



Compte rendu de résultats de la cartographie gamma par voie aérienne de l'atoll de HAO



Rapport n°05/2000, paru le 20 avril 2000

Christian BOURGEOIS
Jean-Claude BROUDIEU
Ludovic GUILLOT
Sébastien GUTIERREZ
Michel METTE



Compte rendu de résultats de la cartographie gamma par voie aérienne de l'atoll de HAO

Christian BOURGEOIS
Jean-Claude BROUDIEU
Ludovic GUILLOT
Sébastien GUTIERREZ
Michel METTE

Sommaire

ı.	U	JBJECTIFS	6
2.	P	PRINCIPE DE LA MESURE	7
3.	M	MATÉRIEL MIS EN OEUVRE	10
	3.1.	ACQUISITION DES MESURES	10
	3.2.	TRAITEMENT DES DONNÉES	10
4.	C	CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	12
	4.1.	CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	12
	4.2.	PARAMÈTRES DE VOL	12
	4.3.	PARAMÈTRES DE MESURE RADIOLOGIQUE	12
	4.4.	POSITIONNEMENT GÉOGRAPHIQUE	13
5.	T	FRAITEMENT DES MESURES	14
	5.1.	MESURES BRUTES	14
	5.2.	ANALYSE SPECTRALE	14
	5.3.	CALIBRATION	15
	5.4.	Bruit de fond	16
	5.	5.4.1. Origines du bruit de fond	16
	5.	5.4.2. Mesure du bruit de fond	17
	5.	5,4.3. Conclusion	20
6.	R	RÉSULTATS DU SURVOL DE L'ATOLL	21
	6.1.	Trajectoire	21
	6.2.	COMPTAGE TOTAL	21
	6.3.	RADIOÉLÉMENTS NATURELS	24
	6.4.	CÉSIUM 137	30
	6.5.	RECHERCHE D'ÉLÉMENTS NON NATURELS À BASSE ÉNERGIE	31
7.	. C	CONCLUSION	35
8.	R	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	36

Remerciements

Pour réaliser cette opération, nous avons bénéficié du support logistique de la Marine Nationale avec la Frégate de Surveillance, le Vendémiaire qui dispose d'une plate-forme hélicoptère avec une Alouette III.

Nous tenons à remercier pour sa disponibilité, son accueil et sa gentillesse tout l'équipage de ce navire et en particulier son commandant, le C.F. O. Saint-Martin.

Le succès de cette opération résulte également du professionnalisme, de la compétence et de la disponibilité de tous les instants de l'ensemble de l'unité "aéro", pilotes et mécaniciens qu'ils trouvent ici témoignage de notre satisfaction d'avoir travaillé ensemble à la bonne réalisation de cette mission.



Introduction

Le Commissariat à l'Energie Atomique a développé un équipement de cartographie gamma aéroporté appelé HELINUC¹. Le principe de la mesure consiste à effectuer avec les moyens appropriés et à bord d'un hélicoptère, l'acquisition simultanée d'un spectre gamma et de la position dans l'espace de l'aéronef. Les données acquises en vol sont traitées au sol avec un système informatique spécialisé et restituées sous forme de cartographies en fausses couleurs représentatives des niveaux d'activités.

HELINUC permet d'établir en quelques heures un diagnostic radiologique dans un périmètre de quelques kilomètres carrés à quelques centaines de kilomètres carrés en identifiant les radioéléments présents avec une sensibilité allant du niveau de la radioactivité naturelle à celui d'une situation accidentelle grave.

HELINUC est également utilisable pour la recherche et la localisation rapide de sources radioactives ponctuelles.

L'équipe HELINUC maintient le système opérationnel de façon permanente par la participation à des exercices ou à des campagnes de surveillance de l'environnement autour de sites nucléaires ou industriels, civils et militaires.

¹ Marque déposée

1. Objectifs

La cartographie du site de l'atoll de Hao - Cf. Figure 1-, situé dans le Pacifique Sud par 18° de latitude sud et 141° de longitude ouest à quelques 600 kilomètres au sud-est de Tahiti, dans l'archipel des Tuamotu, a été effectuée avec l'objectif de réaliser un contrôle radiologique par voie héliportée aussi complet que possible des restes des anciennes installations de la base arrière de la DIRCEN.

Les mesures ont été effectuées entre le 16 et le 18 novembre 1999.

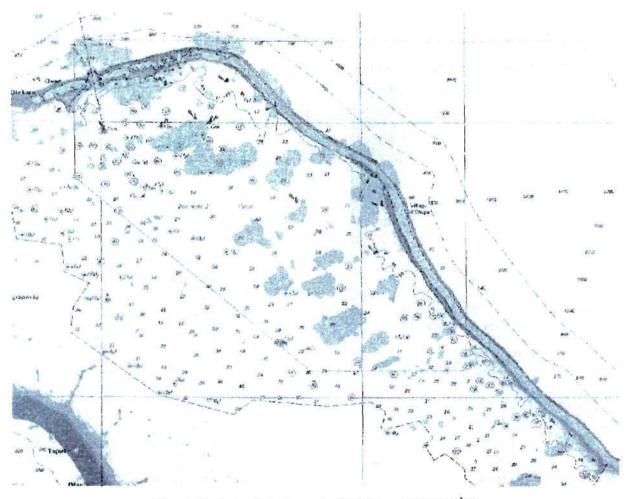


Figure 1: Extrait de la carte SHOM au 1/100000ème.

2. Principe de la mesure

La cartographie d'un site est effectuée à partir d'une succession de mesures dont le temps d'acquisition varie de une à trois secondes. Le dispositif de détection est composé d'un pack de quatre cristaux d'iodure de sodium d'un volume total de 16 litres. La gestion de la mesure est assurée par un spectromètre aéroporté GR-820 "Exploranium". Celui-ci fournit un spectre codé sur 512 canaux de 30 à 2800 keV. La stabilisation en énergie du spectromètre est réalisée de façon automatique en contrôlant en permanence la position d'un pic d'absorption d'un radioélément naturel, en général le potassium ou le thorium. A la fin de chaque mesure le spectre complet accompagné de la position moyenne (X, Y, Z) de l'hélicoptère pendant la mesure est sauvegardé dans une mémoire de masse par un calculateur.

La zone à survoler est divisée en profils équidistants représentant la trajectoire idéale de l'hélicoptère (Figure 2). L'écart entre deux trajectoires ou profils, l'altitude et la vitesse de l'hélicoptère sont définis au préalable en fonction de la limite de détection souhaitée et du temps de vol dont on dispose pour couvrir la zone. Ces paramètres sont contrôlés en permanence par l'opérateur et le pilote de l'hélicoptère.

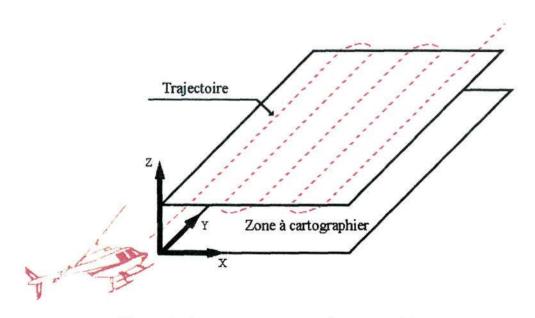


Figure 2 : Couverture de la zone à cartographier.

La position de l'hélicoptère (latitude et longitude) est mesurée à tout instant par un dispositif G.P.S. différentiel temps réel "Trimble".

Le système NAVSTAR-G.P.S. (NAVigation System with Time And Ranging-Global Positionning System) est un système de positionnement par satellites. Avec une constellation de 24 satellites défilant autour du globe (Figure 3), le système G.P.S. fournit par triangulation la latitude, la longitude et l'altitude. Il est utilisable sur toute la surface terrestre, avec une exception pour les régions polaires.

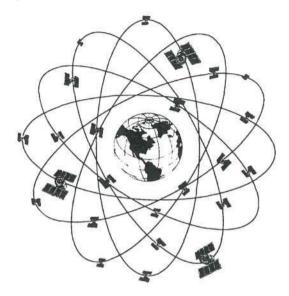


Figure 3: Couverture G.P.S. du globe.

Le positionnement par satellite repose sur le principe de la triangulation : connaissant les distances séparant un point quelconque - l'hélicoptère - de trois autres - les satellites - dont les éphémérides sont connues, on en déduit la position de l'hélicoptère - Cf. Figure 4 -. Les signaux émis par les satellites sont captés par le récepteur embarqué à bord de l'hélicoptère.

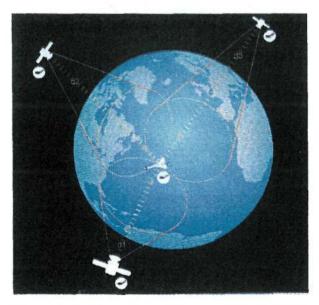


Figure 4 : Schéma de positionnement par G.P.S.

Les distances entre chacun des satellites et l'hélicoptère sont calculées par le récepteur de bord qui utilise le temps de propagation du signal émis par les satellites. La mesure du temps n'est possible qu'à la condition sine qua non que les émetteurs des satellites et le récepteur de l'hélicoptère soient synchrones. Dans la réalité, les bases de temps n'étant pas identiques, la détermination de la position requiert la réception de 4 satellites.

L'altitude fournie par le G.P.S. n'étant pas suffisamment précise, une radiosonde "TRT/Thomson" est utilisée. L'altitude de consigne est généralement de 40 mètres, mais peut être comprise entre 20 et 300 mètres.

3. Matériel mis en oeuvre

3.1. Acquisition des mesures

Les mesures sont acquises en vol avec un système embarqué composé de :

- 1. Un caisson fixé sous l'hélicoptère et contenant :
 - o un détecteur NaI d'un volume de 16 litres,
 - une radiosonde et ses deux antennes.
- 2. Une baie d'acquisition comprenant :
 - un spectromètre 512 canaux,
 - un micro ordinateur de type PC durci,
 - o une unité de disque dur amovible "IOMEGA Bernoulli",
 - un système de positionnement G.P.S. différentiel temps réel (fréquence de transmission des corrections 136 MHz).
- 3. Un boîtier d'aide à la navigation placé face au pilote.
- 4. Un répétiteur d'altitude également face au pilote.
- De supports adéquats qui s'adaptent sur les points d'ancrage propres à l'hélicoptère et qui ont fait l'objet d'une certification aéronautique sur les hélicoptères de type Alouette III SA 319B.

Nous avons utilisé une Alouette III de la Marine Nationale dont le numéro de série est 2303, l'immatriculation marine 303 et l'immatriculation internationale F-XCGZ. Voir photo en Figure 5.

3.2. Traitement des données

Le traitement des données est effectué au sol au moyen d'un micro-ordinateur, d'un scanner et d'une imprimante. Les logiciels d'acquisition et de traitements des données ont été développés spécialement par l'équipe Hélinuc.



Figure 5 : Alouette III équipée à l'apontage.

4. Conditions expérimentales

4.1. Conditions météorologiques

• Temps : globalement ensoleillé,

Température : 25 à 30°,

Hygrométrie : de l'ordre de 50 %.

4.2. Paramètres de vol

Vitesse: 70 km/h (environ 20 m/s),

Altitude: 40 mètres,

• Déport (écart entre 2 profils contigus) : 40 et 80 mètres,

Cap: se reporter au tableau.

L'atoll a été divisé en quatre zones de survol dont les différents paramètres sont résumés dans le tableau suivant :

Zone	Cap	Longueur des profils	Ecart entre profils	Nombre de mesures	Nombre de profils
Passe	74° et 254°	6750 m	80 m	1645	10
Piste	128° et 308°	9150 m	80 m	3718	16
Village Otepa	152° et 332°	6375 m	40 m	2834	26
Sud Otepa	135° et 315°	9000 m	80 m	1175	8

Le temps de vol total y compris les tests et les allers-retours depuis le bateau amarré au port de l'atoll de Hao a été de 8 heures et 24 minutes, le temps total de vol "mesures" de 5 heures et 13 minutes.

4.3. Paramètres de mesure radiologique

• Temps d'acquisition : 2 secondes,

• Plage énergétique de mesure : 30 à 2800 keV,

- Stabilisation automatique en énergie calée sur le pic à 1461 keV du ⁴⁰K au canal 254,
- Etalonnage en énergie réalisé avec du ⁴⁰K contenu dans le KCl que nous avions apporté de métropole (environ 2 kg).

4.4. Positionnement géographique

Les coordonnées sphériques (ellipsoïde W.G.S. 84) fournies par le G.P.S. sont transformées dans l'ellipsoïde international en coordonnées rectangulaires selon une projection de Mercator Transverse Universelle (U.T.M.), fuseau n°7.

Avec un G.P.S. différentiel temps réel, l'erreur sur le positionnement des mesures n'est que de quelques mètres.

Nous avons utilisé la carte du Service Hydrographique de la Marine (SHOM) n°6579, à l'échelle 1/100000ème.

Préalablement digitalisée, la carte géographique apparaît en transparence sur chaque cartographie. Dans le coin inférieur gauche, deux tirets de couleur rouge indiquent l'échelle de la cartographie en X et Y.

5. Traitement des mesures

Le traitement des mesures qui s'effectue au sol a pour but de mettre en évidence tout ajout de radioactivité artificielle. Ce traitement nécessite l'utilisation de méthodes d'analyses spécifiques. Il nous a paru néanmoins utile de rappeler succinctement leurs principes et les paragraphes suivants ont pour but d'expliciter brièvement les méthodes d'interprétation qualitatives et quantitatives mises en œuvre pour tirer le meilleur parti des données acquises.

Le bilan des activités naturelles présentes sur le site : familles uranium 238, thorium 232 et potassium qui se caractérise par un seul radioélément le potassium 40 est présenté en premier.

En connaissant les variations du fond d'origine naturelle, on met alors plus facilement en évidence les anomalies radiologiques.

Les résultats sont fournis sous forme de cartographies faisant apparaître la contribution des différents radioéléments selon une échelle de couleurs représentatives des niveaux d'activités.

5.1. Mesures brutes

La première étape du dépouillement consiste à examiner les variations du comptage, tous radioéléments confondus. Le traitement des mesures débute donc par la cartographie du comptage intégré entre 40 et 2800 keV (Cf. cartographie page 23). Les mesures sont exprimées en coups par seconde normalisés à l'altitude de référence du survol; 40 mètres dans le cas du site de l'atoll d'Hao.

D'une façon générale, l'examen de cette cartographie permet de déterminer très rapidement la présence d'anomalies notables vis-à-vis du fond radiologique.

5.2. Analyse spectrale

• 1ère méthode : déconvolution spectrale par fenêtres énergétiques

La méthode de déconvolution par fenêtres énergétiques est la méthode de référence pour l'analyse des mesures aéroportées. Cette méthode est très sensible mais nécessite une connaissance préalable de tous les radioéléments présents sur le site et une calibration très précise pour chaque corps. (Cf. chapitre 5.3). Cette méthode est en particulier utilisée pour mettre en évidence de très faibles teneurs en radioéléments naturels et pour rechercher la présence éventuelle de césium et de cobalt.

* 2ème méthode : déconvolution globale à basse énergie

La méthode de déconvolution par fenêtres énergétiques (1ère méthode) engendre des incertitudes très importantes à basse énergie et ne permet pas d'atteindre des limites de détection satisfaisantes. Une deuxième méthode consistant à évaluer globalement le fond de diffusion à basse énergie a été utilisée pour détecter des émetteurs à basse ou moyenne énergie. Un coefficient de déconvolution correspondant au rapport entre le comptage intégré entre 50 et 110 keV et celui entre 300 et 2800 keV est calculé pour chaque spectre. La moyenne de ce coefficient propre à ce site est utilisée pour soustraire le fond à basse énergie de chaque mesure. Cette méthode permet une mise en évidence des anomalies ponctuelles à condition que le fond naturel soit sensiblement uniforme sur la zone survolée, ce qui est généralement le cas. L'interprétation de cette cartographie est difficile et complexe, elle nécessite l'analyse préalable des cartographies "familles naturelles".

La cartographie "basses énergies" - voir page 33 - représente les variations du comptage résiduel à basse énergie. En fonction de l'énergie d'émission gamma des radioéléments artificiels présents, la cartographie basse énergie peut évoluer de manière très différente. Par exemple :

- La présence de raies à très basse énergie comme les raies à 63 et 93 keV de ²³⁴Th, descendant de ²³⁸U ou à 59 keV de ²⁴¹Am, descendant de ²⁴¹Pu se traduit par une augmentation très nette du comptage résiduel. Cette méthode sera donc utilisée dans le cas présent pour détecter la présence d'uranium non naturel ou de plutonium.
- Des émetteurs dont l'énergie moyenne de leur contribution spectrale est inférieure à la contribution naturelle peuvent également être mis en évidence par cette méthode. Par exemple, la présence d'une activité ¹³⁷Cs ponctuelle engendre un accroissement du comptage résiduel entre 50 et 110 keV.

La mise en évidence et l'identification d'émetteurs à basse énergie est délicate en raison de la globalité de la méthode. On se trouve souvent dans le cas typique où une mesure complémentaire par spectrométrie haute résolution au sol doit être effectuée.

Deux niveaux d'interprétation différents sont normalement fournis : mesures brutes et interprétations quantitatives des radioéléments détectés.

5.3. Calibration

Un dispositif expérimental de simulation des conditions de survol d'une surface active a été réalisé au laboratoire afin d'étudier l'évolution des profils spectraux avec l'altitude de détection. La surface active est simulée par un maillage de sources ponctuelles et l'atmosphère entourant le détecteur en vol est reproduite par des écrans en "Isorel" (panneaux de bois). L'influence de l'extension verticale des termes source dans le sol est ensuite établie numériquement par méthode de Monte-Carlo. Cette méthode de calibration originale permet d'obtenir en laboratoire l'ensemble des données nécessaires à l'analyse qualitative et quantitative des mesures. Le bruit de fond de l'appareillage ainsi que le bruit de fond

cosmique sont déterminés par des vols au dessus de la mer. Ces techniques de calibration ont été validées en vol ces dernières années, et en particulier au cours d'un exercice international d'intercomparaison des moyens de spectrométrie aéroportés en août 1995 (<u>BOURGEOIS</u> & AL, 1996).

Ces différentes méthodes de traitement permettent d'obtenir des cartographies représentatives des variations d'activité de chaque radioélément détecté.

5.4. Bruit de fond

Les taux de comptage enregistrés sur les atolls du Pacifique sont extrêmement bas, en regard des mesures effectuées en métropole, aussi une attention particulière a été portée à la mesure du bruit de fond naturel local et du bruit de fond intrinsèque du dispositif de mesure.

5.4.1. Origines du bruit de fond

Les mesures acquises en vol sont révélatrices des photons gamma émis par le sol, mais comportent également des contributions supplémentaires qui proviennent du rayonnement cosmique, de l'activité atmosphérique, du bruit de fond généré par le dispositif de mesure luimême et par l'hélicoptère. Une analyse quantitative des mesures requiert une prise en compte de ces contributions radiologiques ne provenant pas du sol.

5.4.1.1. Rayonnement cosmique

Un rayon cosmique primaire de très grande énergie (quelques GeV) en provenance de l'espace produit par collisions avec les noyaux de l'atmosphère des cascades de rayons cosmiques secondaires d'énergies inférieures. Bien que l'atténuation par l'atmosphère entraîne une diminution de l'intensité du spectre cosmique lorsque l'altitude décroît, un fond de diffusion reste toujours perceptible à basse altitude.

5.4.1.2. Activité atmosphérique

La présence de gaz radioactifs ou de particules en suspension dans l'atmosphère est susceptible de perturber la mesure. Ainsi ²²²Rn, descendant de ²³⁸U, peut s'échapper du sol et se répandre dans l'atmosphère. Sa période radioactive de 3,8 jours engendre une activité atmosphérique pouvant se déplacer sur des distances importantes. Ses descendants et en particulier le ²¹⁴Bi et le ²¹⁴Pb, se répartissent dans l'air sous forme de poussières radioactives. L'émanation de ²²²Rn peut varier de façon importante selon la nature et l'humidité du sol (GRASTY, 1995) ou le climat (LARSON and BRESSAN, 1980), ce qui entraîne un déséquilibre entre les éléments de la famille uranium dans le sol. La déduction de l'activité ²³⁸U à partir des mesures ²¹⁴Bi devra par conséquent être effectuée avec précaution.

La contribution radon atmosphérique est faible dans le cas présent en raison de la faible surface de terres émergées.

5.4.1.3. Activité du dispositif de mesure

Le bruit de fond intrinsèque du dispositif résulte de l'activité des cristaux d'iodure de sodium (K, Ra et Th) et du verre composant les tubes photomultiplicateurs (Ra et Th), de l'électronique de mesure et des divers appareils entourant le détecteur. Cette contribution systématique et indépendante des conditions de vol est invariante dans le temps.

5.4.2. Mesure du bruit de fond

La mesure du bruit de fond a été effectuée lors des vols de liaison entre Mururoa et Fangataufa. Ces vols intègrent donc l'ensemble des composantes de bruit de fond précédemment citées plus l'activité marine, composée pour l'essentiel de ⁴⁰K. La Figure 6 présente le profil spectral du bruit de fond, mesuré à 50 mètres au dessus de l'océan. On distingue les différentes raies naturelles, et en particulier celle de ⁴⁰K à 1461 keV, mais également les descendants l'uranium et du thorium (respectivement ²¹⁴Bi à 1764 keV et ²⁰⁸Tl à 2615 keV).

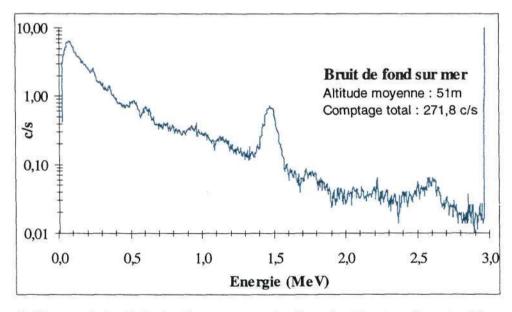


Figure 6 : Spectre de bruit de fond moyen enregistré pendant les transits entre Mururoa et Fangataufa.

Pour différentier les composantes de bruit de fond entre elles, des mesures avec variations d'altitude ont été effectuées dans les même conditions. Les Figure 7 et Figure 8 présentent l'évolution du comptage d'énergie supérieure à 3 MeV attribuable au rayonnement cosmique et du comptage total. Le rayonnement cosmique en provenance de l'espace interstellaire est d'autant plus atténué qu'il traverse les couches atmosphériques, d'où l'augmentation de signal enregistrée avec l'altitude.

Le comptage total (0,04 à 3 MeV) décroît avec l'altitude pour atteindre un minima vers 350 mètres puis augmente ensuite de façon progressive. Ce comportement correspond à la sommation de deux composantes spectrales. A basse altitude le fond marin est dominant, aussi observe t'on sa décroissance jusqu'à 3500 mètres. Ensuite c'est l'accroissement du fond cosmique avec l'altitude qui domine. A ces deux contributions, il convient d'ajouter le bruit de fond du dispositif de mesure qui est une constante.

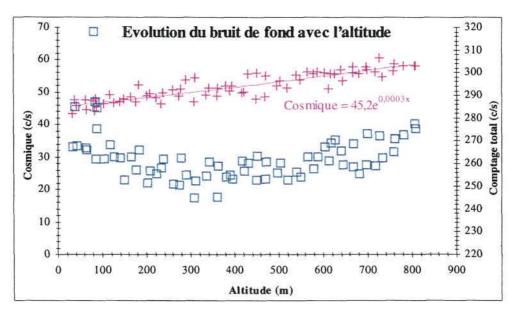


Figure 8 : Evolution du bruit de fond avec l'altitude de mesure sur un vol effectué au dessus de l'océan.

L'évaluation du bruit de fond intrinsèque du dispositif peut s'effectuer en recherchant dans les mesures les composantes naturelles potassium, uranium et thorium. Ces composantes ne peuvent en effet provenir que du bruit de fond du dispositif expérimental ou de l'océan. Les Figure 9 et Figure 10 présentent l'évolution avec l'altitude des teneurs en radioéléments naturel du bruit de fond.

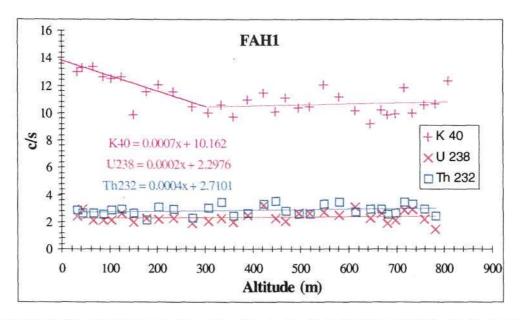


Figure 9 : Evolution des composantes naturelles du bruit de fond avec l'altitude de mesure sur le vol FAH1 effectué au dessus de l'océan.

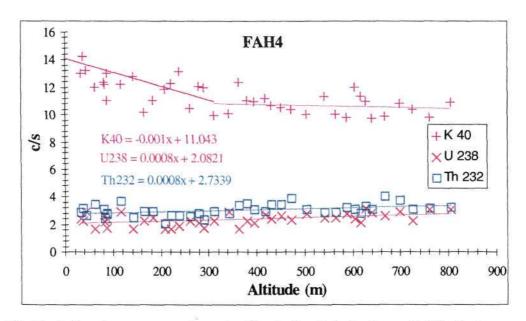


Figure 10 : Evolution des composantes naturelles du bruit de fond avec l'altitude de mesure sur le vol FAH4 effectué au dessus de l'océan.

L'activité ⁴⁰K est décroissante jusqu'à 300 mètres environ puis se stabilise. Les comptages uranium et thorium sont beaucoup plus faibles et constants quelque soit l'altitude. Ceci met clairement en évidence la teneur en potassium de l'eau de mer qui génère au niveau de la mer un signal de l'ordre de 3 à 4 c/s, soit 5 à 10 Bq/litre d'eau de mer, valeurs compatible avec les

mesures qui sont effectuées régulièrement sur des prélèvements d'eau. En revanche aucune trace d'uranium et de thorium naturels ne sont détectables dans l'eau de mer.

5.4.3. Conclusion

Ces mesures nous ont permis d'accéder précisément au bruit de fond d'origine cosmique et au bruit de fond intrinsèque du dispositif. Ces données ont été prises en compte dans l'analyse des mesures enregistrées sur l'atoll.

6. Résultats du survol de l'atoll

6.1. Trajectoire

La trajectoire suivie par l'hélicoptère est présentée en page 22. L'échelle de la carte est proche du 1/100000^{ème}.

6.2. Comptage total

La cartographie du comptage total (ensemble du rayonnement gamma dont l'énergie est comprise entre 40 et 2800 keV) est présentée en page 23. Le fond radiologique de l'ensemble de l'atoll se situe entre 0 et 627 c/s. Même la valeur maximale est extrêmement faible par rapport aux valeurs moyennes mesurées en métropole qui sont de l'ordre de 3000 à 10000 c/s.

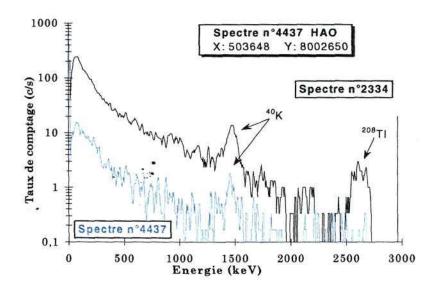
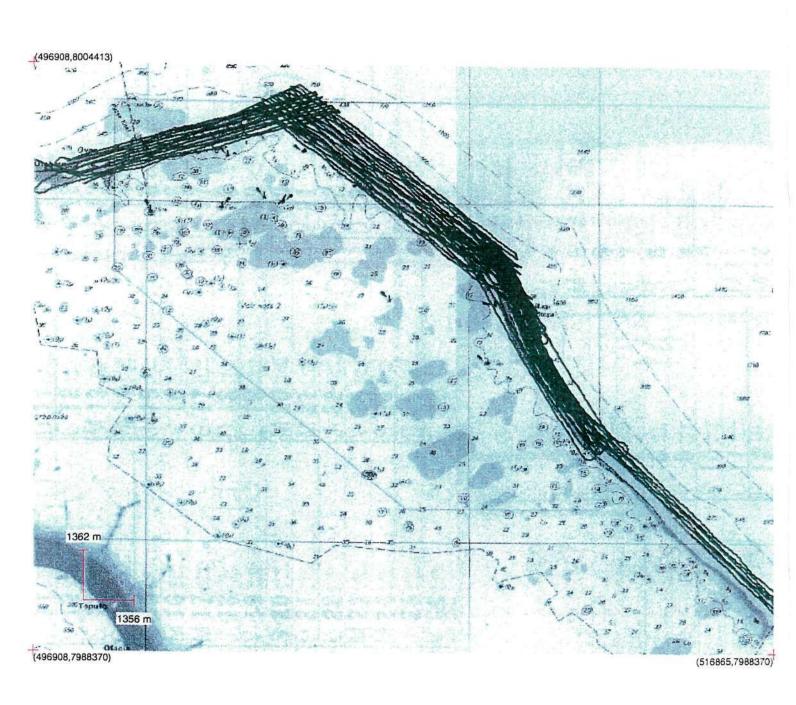
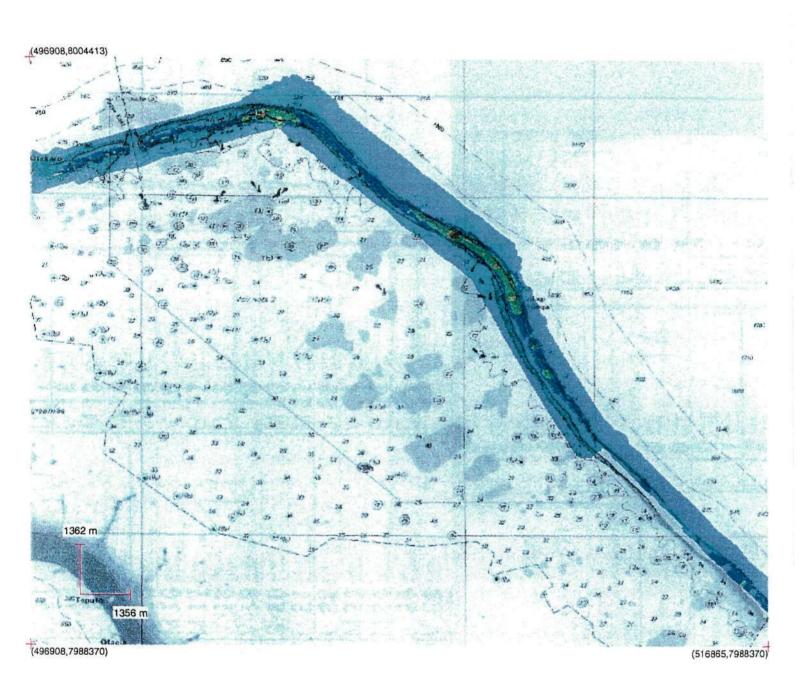
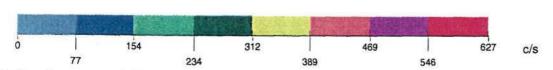


Figure 11 : Comparaison entre deux spectres, l'un, en bleu acquis à Hao, l'autre, en noir acquis sur les bords de la Loire.







Fenêtre Comptage total (Energies de 40 keV à 2.800 MeV)

Altitude de référence : 40 mètres

La Figure 5 compare deux spectres, le premier représentant un spectre moyen acquis au bord de la Loire (spectre n°2334), à proximité de Dampierre en Burly, le second le spectre d'activité maximale acquis à Hao. Sur ce dernier, seul le pic du ⁴⁰K à 1461 keV est clairement identifiable alors que sur le spectre n°2334, plusieurs radioéléments naturels (⁴⁰K, ²⁰⁸Tl, ²¹⁴Bi) sont mis en évidence avec des activités moyennes pour la métropole.

Les maxima d'activité sont mesurés dans la zone aéroportuaire et à proximité de la centrale électrique.

Aucune anomalie radiologique n'est mise en évidence sur l'atoll de Hao par l'étude du comptage total. Il faut souligner de plus que l'activité moyenne sur cet atoll est de l'ordre de 10 à 20 fois inférieure à celle que l'on rencontre en France métropolitaine.

6.3. Radioéléments naturels

Le ⁴⁰K et les familles ²³⁸U et ²³²Th à l'équilibre séculaire sont normalement détectés sur l'ensemble des zones survolées. Ces nucléides sont présents de façon naturelle dans le sol. Pour évaluer leur abondance, leur distribution verticale dans les 50 premiers centimètres de la surface est supposée uniforme. On suppose également que l'activité dans la zone d'émission survolée pendant une mesure est uniforme. Le détecteur n'étant pas collimaté, l'angle solide de détection est voisin de 2π. Il est cependant possible d'estimer la surface au sol à l'origine d'une proportion définie du signal. Pour les trois pics majeurs de ⁴⁰K, ²¹⁴Bi et ²⁰⁸Tl, 90 % du signal provient d'un disque de rayon compris entre 160 et 200 mètres (voir Figure 12). Pendant une acquisition de 2 secondes, l'hélicoptère parcourant environ 40 mètres, la surface d'équi-probabilité de détection des photons est en réalité une ellipse dont la longueur du grand axe est d'approximativement 40 mètres supérieure au petit axe.

Pour interpréter les cartes, il est important de garder à l'esprit cette notion de surface d'incidence, qui représente la maille élémentaire de calibration de la carte. Ainsi l'activité exprimée en tout point de la carte correspond à l'activité en provenance d'une zone active uniforme dont la surface est au moins égale à la maille élémentaire.

Dans le cas particulier du survol de l'atoll de Hao, l'eau de mer représente une proportion variable de la surface unitaire de mesure mais il est absolument impossible de déterminer cette proportion pour chacune des mesures. Aussi nos modèles ne prennent-ils pas en compte ce phénomène qui conduit nécessairement à sous-estimer les activités mesurées en provenance des terres émergées.

L'activité naturelle étant supposée uniforme dans le sol, celle-ci sera exprimée en becquerels par kilogramme de sol. Pour la calibration les propriétés de transport photonique du sol sont assimilées à celles d'un sol standard défini par BECK (1972). La composition du sol et du sous-sol de l'atoll de Hao très différente de ce modèle est à l'origine également des différences d'activités que l'on peut constater.

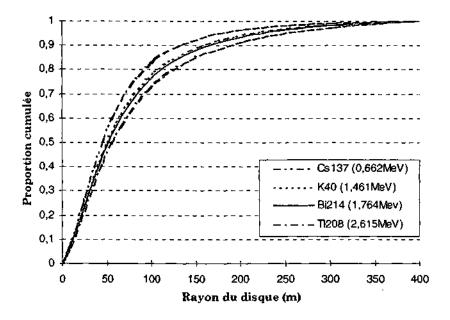


Figure 12 : Comptage en provenance d'une surface active circulaire à 40 mètres d'altitude, normalisé par rapport à une surface infinie. Evolution en fonction du rayon du disque actif considéré.

Potassium 40

La cartographie représentative de l'activité en ⁴⁰K, présentée en page 27, est peu contrastée et les valeurs maximales en potassium de l'ordre de 11 Bq/kg sont particulièrement faibles par rapport à celles que nous avons l'habitude de mesurer. Pour illustrer cette différence, la Figure 13 donne un exemple de deux spectres avec la raie d'émission du ⁴⁰K: spectre moyen, acquis sur les bords de la Loire entre Blois et Beaugency et le spectre n°6075 acquis à proximité du village d'Otepa.

On constate que l'activité moyenne en ⁴⁰K sur l'ensemble de l'atoll est très faible, quelques becquerels par kilogramme. Pour mémoire, les valeurs moyennes, en France, se situent le plus généralement entre 150 et 250 Bq/kg mais dépassent parfois 500 Bq/kg.

Uranium 238

La cartographie uranium, présentée page 28, basée sur l'analyse du pic à 1764 keV de ²¹⁴Bi permet de mettre en évidence l'uranium contenu dans les sols de **façon naturelle** en prenant pour hypothèse son équilibre séculaire avec sa descendance dont ²¹⁴Bi fait partie. Il Cette cartographie ne révèle pas de point particulier sur l'ensemble de l'atoll.

L'activité moyenne de ce radioélément est de l'ordre de 2 à 3 Bq/kg et la dispersion des valeurs mesurées très faible, le maximum n'étant que de 6 Bq/kg alors qu'en France, les valeurs habituellement rencontrées sont de l'ordre de 30 à 50 Bq/kg.

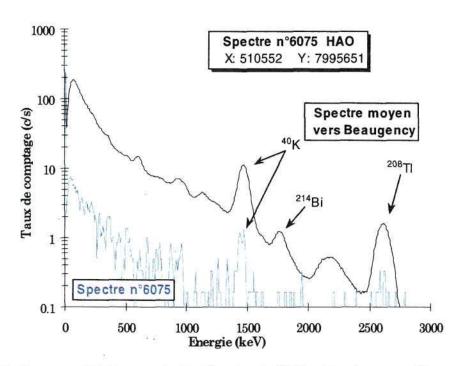
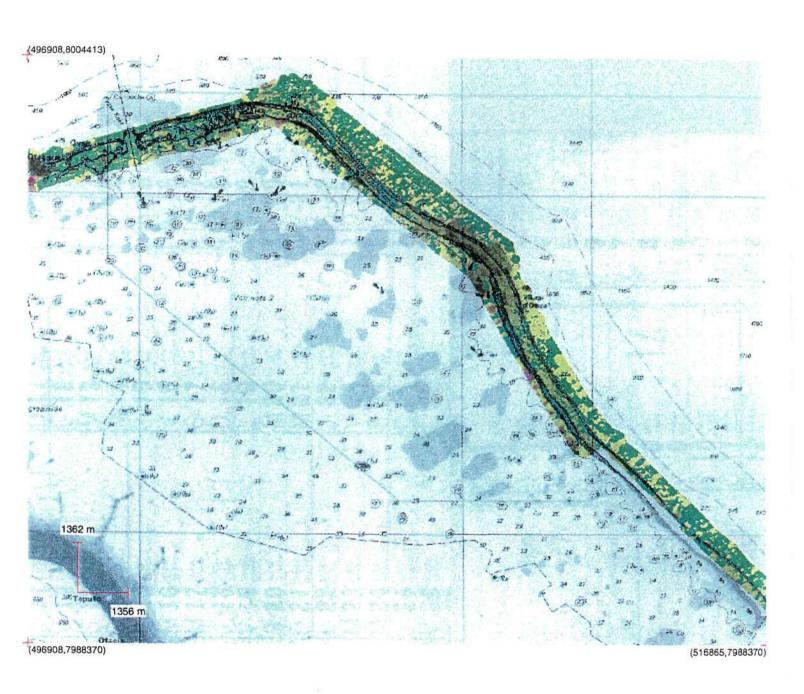
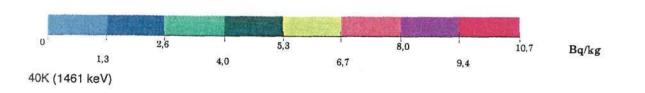


Figure 13 : Spectre n°6075, exemple de détection de ⁴⁰K (en bleu), comparé à un spectre moyen (en noir), acquis le long des berges de la Loire.

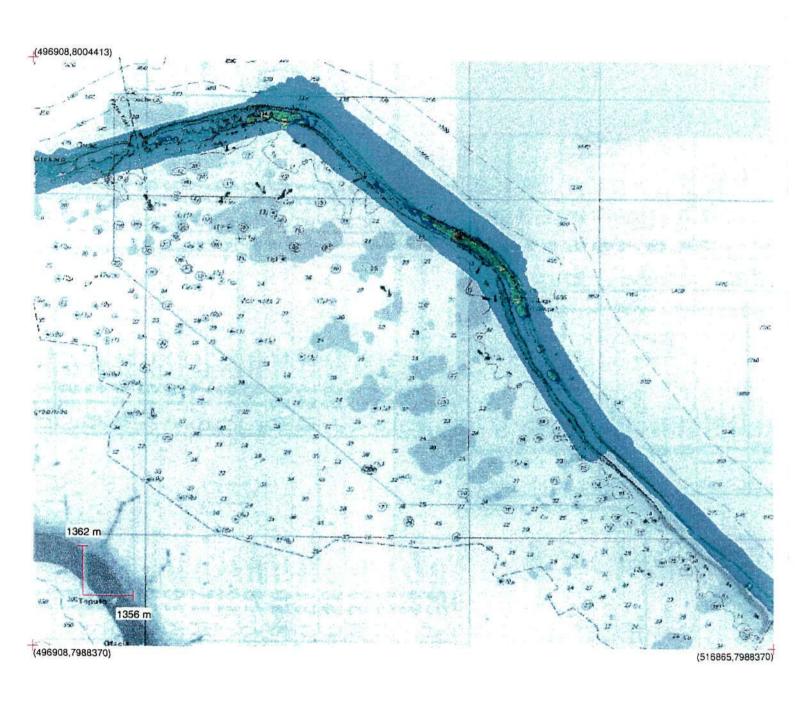
• Thorium 232

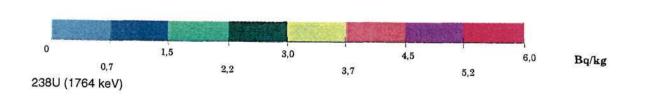
La cartographie du thorium présentée page 29, se caractérise par des niveaux d'activité assez homogènes et très faibles, le maximum n'atteignant pas 2 Bq/kg. Pour mieux illustrer ce phénomène, la Figure 14 compare deux spectres l'un, le numéro 1434, acquis, à proximité de Thionville où en certains endroits l'activité en thorium atteint 200 Bq/kg, l'autre acquis à la verticale de la centrale électrique du village d'Otepa. Ce point correspond au maximum d'activité en thorium sur l'atoll.



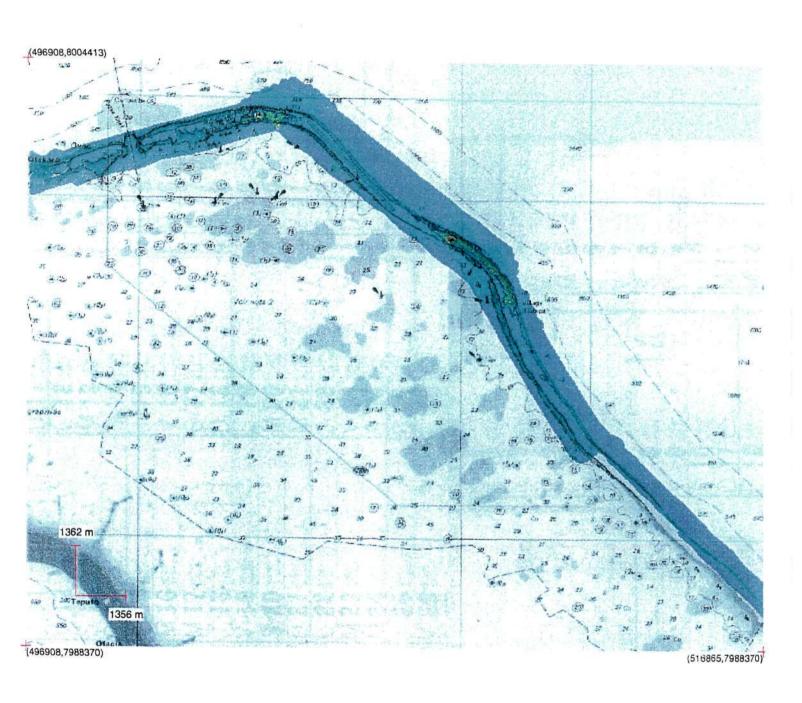


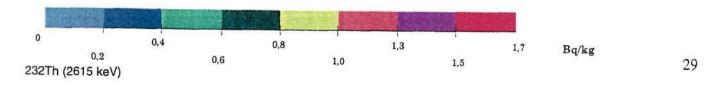
27





28





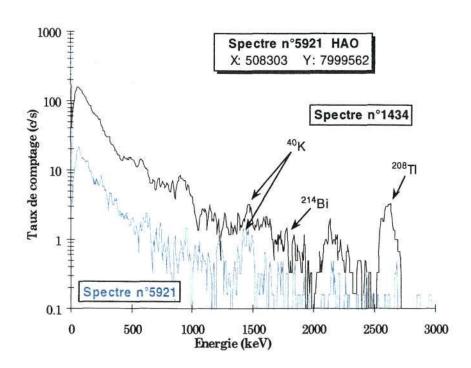


Figure 14 : Comparaison de deux spectres, l'un acquis à Hao, l'autre à Thionville.

6.4. Césium 137

Les dépôts de césium mesurés en Europe occidentale proviennent pour la plus grande part des retombées de l'accident de Tchernobyl (1986) auxquelles s'ajoutent au plus quelques centaines de Becquerels conséquences des retombées des essais atmosphériques effectués par les Américains, les Russes, les Britanniques, les Chinois et les Français. La localisation des essais, majoritairement effectués dans l'hémisphère nord et le transport atmosphérique ont conduit à des retombées relativement homogènes, plus importantes dans l'hémisphère nord (75 %) que dans l'hémisphère sud (25 %).

Ces contributions se trouvent le plus souvent localisées dans les quelques centimètres superficiels du sol, avec des écarts de distribution verticale selon la nature géologique du sol. Pour permettre une comparaison simple des activités mesurées, celles-ci sont exprimées en équivalent surfacique (Bq/m²). L'analyse des mesures est ainsi réalisée comme s'il s'agissait d'un dépôt frais n'ayant pas encore migré dans le sol. De la même façon que pour les radioéléments naturels, la surface élémentaire survolée pendant une mesure est supposée uniforme. A 662 keV, 90% du signal provient d'une ellipse de petit axe voisin de 120 mètres (Figure 12).

La cartographie isoactivité en ¹³⁷Cs est présentée sur la page 32. Compte tenu du fond naturel faible du site, la limite de détection en césium basée sur le pic à 662 keV est de 10 c/s. Aucune trace de césium n'est décelable sur cette cartographie.

Dans l'hypothèse de la présence effective de ¹³⁷Cs, les niveaux d'activités en ¹³⁷Cs seraient très faibles, de l'ordre de quelques dizaines de Bq/m² au plus.

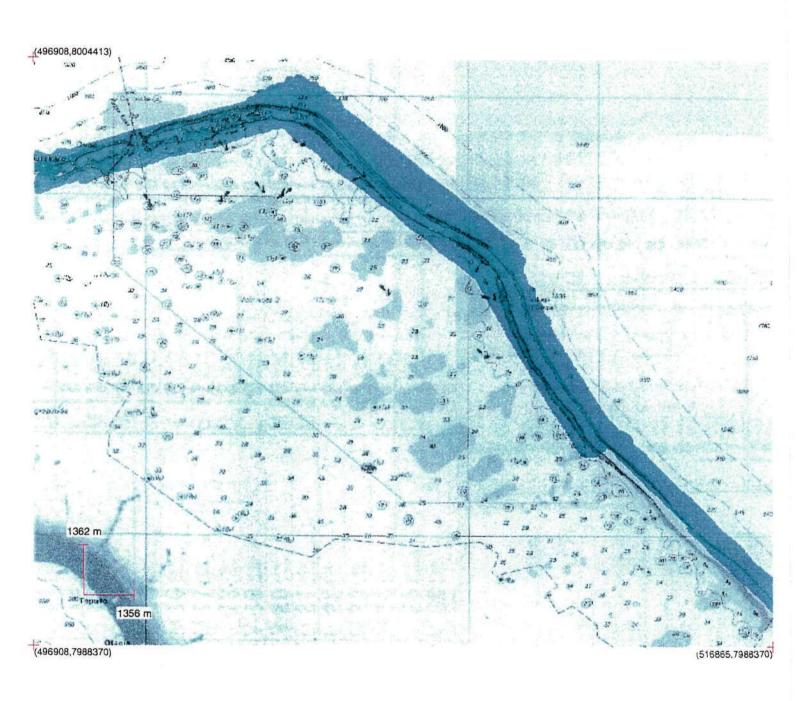
6.5. Recherche d'éléments non naturels à basse énergie

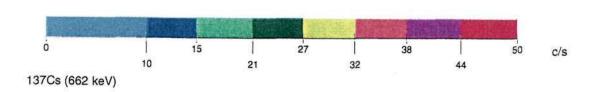
Cette recherche s'effectue par la méthode de déconvolution du fond continu (voir chapitre 5.2). Elle vise à détecter d'éventuelles traces de radioéléments artificiels ayant des raies dont l'énergie d'émission est comprise entre 50 et 110 keV tels que l'uranium 238 ou l'américium 241. Cette méthode d'analyse globale des spectres permet de mettre en évidence les variations du profil spectral par rapport au profil "naturel moyen".

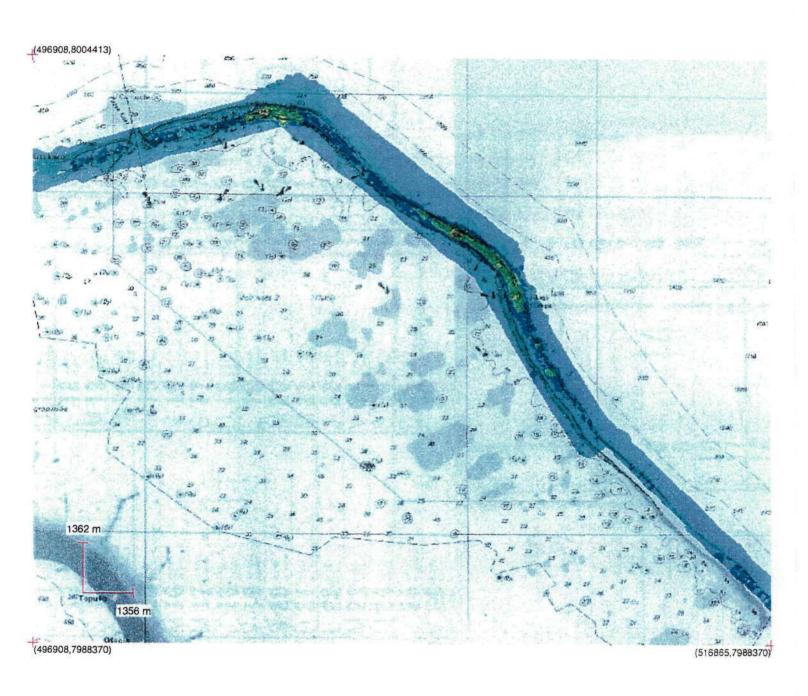
Les performances intrinsèques du système et de la méthode d'analyse permettent la mise en évidence de très faibles émissions à basse énergie ou de très faibles variations du fond de diffusion à basse énergie.

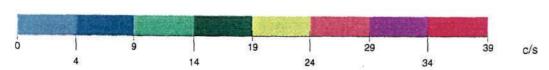
La corrélation entre les cartographies naturelles (K, U et Th) et la cartographie des basses énergies permet d'attribuer les très faibles accroissements locaux (inférieurs à 39 c/s entre 50 et 110 keV) au fond de diffusion engendré par une augmentation locale du fond naturel (potassium, uranium et thorium).

Aucune trace d'uranium non naturel, d'américium ou de tout autre radioélément émetteur à basse énergie n'a pu être mise en évidence.









Fenêtre basse énergie (Energies de 50 keV à 80 keV)

Altitude de référence : 40 mètres

33

7. Conclusion

La radioactivité naturelle de l'atoll de Hao est très faible en comparaison de celle mesurée en métropole. Les activités en potassium, uranium et thorium ne dépassent pas quelques becquerels par mètre carré ou par kilogramme.

Le contrôle radiologique par voie héliportée de l'atoll de Hao n'a pas révélé de radioactivité artificielle en quantité détectable.

Cela signifie en particulier que :

Aucune activité ²⁴¹Am n'a été détectée, ce qui témoigne de l'absence de marquage par du plutonium, auquel l'américium est toujours associé.

Aucune activité 238U non naturelle n'a été détectée,

Aucune activité 137Cs n'a été détectée,

Aucune activité d'origine artificielle à basse énergie (<110 keV) n'a été détectée.

8. Références bibliographiques

BECK, H.L., DECAMPO, J., GOGOLAK, C. (1972). In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gammaray Spectrometry. HASL-258.

BOURGEOIS, C., BRESSON, J., CHIFFOT, T., GUILLOT, L., (1996). RESUME 95. Exercice d'intercomparaison des moyens mobiles de contrôle radiologique. Rapport n° 01/96.

GUILLOT, L., (1996). Spectrométrie gamma aéroportée : Etude de nouvelles méthodes de traitement spectral et de calibration permettant une interprétation qualitative et quantitative des mesures. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France.