083	0.319	0.788
-22.2947	166.6830	21/10/2010	BS_2010_478	Dunite saine, filon de pyroxénite et sable.	0.095	0.026	0.833
-22.2949	166.6832	21/10/2010	BS_2010_479	Latérite colluvionnée et blocs de dunites.	0.065	0.343	0.839
-22.2948	166.6833	21/10/2010	BS_2010_480	Filon de pyroxénite encaissé dans des latérites et sable rougeà éléments de péridotites et pyroxénites au sol.	0.100	0.200	0.821
-22.2948	166.6835	21/10/2010	BS_2010_481	Dunite saine recoupée par un filon de pyroxénite.	0.071	0.071	0.700
-22.2948	166.6836	21/10/2010	BS_2010_482	Dunite saine recoupée par un filon de pyroxénite.	0.084	0.190	0.665
-22.2949	166.6830	21/10/2010	BS_2010_483	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.067	0.281	1.289
-22.2950	166.6828	21/10/2010	BS_2010_484	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.099	0.463	1.144
-22.2953	166.6826	21/10/2010	BS_2010_485	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.074	0.119	1.352
-22.2958	166.6825	21/10/2010	BS_2010_486	Sur replat latéritique, teinte rougeâtre généralement associée aux altérites de gabbro.	0.075	0.212	0.874
-22.2960	166.6823	21/10/2010	BS_2010_487	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.089	0.176	1.767

-22.2963	166.6821	21/10/2010	BS_2010_488	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.074	0.660	0.844
-22.2965	166.6820	21/10/2010	BS_2010_489	Piste en latérite.	0.073	0.307	0.736
-22.2965	166.6821	21/10/2010	BS_2010_490	Latérite colluvionnée, cuirasse démantelée et latérite rouge sur replat latéritique.	0.058	0.601	1.084
-22.2962	166.6823	21/10/2010	BS_2010_491	Isaltérite rouge et blanche de gabbro encaissée dans de la dunite saprolitisée.	0.072	0.144	0.852
-22.2960	166.6824	21/10/2010	BS_2010_492	Dunite saprolitisée et blocs de dunite et pyroxénite.	0.078	0.147	1.140
-22.2958	166.6825	21/10/2010	BS_2010_493	Filons de pyroxénites encaissées dans de la dunite saprolitisée.	0.066	0.126	0.775
-22.2958	166.6826	21/10/2010	BS_2010_494	Gabbro et pyroxénite altérés, l'ensemble encaissé dans de la dunite saprolitisée.	0.128	0.086	0.539
-22.2957	166.6827	21/10/2010	BS_2010_495	Dunite saprolitisée recoupée par des filons de pyroxénite et de gabbro. Partie encaissée de la lavaka.	0.101	-0.029	0.810
-22.2956	166.6829	21/10/2010	BS_2010_496	Dunite saprolitisée recoupée par quelques filons de pyroxénite.	0.100	0.030	0.518
-22.2956	166.6830	21/10/2010	BS_2010_497	Filon métrique de pyroxénite-gabbro encaissé dans de la dunite saprolitisée.	0.078	0.100	0.934
-22.2955	166.6833	21/10/2010	BS_2010_498	Latérite colluvionnéeà éléments plus grossier du type pyroxénite et dunites.	0.061	0.198	0.980
-22.2954	166.6835	21/10/2010	BS_2010_499	Latérite colluvionnée sur les bords de la lavaka et blocs de pyroxénites et dunites au centre.	0.080	0.162	0.877
-22.2953	166.6836	21/10/2010	BS_2010_500	Saprolite avec des filons de pyroxénites et des blocz de dunites.	0.099	0.010	0.650
-22.2953	166.6837	21/10/2010	BS_2010_501	Sable et blocs de pyroxénites et dunites.	0.105	0.164	0.718
-22.2951	166.6838	21/10/2010	BS_2010_502	Dunite en roche.	0.059	0.179	0.562
-22.2952	166.6839	21/10/2010	BS_2010_503	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée.	0.115	0.154	1.007
-22.2955	166.6837	21/10/2010	BS_2010_504	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée.	0.082	0.295	1.182
-22.2957	166.6835	21/10/2010	BS_2010_505	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée.	0.077	0.235	1.029
-22.2960	166.6834	21/10/2010	BS_2010_506	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée. Présence de blocs.	0.084	0.293	0.842
-22.2961	166.6833	21/10/2010	BS_2010_507	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée. Présence de blocs.	0.071	0.230	0.899
-22.2964	166.6831	21/10/2010	BS_2010_508	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée. Présence de blocs.	0.061	0.198	0.980
-22.2966	166.6829	21/10/2010	BS_2010_509	Replat latéritique: latérite rouge, latérite colluvionnée et cuirasse démantelée. Présence de blocs.	0.090	0.130	1.010
-22.2953	166.6843	28/10/2010	BS_2010_510	Creek encaissé avec des blocs de dunite et de pyroxénite.	0.087	0.168	0.955

-22.2953	166.6842	28/10/2010	BS_2010_511	Dunite saine et latérite colluvionnée.	0.069	0.073	1.093
-22.2955	166.6841	28/10/2010	BS_2010_512	Latérite colluvionnée dans lavaka encaissée.	0.062	0.334	1.023
-22.2956	166.6839	28/10/2010	BS_2010_513	Latérite colluvionnée avec écroulement sur le bord de la lavaka.	0.067	0.064	1.330
-22.2957	166.6838	28/10/2010	BS_2010_514	Latérite colluvionnée dans une zone encaissée.	0.068	0.131	0.906
-22.2959	166.6837	28/10/2010	BS_2010_515	Filon de pyroxénite démantelée.	0.093	0.255	0.896
-22.2960	166.6836	28/10/2010	BS_2010_516	Filon de pyroxénite démantelée.	0.071	0.230	0.951
-22.2961	166.6835	28/10/2010	BS_2010_517	Filon de gabbro altéré (blanc).	0.089	0.115	0.722
-22.2962	166.6834	28/10/2010	BS_2010_518	Filon de pyroxénites plurimétriques.	0.130	0.083	0.749
-22.2963	166.6834	28/10/2010	BS_2010_519	Filon de gabbro altéré (rouge/blanc).	0.141	0.094	0.853
-22.2964	166.6833	28/10/2010	BS_2010_520	Latérite colluvionnée sur la fin de la lavaka.	0.078	0.081	0.961
-22.2953	166.6845	28/10/2010	BS_2010_521	Latérite colluvionnée dans un creek encaissé.	0.051	0.424	0.808
-22.2966	166.6833	28/10/2010	BS_2010_522	Latérite colluvionnée.	0.075	0.064	0.779
-22.2965	166.6834	28/10/2010	BS_2010_523	Latérite colluvionnée.	0.084	-0.031	0.916
-22.2964	166.6834	28/10/2010	BS_2010_524	Gros filon de gabbro blanc.	0.077	0.083	0.804
-22.2964	166.6834	28/10/2010	BS_2010_525	Gros filon de gabbro blanc.	0.171	0.189	0.714
-22.2968	166.6831	28/10/2010	BS_2010_526	Replat de latérite rouge et de latérite colluvionnée.	0.063	0.154	1.560
-22.2970	166.6832	28/10/2010	BS_2010_527	Replat de latérite rouge et de latérite colluvionnée.	0.076	0.270	0.686
-22.2973	166.6832	28/10/2010	BS_2010_528	Latérite et blocs de pyroxénite.	0.099	0.117	1.010
-22.3039	166.6762	28/10/2010	BS_2010_529	Filon de gabbro plurimétrique.	0.098	0.220	0.741
-22.3037	166.6742	28/10/2010	BS_2010_530	Filon de gabbro altéré (blanc).	0.158	0.069	0.854
-22.3021	166.6716	28/10/2010	BS_2010_531	Filon de gabbro altéré (blanc).	0.136	0.199	0.924
-22.2950	166.6831	28/10/2010	BS_2010_532	Latérite colluvionnée jaune.	0.086	0.103	0.671
-22.2951	166.6831	28/10/2010	BS_2010_533	Latérite colluvionnée jaune.	0.078	0.123	1.037
-22.2952	166.6829	28/10/2010	BS_2010_534	Latérite colluvionnée et filon de pyroxénite altéré de taille métrique	0.096	0.188	0.770
-22.2953	166.6828	28/10/2010	BS_2010_535	Latérite colluvionnée et filon de pyroxénite altéré de taille métrique	0.081	-0.046	1.127
-22.2954	166.6828	28/10/2010	BS_2010_536	Filon de gabbro altéré blanc/rouge	0.149	0.089	0.722
-22.2955	166.6827	28/10/2010	BS_2010_537	Latérite colluvionnée plutât jaune.	0.054	0.136	1.037
-22.2955	166.6826	28/10/2010	BS_2010_538	Latérite colluvionnée.	0.051	0.257	1.291
-22.2959	166.6829	28/10/2010	BS_2010_539	Replat de latérite colluvionnée.	0.054	0.291	1.053
-22.2955	166.6833	28/10/2010	BS_2010_540	Latérite colluvionnée et dunite saprolitisée.	0.083	0.070	0.804
-22.2956	166.6833	28/10/2010	BS_2010_541	Filon de gabbro altéré dans de la dunite saprolitisée	0.088	0.169	0.850
-22.2957	166.6833	29/10/2010	BS_2010_542	Latérite colluvionnée et blocs de dunite et de pyroxénite.	0.072	0.170	0.798
-22.2959	166.6833	29/10/2010	BS_2010_543	Mur de pyroxénite saine.	0.068	0.170	0.746
-22.2959	166.6832	29/10/2010	BS_2010_544	Dunite saine et blocs de saprolite.	0.080	0.158	0.746

-22.2961	166.6831	29/10/2010	BS_2010_545	Filon de gabbro/pyroxénite métrique encaissé dans de la dunite saprolitisée.	0.104	0.012	0.991
-22.2962	166.6830	29/10/2010	BS_2010_546	Affleurement de pyroxénite de dunite rocheuse.	0.064	0.098	1.092
-22.2963	166.6828	29/10/2010	BS_2010_547	Alternance de dunite, de dunite saprolitisée et de blocs de pyroxénite.	0.070	0.165	0.667
-22.2964	166.6827	29/10/2010	BS_2010_548	Pyroxénites sur ancienne piste.	0.083	0.077	0.725
-22.2966	166.6825	29/10/2010	BS_2010_549	Pyroxénites et dunites saines.	0.055	0.279	0.503
-22.2967	166.6824	29/10/2010	BS_2010_550	Pyroxénites, dunites saines et saprolites.	0.071	0.166	0.562
-22.2968	166.6823	29/10/2010	BS_2010_551	Pyroxénites et blocs de dunites.	0.099	-0.090	1.208
-22.2968	166.6822	29/10/2010	BS_2010_552	Replats avec des remblais de dunites et de pyroxénites.	0.060	0.317	0.893
-22.2969	166.6821	29/10/2010	BS_2010_553	Filons de pyroxénite/gabbro métrique et dunite saine.	0.069	0.211	0.979
-22.2970	166.6821	29/10/2010	BS_2010_554	Dunite saine.	0.048	0.293	0.843
-22.2971	166.6820	29/10/2010	BS_2010_555	Filon de gabbro riche en amphiboles et pyroxénites.	0.096	0.093	0.960
-22.2972	166.6819	29/10/2010	BS_2010_556	Filon de gabbro altéré et dunite saprolitisée.	0.094	0.215	0.611
-22.2974	166.6818	29/10/2010	BS_2010_557	Piste avec des blocs et de la latérite colluvionnée. A proximité se trouve un filon de gabbro.	0.070	0.213	0.821
-22.2971	166.6833	29/10/2010	BS_2010_558	Replat latéritique.	0.062	0.202	0.718
-22.2970	166.6836	29/10/2010	BS_2010_559	Replat latéritique.	0.043	0.373	0.969
-22.2969	166.6837	29/10/2010	BS_2010_560	Replat latéritique.	0.064	0.330	0.892
-22.2967	166.6838	29/10/2010	BS_2010_561	Replat latéritique.	0.079	0.303	1.051
-22.2965	166.6837	29/10/2010	BS_2010_562	Replat latéritique.	0.072	0.334	1.075
-22.2962	166.6837	29/10/2010	BS_2010_563	Replat latéritique.	0.089	0.232	1.291
-22.2960	166.6838	29/10/2010	BS_2010_564	Replat latéritique.	0.082	0.391	1.936
-22.2957	166.6840	29/10/2010	BS_2010_565	Replat latéritique.	0.060	0.558	1.506
-21.4664	165.4884	30/10/2010	BS_2010_566	Lame de serpentinites. Affleurement de route.	0.110	1.440	1.943
-21.4661	165.4885	30/10/2010	BS_2010_567	Isaltérites de Boghen. Affleurement de route.	1.375	1.462	5.007
-21.3415	165.4243	30/10/2010	BS_2010_568	Boghen noire saine.	1.898	2.417	6.860
-21.2926	165.5927	30/10/2010	BS_2010_569	Latérite rouge colluvionnée.	0.149	0.294	1.232
-21.2744	165.6182	30/10/2010	BS_2010_570	Lame de serpentinites. Affleurement de route.	0.143	0.156	0.848
-21.2747	165.6181	30/10/2010	BS_2010_571	Harzburgite saine mais serpentinisée.	0.173	0.354	1.384
-21.2049	165.5719	30/10/2010	BS_2010_572	Chert noir sain.	0.647	1.831	2.758
-20.4896	164.7445	01/11/2010	BS_2010_573	Micaschiste avec lits quartzofeldspathique et micacé.	0.982	1.377	5.082
-20.4896	164.7445	01/11/2010	BS_2010_574	Filon de quartz.	1.127	1.465	5.908
-20.2968	164.4707	01/11/2010	BS_2010_575	Isaltérite de roche bleue cataclaséeà micas.	0.895	1.382	6.710
-20.2674	164.4202	01/11/2010	BS_2010_576	Schiste bleu près de la plage.	1.219	1.971	6.080
-20.2789	164.4229	01/11/2010	BS_2010_577	Schiste bleuà glaucophane.	0.642	1.901	4.064
-20.3002	164.4193	01/11/2010	BS_2010_578	Micaschistes.	2.237	1.332	6.578

-20.3283	164.4266	01/11/2010	BS_2010_579	Schiste sulfuréà l'entrée du chemin.	4.803	1.783	7.460
-20.3449	164.4261	01/11/2010	BS_2010_580	Siltites micacées.	1.525	1.702	5.613
-20.7073	164.4272	01/11/2010	BS_2010_581	Alluvions de péridotites ou/et basaltes.	0.362	0.498	1.733
-20.6926	164.4227	01/11/2010	BS_2010_582	Isaltérites de basalte de Poya.	0.359	0.405	1.714
-20.6825	164.4233	01/11/2010	BS_2010_583	Alluvions avec des galets de cherts noirs et de grès.	0.322	0.753	2.190
-20.6603	164.4051	01/11/2010	BS_2010_584	Serpentinite.	0.069	0.405	0.835
-20.6665	164.3894	01/11/2010	BS_2010_585	Basalte de Poya avec des argiles rouhes.	0.541	0.315	1.371
-20.6665	164.3894	02/11/2010	BS_2010_586	Basalte de Poya (et dolérite?)	0.316	0.190	1.048
-20.6581	164.3759	02/11/2010	BS_2010_587	Péridotite serpentinisée et serpentinite.	0.122	0.432	1.171
-20.6071	164.3242	02/11/2010	BS_2010_588	Roche blanche altérée, dolérite ou serpentinite.	0.243	0.300	1.699
-20.5781	164.3023	02/11/2010	BS_2010_589	Flysch carbonaté.	0.470	0.976	3.112
-20.4733	164.2222	02/11/2010	BS_2010_590	Harzburgite serpentinisée.	0.045	0.176	0.825
-20.4733	164.2221	02/11/2010	BS_2010_591	Harzburgite saprolitisée.	0.062	0.308	0.632
-20.4732	164.2220	02/11/2010	BS_2010_592	Latérite jaune-rougeâtre.	0.062	0.030	1.018
-20.4731	164.2219	02/11/2010	BS_2010_593	Latérite jaune-rougeâtre.	0.069	-0.006	0.967
-20.4728	164.2219	02/11/2010	BS_2010_594	Saprolite sombre avec nontronites.	0.072	0.073	1.093
-20.4726	164.2220	02/11/2010	BS_2010_595	Harzburgite serpentinisée.	0.061	0.193	0.902
-20.4726	164.2224	02/11/2010	BS_2010_596	Saprolite noirâtre.	0.050	0.260	1.029
-20.4726	164.2226	02/11/2010	BS_2010_597	Saprolite riche en garniérite.	0.059	0.193	0.954
-20.4726	164.2228	02/11/2010	BS_2010_598	Saprolite nickélifère.	0.049	0.231	0.900
-20.4725	164.2230	02/11/2010	BS_2010_599	Saprolite très sombre.	0.068	-0.002	1.098
-20.4725	164.2231	02/11/2010	BS_2010_600	Latérite jaune-rougeâtre.	0.053	0.132	0.854
-20.4725	164.2232	02/11/2010	BS_2010_601	Saprolite sombre.	0.052	0.181	0.903
-20.4726	164.2235	02/11/2010	BS_2010_602	Dunite peu serpentinisée.	0.054	0.155	0.957
-20.4725	164.2236	02/11/2010	BS_2010_603	Saprolite vardâtre.	0.051	0.224	0.926
-20.4725	164.2238	02/11/2010	BS_2010_604	Latérite jaune.	0.068	0.183	0.745
-20.4725	164.2241	02/11/2010	BS_2010_605	Latérite colluvionnée jaunâtre.	0.041	0.157	1.298
-20.4725	164.2244	02/11/2010	BS_2010_606	Filon de gabbro violacée et blanc, décimétrique.	0.080	0.060	1.094
-20.4725	164.2245	02/11/2010	BS_2010_607	Filon de gabbro violacée et blanc, métrique.	0.059	0.200	0.875
-20.4727	164.2246	02/11/2010	BS_2010_609	Filon de gabbro altéré, rose-jaunâtre.	0.088	0.175	0.823
-20.4729	164.2253	02/11/2010	BS_2010_610	Niveau sombreà matière organique et sulfures.	0.065	0.114	0.776
-20.4745	164.2174	02/11/2010	BS_2010_611	Niveau sombreà matière organique et sulfures (millérite).	0.061	0.147	0.590
-20.4701	164.2250	02/11/2010	BS_2010_612	Latérite jaune.	0.073	0.188	1.269
-20.4702	164.2248	02/11/2010	BS_2010_613	Ciurassement intermédiaire (pas encore le stade de cuirasse).	0.048	0.226	1.267
-20.4706	164.2247	02/11/2010	BS_2010_614	Latérite jaune.	0.082	0.280	0.895
-20.4707	164.2245	02/11/2010	BS_2010_615	Pisolithes sur cuirasse.	0.060	0.427	1.096
-20.4792	164.2260	02/11/2010	BS_2010_616	Cuirasse.	0.053	0.607	1.608

-20.4793	164.2259	02/11/2010	BS_2010_617	Niveau pisolithique.	0.055	0.604	1.818
-20.4794	164.2256	02/11/2010	BS_2010_618	Latérite jaune.	0.056	0.159	0.642
-20.4794	164.2255	02/11/2010	BS_2010_619	Saprolite très mince.	0.096	0.077	0.777
-20.4795	164.2253	02/11/2010	BS_2010_620	Saprolite mince.	0.050	0.157	0.852
-20.4795	164.2251	02/11/2010	BS_2010_621	Péridotite serpentinisée.	0.067	0.181	0.850
-20.4796	164.2251	03/11/2010	BS_2010_622	Saprolite verdâtre.	0.064	0.081	0.909
-20.4796	164.2250	03/11/2010	BS_2010_623	Latérite jaune.	0.046	0.168	0.904
-20.4797	164.2248	03/11/2010	BS_2010_624	Saprolite terreuse.	0.085	0.089	0.777
-20.4798	164.2247	03/11/2010	BS_2010_625	Saprolite et harzburgite saine.	0.046	0.100	0.935
-20.4798	164.2245	03/11/2010	BS_2010_626	Latérite jaune structurée.	0.082	0.265	0.608
-20.4798	164.2244	03/11/2010	BS_2010_627	Giobertite.	0.056	0.238	0.820
-20.4798	164.2242	03/11/2010	BS_2010_628	Latérite jaune.	0.078	0.102	0.724
-20.4799	164.2241	03/11/2010	BS_2010_629	Giobertite dans la latérite.	0.054	0.232	0.742
-20.4437	164.2057	03/11/2010	BS_2010_630	Mesure influence de la voiture (avec) sur pisolithes et cuirasse.	0.039	0.320	1.235
-20.4437	164.2057	03/11/2010	BS_2010_630 b hors voiture	Mesure influence de la voiture (sans) sur pisolithes et cuirasse.	0.061	0.412	1.254
-20.4396	164.1957	03/11/2010	BS_2010_631	Replat pisolithique.	0.052	0.690	1.367
-20.4393	164.1955	03/11/2010	BS_2010_632	Latérite rouge.	0.042	0.316	1.550
-20.4389	164.1956	03/11/2010	BS_2010_633	Piste avec pisolithes.	0.046	0.507	1.615
-20.4384	164.1953	03/11/2010	BS_2010_634	Piste avec pisolithes.	0.063	0.378	1.047
-20.4378	164.1951	03/11/2010	BS_2010_635	Piste avec pisolithes.	0.124	0.074	1.431
-20.4374	164.1945	03/11/2010	BS_2010_636	Piste avec pisolithes.	0.101	0.038	1.382
-20.4369	164.1945	03/11/2010	BS_2010_637	Piste avec pisolithes.	0.087	0.282	1.236
-20.4365	164.1948	03/11/2010	BS_2010_638	Piste avec des éléments de péridotite serpentinisée.	0.063	0.193	1.400
-20.4359	164.1945	03/11/2010	BS_2010_639	Replatà pisolithes.	0.073	0.696	1.392
-20.4353	164.1948	03/11/2010	BS_2010_640	Replatà pisolithes.	0.084	0.354	1.939
-20.4348	164.1943	03/11/2010	BS_2010_641	Replatà pisolithes.	0.072	0.577	2.474
-20.4346	164.1937	03/11/2010	BS_2010_642	Replatà pisolithes.	0.080	0.576	2.081
-20.4334	164.1904	04/11/2010	BS_2010_643	Replatà pisolithes.	0.075	0.105	0.960
-20.4333	164.1904	04/11/2010	BS_2010_644	Oxyde de manganèse et de cobalt.	0.096	0.025	1.384
-20.4332	164.1905	04/11/2010	BS_2010_645	Tas de saprolite serpentinisée.	0.084	0.130	1.010
-20.4856	164.1898	04/11/2010	BS_2010_646	Filon pegmatitique totalement mylonitisée.	0.082	0.176	0.771
-20.4854	164.1900	04/11/2010	BS_2010_647	Filon pegmatitique bien blanc.	0.120	0.252	1.158
-20.4854	164.1900	04/11/2010	BS_2010_648	Serpentinite de la semelle.	0.079	0.283	0.633
-21.0448	164.8795	04/11/2010	BS_2010_649	Basalte bleu très sain, olivine bien visible.	0.265	0.263	1.203
-21.3379	164.9793	04/11/2010	BS_2010_650	Calcaire miocène de Népoui.	0.081	0.661	0.738
-21.3170	165.0027	04/11/2010	BS_2010_651	Conglomérat silicifié de Népoui.	0.092	0.683	2.388
-21.3316	164.9874	04/11/2010	BS_2010_652	Conglomérat silicifié de Népoui.	0.122	0.231	0.844
-21.4725	165.3495	04/11/2010	BS_2010_653	Isaltérite de basalte.	0.238	0.080	0.954
-21.9026	166.0699	04/11/2010	BS_2010_654	Chert noir sain.	0.989	1.594	4.149

-21.9033	166.0697	04/11/2010	BS_2010_655	Isaltérite de chert.	1.114	1.374	3.739
-21.9018	166.0795	04/11/2010	BS_2010_656	Isaltérite de mamelon rouge.	0.863	3.332	4.745
-21.9264	166.0180	04/11/2010	BS_2010_657	Grauwacke de Téremba.	1.562	0.683	2.194
-21.9416	166.0315	05/11/2010	BS_2010_658	Calcaire de Uitoé.	0.329	0.743	1.980
-21.8023	166.0709	05/11/2010	BS_2010_659	Brècheà cherts et micrite.	0.761	0.934	2.368
-22.2615	166.4577	08/11/2010	BS_2010_660	Flysch volcanoclastique.	0.874	0.484	2.053
-22.2774	166.4799	08/11/2010	BS_2010_661	Flysch carbonaté.	0.856	0.859	3.366
-22.2661	166.4472	08/11/2010	BS_2010_662	Brèche de la série du flysch volcanoclastique.	0.822	1.023	3.199
-22.2680	166.4217	08/11/2010	BS_2010_663	Filons hydrothermaux.	0.668	0.475	2.403

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

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Technologie