

DONNEES SISMQUES DE LA ZONE D'ETUDE

x	y	num	Mag	Prof	Heure	Date
502522	809806	8239	1.0	36	115059.1	11/12/1992
504580	800943	8478	3.0	8	135606.8	02/02/1993
506731	808676	8507	1.1	8	9010.2	15/02/1993
508942	808442	11920	1.7	2	90343.9	17/04/1996
509891	808658	3908	0.0	22	92532.6	11/05/1988
510524	808654	8891	0.8	8	85422.0	18/06/1993
512118	793375	10438	0.0	15	92952.9	24/12/1994
513046	807533	5500	1.0	2	142517.1	05/03/1990
514059	800888	7652	0.8	18	85656.8	05/05/1992
515160	808627	7471	0.0	0	85503.6	03/04/1992
515137	804975	9366	0.6	8	92410.4	13/12/1993
515133	804201	7132	0.0	27	85702.2	11/08/1991
516172	801871	9307	0.4	2	85855.4	19/11/1993
516500	803860	9483	0.5	8	103514.8	31/01/1994
516494	802975	9094	0.6	2	94352.3	09/06/1993
516483	801094	9299	0.3	2	90612.8	17/11/1993
516696	801535	9360	0.5	8	85828.2	12/09/1993
516798	800982	9237	0.6	3	91957.4	25/10/1993
517232	803081	7864	0.7	8	92120.4	16/07/1992
517184	795336	7841	1.0	30	124052.2	07/04/1992
517640	800866	9465	0.6	8	111138.5	24/01/1994
517940	798319	12560	1.5	34	64015.9	17/10/1996
517939	798208	9278	0.4	8	85904.6	11/10/1993
518279	801968	8489	0.0	2	84956.3	02/09/1993
518265	799755	5525	0.8	11	90020.5	05/09/1990
518466	798315	12885	1.1	0	90335.1	01/06/1997
518689	800195	11952	1.1	9	90432.7	26/04/1996
519002	799750	9437	0.1	8	91005.8	01/12/1994
518993	798312	9744	0.6	2	92116.7	26/05/1994
519138	804508	10030	1.4	32	140837.1	30/08/1994
519332	801961	7352	0.0	0	85443.4	17/01/1992
519311	798642	7078	0.0	0	85619.9	22/10/1991
519311	798642	7554	0.9	0	130035.8	31/03/1992
519311	798642	7183	1.0	0	85719.2	19/11/1991
519311	798642	7430	1.0	0	84552.7	15/02/1992
519311	798642	7456	1.0	0	112930.4	27/02/1992
519311	798642	7143	1.2	0	81032.1	11/09/1991
519311	798642	7608	1.3	0	82859.4	18/04/1992

519627	798640	9707	0.7	2	90716.4	05/06/1994
519777	805610	10222	1.5	26	90314.6	15/10/1994
520149	797973	12886	1.7	8	90334.6	01/06/1997
520255	797972	11420	0.0	2	94705.9	17/11/1995
520371	799742	5225	0.0	0	85313.5	02/05/1990
520364	798635	3958	0.0	15	85604.1	25/11/1988
520364	798635	5378	0.0	7	91357.5	22/03/1990
520364	798635	7306	0.8	0	85551.5	01/03/1992
520364	798635	7231	1.0	0	121003.1	12/07/1991
520364	798635	7448	1.0	0	90419.9	26/02/1992
520364	798635	7455	1.0	0	71809.6	27/02/1992
520364	798635	7402	1.1	0	84947.1	02/01/1992
520364	798635	7067	1.4	0	142818.6	18/10/1991
520364	798635	7126	1.5	0	84037.6	11/06/1991
520357	797529	7303	0.0	18	225237.4	01/02/1992
520343	795316	8654	0.9	17	83300.0	04/10/1993
520329	793103	7504	0.0	27	72006.4	19/03/1992
520329	793103	7161	0.8	22	90247.6	13/11/1991
520465	797971	12362	1.5	8	90310.6	27/08/1996
520575	798745	9640	0.2	2	84755.4	04/12/1994
520896	799517	12808	1.4	16	8560.9	14/12/1996
520884	797525	11748	1.6	12	85102.7	28/02/1996
520992	798078	11936	0.9	21	100637.8	22/04/1996
521099	798299	11902	1.2	9	71637.2	13/04/1996
521078	795090	8814	0.0	16	84932.0	27/05/1993
521197	797191	11801	1.6	15	93802.8	13/03/1996
521194	796638	11411	0.9	13	90643.1	15/11/1995
521293	795642	9173	0.5	17	100915.2	10/06/1993
521424	799735	7423	1.4	12	85521.4	02/11/1992
521417	798628	7253	0.0	0	90351.0	19/12/1991
521417	798628	7463	1.1	0	80819.1	29/02/1992
521400	795973	11800	1.4	15	93802.7	13/03/1996
521396	795309	7329	0.6	16	85513.4	01/10/1992
521389	794202	7218	0.8	19	90216.6	12/03/1991
521516	797632	12378	1.4	2	90335.3	30/08/1996
521718	796303	10886	1.6	16	112210.4	06/01/1995
521716	795971	11521	1.6	16	103032.9	13/12/1995
521714	795639	12450	0.0	16	90714.2	19/09/1996
522033	796079	11593	1.7	17	113547.4	01/09/1996
522470	798622	5362	0.0	16	92002.2	16/03/1990
522452	795745	9777	0.4	18	105512.2	15/06/1994

522449	795302	5358	0.0	27	91326.8	15/03/1990
522449	795302	8666	0.4	18	85113.6	15/04/1993
522449	795302	7178	0.8	18	94718.6	18/11/1991
522449	795302	7532	0.8	16	85741.7	27/03/1992
522434	793089	7682	0.6	23	85746.9	19/05/1992
522434	793089	7222	0.7	23	85635.6	12/04/1991
522434	793089	7330	1.2	21	90140.9	01/10/1992
523086	796183	12305	1.3	23	85846.3	13/08/1996
523523	798615	3880	0.0	18	90142.6	27/10/1988
523502	795295	8731	0.9	22	84956.9	30/04/1993
523502	795295	6982	1.0	19	85637.7	09/03/1991
523502	795295	7235	1.1	16	124727.2	12/10/1991
523502	795295	7520	1.2	20	85448.5	23/03/1992
523502	795295	7578	1.2	21	91107.8	04/09/1992
523494	794189	6743	0.0	18	104434.2	06/08/1991
523494	794189	7262	0.6	23	85643.3	23/12/1991
523494	794189	8694	0.7	20	9230.3	22/04/1993
523494	794189	7850	0.8	21	85228.9	07/10/1992
523494	794189	7047	1.5	22	120532.4	10/04/1991
523487	793082	7658	0.9	23	90135.9	05/08/1992
524463	797391	10665	1.1	16	131644.4	15/03/1995
524562	796395	8564	0.4	27	90117.7	03/11/1993
524555	795288	7162	1.6	18	124526.0	13/11/1991
524547	794182	7090	1.7	25	82617.0	26/10/1991
524540	793075	7203	1.1	22	130639.5	26/11/1991
524750	792963	12236	1.4	2	90206.6	08/01/1996
525644	800814	4002	2.4	18	85947.0	12/10/1988
525637	799707	3989	0.0	2	91106.8	12/07/1988
525637	799707	5367	0.6	22	85722.7	19/03/1990
526462	797046	11064	1.6	31	85433.8	08/11/1995
526638	807557	12022	2.2	33	346.4	05/10/1996
527736	798587	5172	0.0	2	85623.9	19/01/1990
527736	798587	5435	0.0	23	90053.1	04/09/1990
527706	794160	5479	0.0	18	85821.6	27/04/1990
528606	802564	1113	1.5	33	180945.5	13/12/1982

ANNEXE 3 : RESULTATS DES ANALYSES SPECTRALES DES EAUX SOUTERRAINES

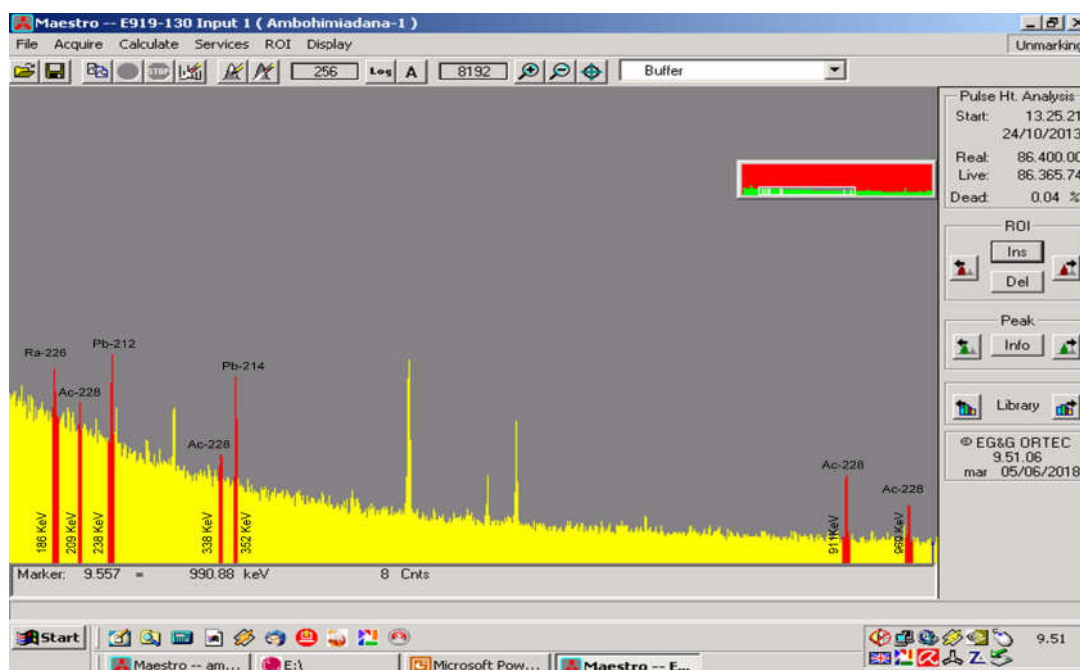


Figure 109 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ambohimiadana

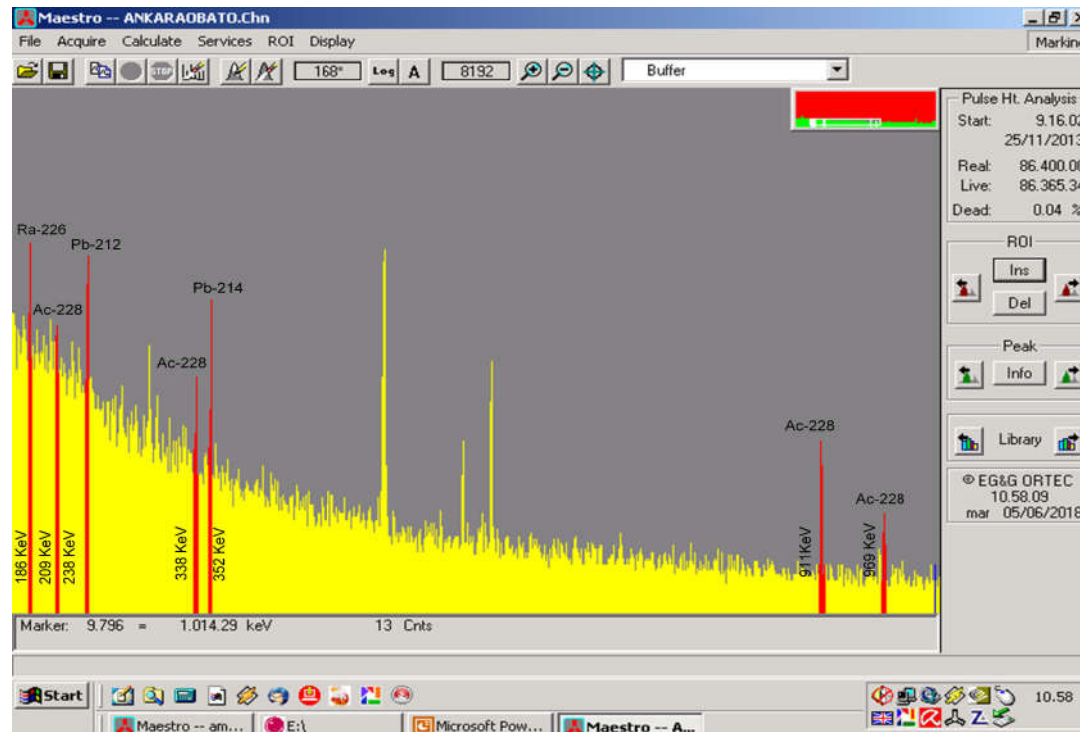


Figure 110 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ankaraobato

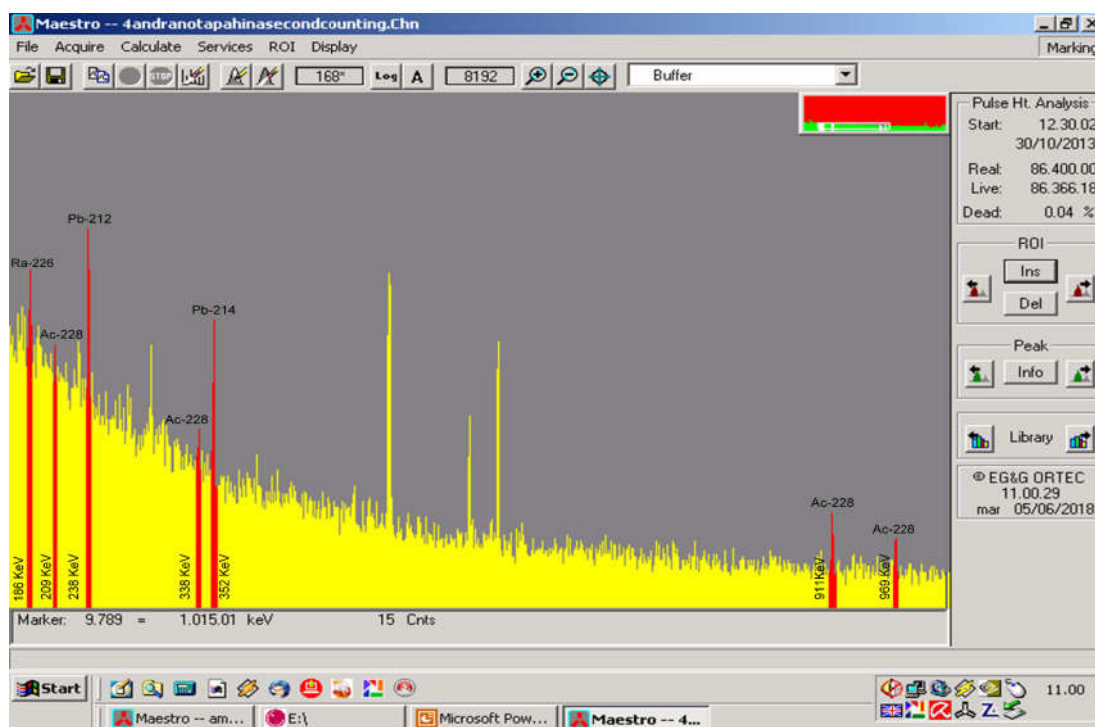


Figure 111 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Andranotapahina

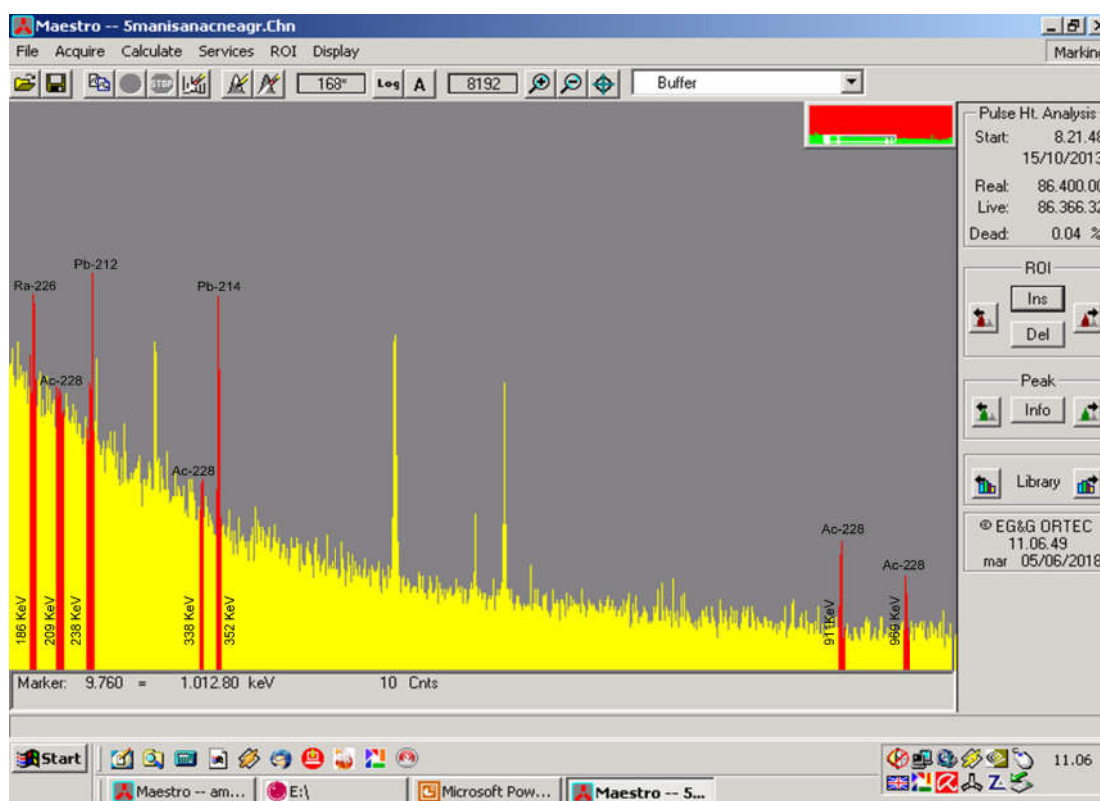


Figure 112 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Nanisana

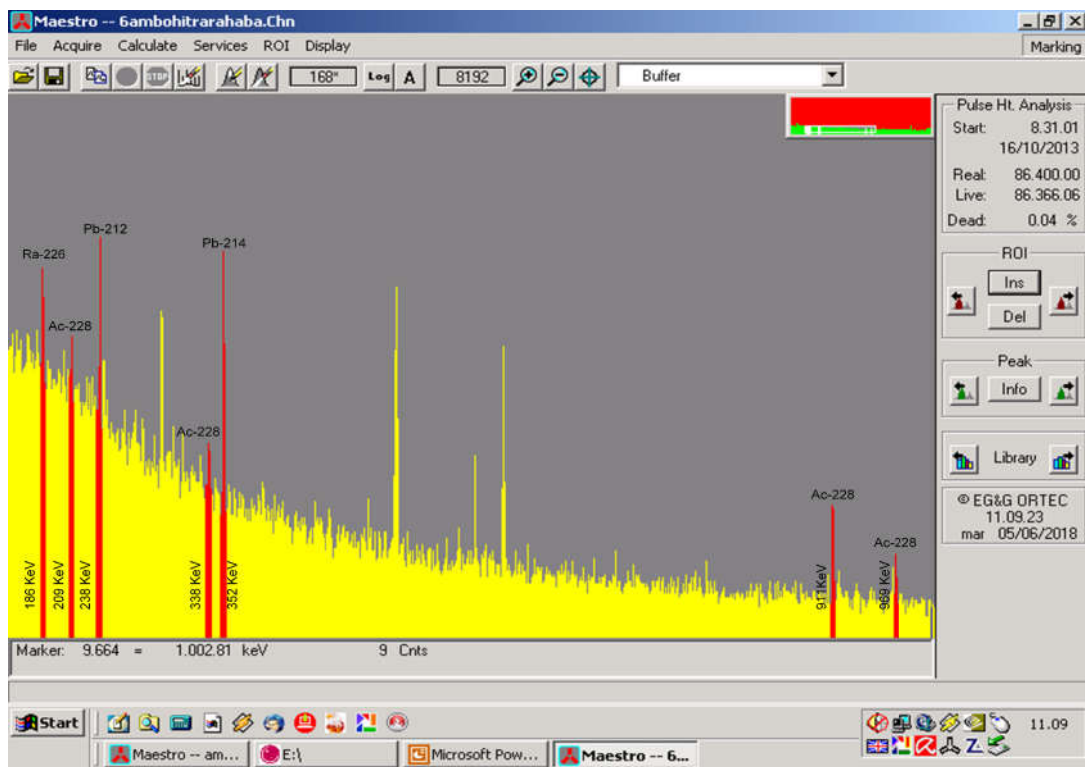


Figure 113 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ambohitrarahaba

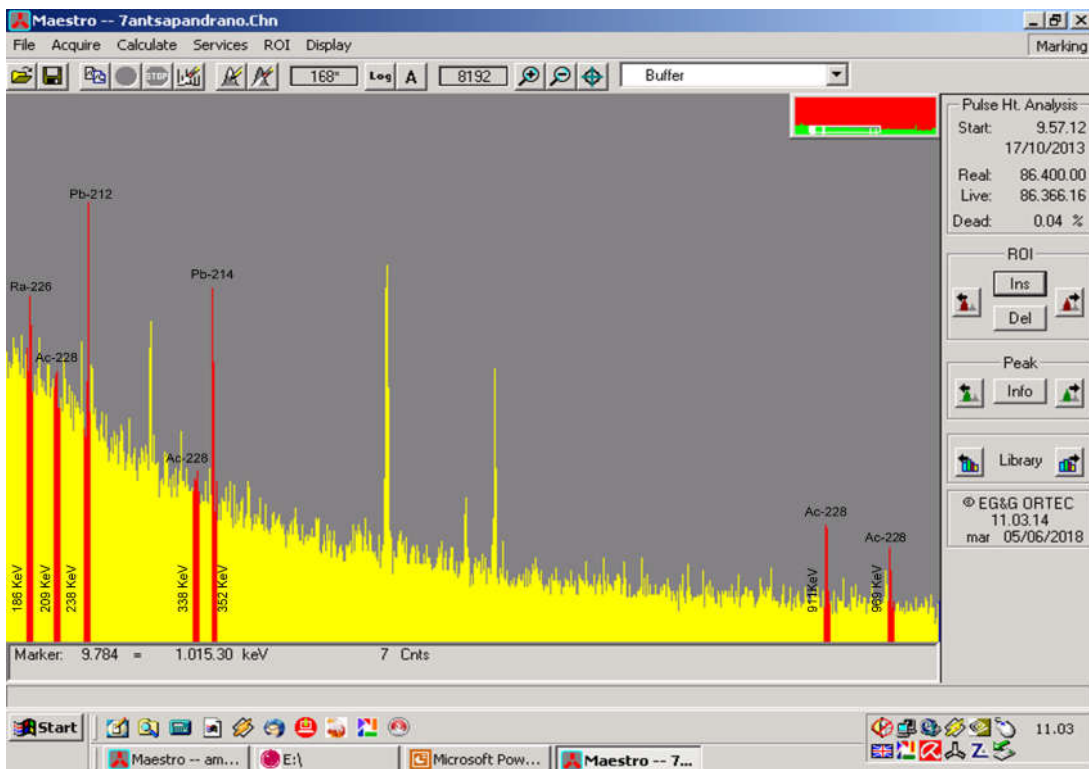


Figure 114 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Antsapandrano

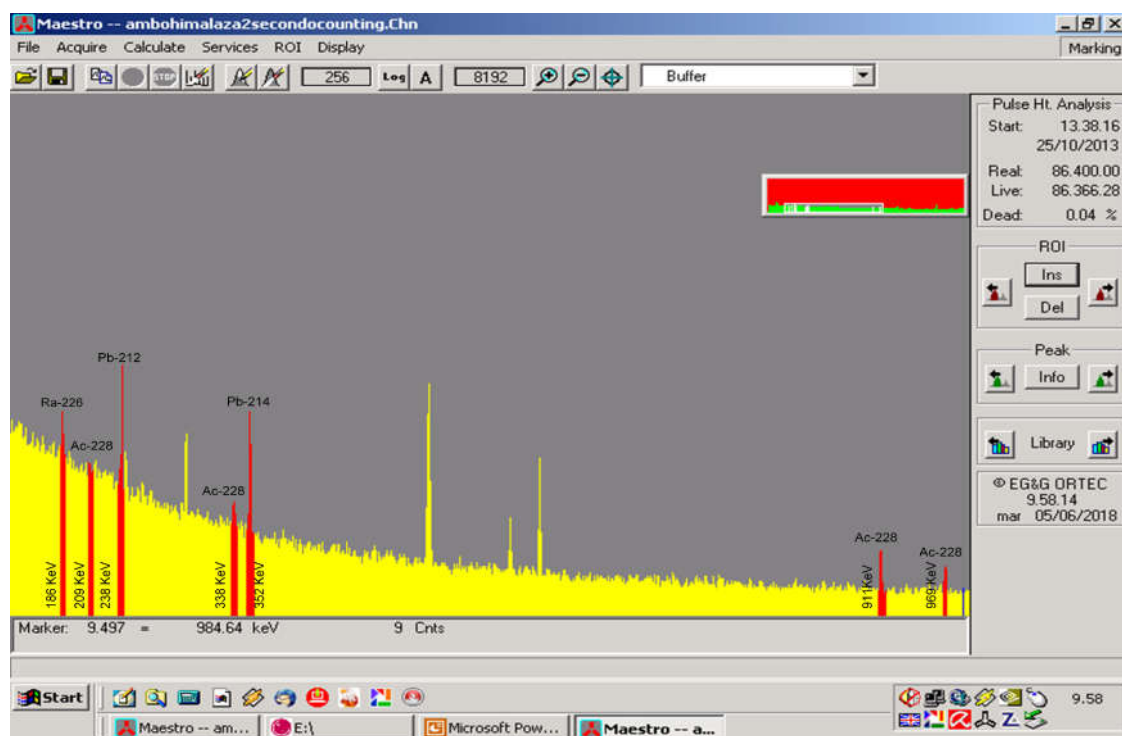


Figure 115 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ambohimalaza

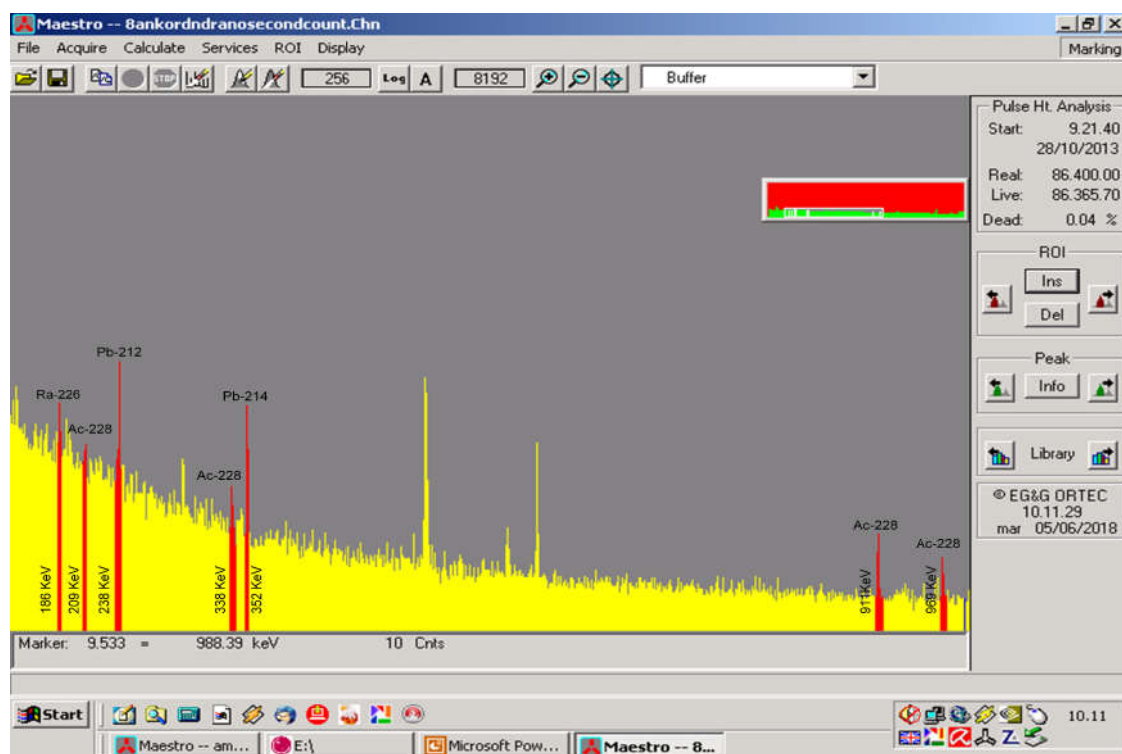


Figure 116 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ankorondrano

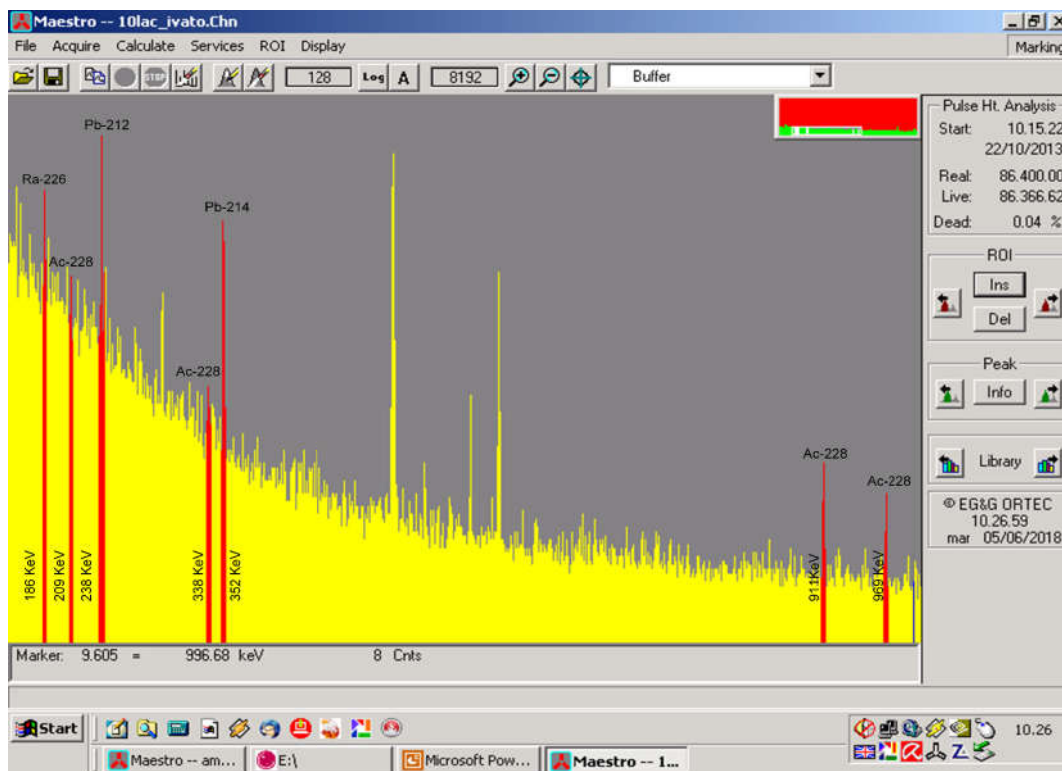


Figure 117 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ivato

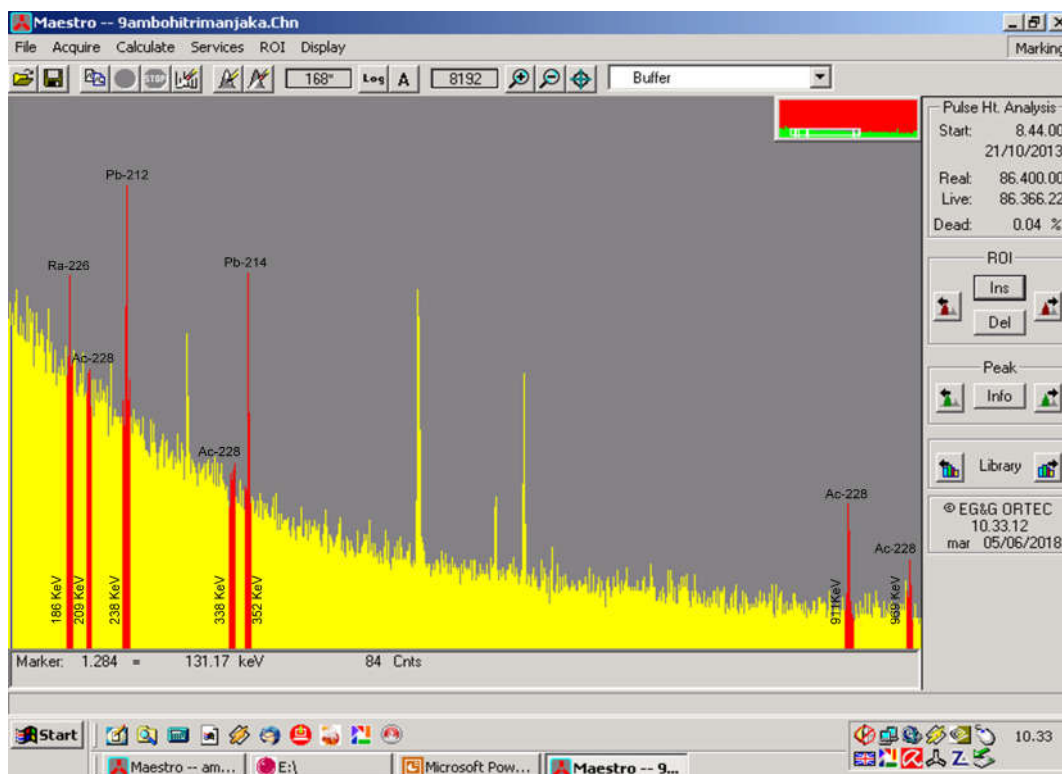


Figure 118 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ambohitrimanjaka

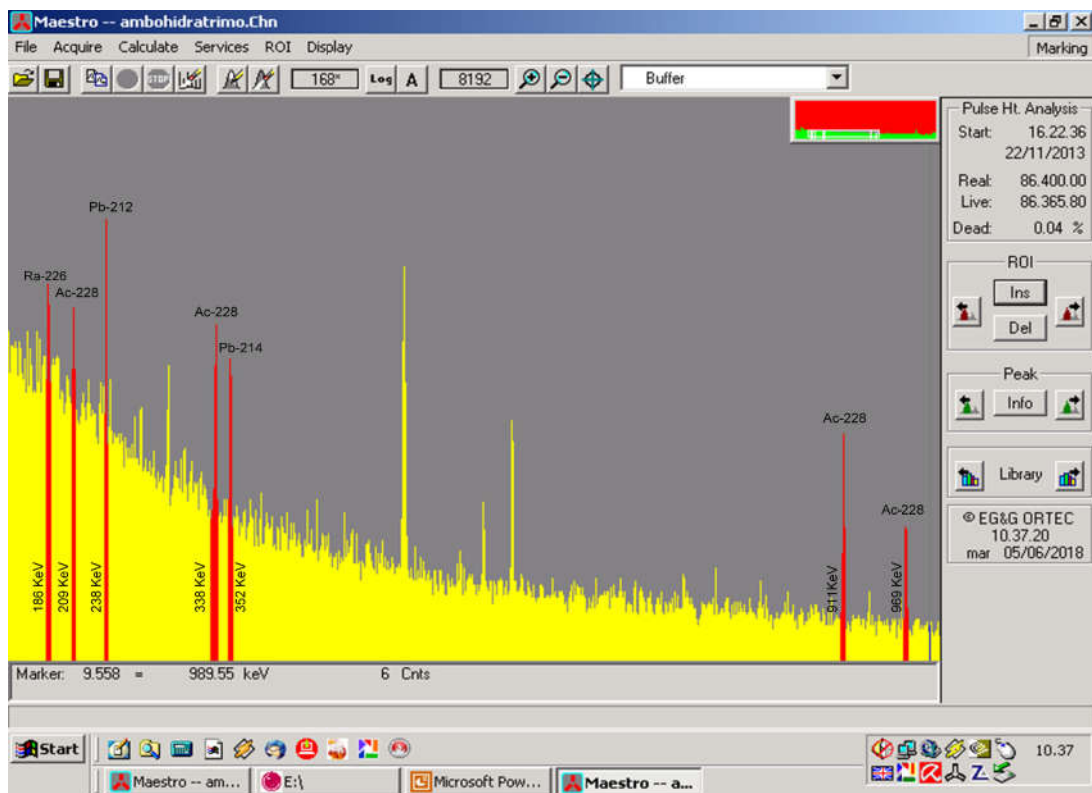


Figure 119 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à Ambohidratrimo

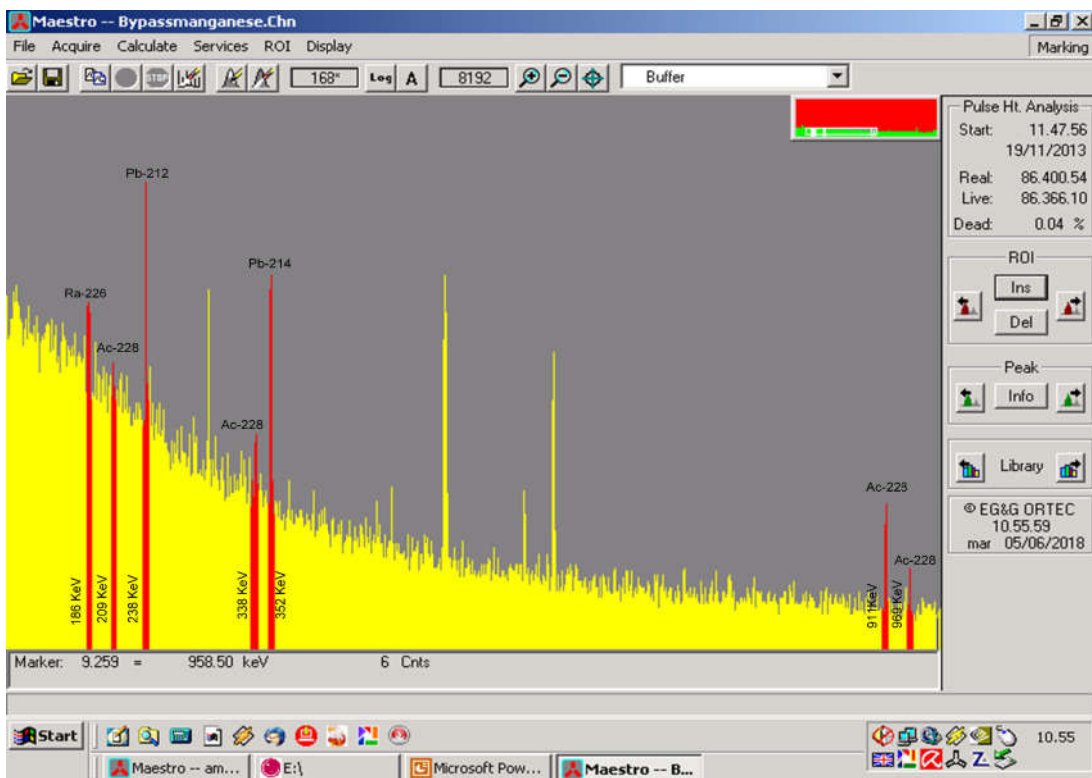


Figure 120 : Spectre des analyses des isotopes du Ra à ByPass Imerimanjaka

ANNEXE 4 : LE LOGICIEL D'INVERSION RES2DINV

Le programme RES2DINV utilise la méthode d'inversion des moindres carrés pour produire un modèle 2D de la subsurface à partir de la résistivité apparente.

Le fonctionnement est automatique et l'utilisateur n'a pas à fournir de modèle de départ. L'inversion d'une pseudo-section simple ne nécessite que quelques minutes sur un ordinateur.

Le programme RES2DINV supporte en particulier les configurations Wenner (α , β , γ), Schlumberger, pôle-pôle, pôle-dipôle, mais aussi toute configuration non conventionnelle.

Le RES2DINV est disponible en version 2D ou 3D.

Le logiciel de RES2DINV est conçu pour interpoler et interpréter des données de champ de la prospection géophysique électrique (2D sondage) de la résistivité électrique (conductivité) et de la polarisation induite. L'inversion de la résistivité et des données d'IP est conduite par la méthode du moindre carré impliquant des méthodes d'élément finis et de différence finie. Le logiciel peut manipuler des données de n'importe quelle configuration d'électrode, y compris Wenner (α , β , γ), de dipôle-dipôle, de pôle-dipôle intégré, de pôle-pôle, de Wenner Schlumberger, de pôle-dipôle équatorial et de configuration non conventionnelles. Interpoler les données de la terre, sous l'eau, et les études de forage en croix

Le programme de RES2DINV utilise la technique d'inversion de méthode des moindres carrés pour produire un modèle 2D de la subsurface à partir des données apparentes de résistivité. Il est complètement automatique. Le Wenner, le pôle-pôle, le dipôle-dipôle, le pôle-dipôle, le Wenner-Schlumberger et les configurations rectangulaires sont soutenus. Des corrections topographiques peuvent également être effectuées par ce programme. En même temps que le 2D programme modelant vers l'avant libre RES2DMOD, il forme un paquet vers l'avant de modeler et d'inversion de la 2D résistivité complète.

Trois variations différentes de la méthode des moindres carrés sont fournies; une méthode quasi-newtonienne très rapide, une méthode plus lente mais plus précise de Gauss Newton, et une technique hybride modérément rapide qui incorpore les avantages des méthodes quasi-newtoniennes et de Gauss Newton. Le filtre lissant peut être ajusté pour souligner des variations de résistivité des directions verticales ou horizontales. Deux variations différentes de la méthode des moindres carrés sont fournies; pour réduire la différence entre les valeurs apparentes calculées et mesurées de résistivité. L'information de résistivité du forage et d'autres sources peut également être incluse pour contraindre le processus d'inversion.

TABLE DES MATIERES

THESE DE DOCTORAT.....	1
THESE DE DOCTORAT.....	3
REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACE.....	IV
SOMMAIRE.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	XII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1: CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE	4
I - 2. Géomorphologie.....	6
I - 2.1 Les Hautes Terres	7
I - 2.2 Les bas fonds et plaines.....	8
I - 3. Occupation du sol	8
I - 4. GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE	9
I - 4.1 Géologie générale des Hautes Terres	9
I - 4.2 Géologie régionale (Moine, B. et al., 2014)	12
I - 4.3 Géologie de la zone d'étude.....	13
I - 5 Contextes hydrographique et hydrogéologique	14
I – 5.1 Contexte hydrographique.....	15
I – 5.2 Contexte hydrogéologique	17
I - 6. Taux d'accès a l'eau potable	21
I-7 Contexte climatique	22
I-7.1 Climat de la zone d'étude.....	22
I-7.2Bilan hydrique	23
a) La Réserve utile.....	23
b) Evapotranspiration potentielle (ETP) / Evapotranspiration réelle (ETR).....	24
c) Bilan hydrique de la zone d'étude	24
I - 8. Taux de croissance et urbanisation	26
I - 8.1 Taux de croissance.....	26
I - 8.2 Urbanisation	27
I - 9 Données à disposition.....	28
I - 9.1 Données obtenus des documents existants ou des études précédentes	28

I - 9.2 Données issues des travaux de terrain ou du laboratoire de l'IOGA	28
CHAPITRE II : APPORT DE LA TELEDETECTION A L'HYDROGEOLOGIE.....	29
II-1 APPLICATION DE LA TELEDETECTION.....	29
II-2 DONNEES ET OUTILS D'INTERPRETATION.....	29
II-3 ANALYSE SPATIALE ET CARTOGRAPHIE DES RESEAUX DES LINEAMENTS	30
II-4 RESULTATS ET INTERPRETATION	32
II-5 VALIDATION DU RESEAU DE LINEAMENT PAR LES LIGNES SISMQUES ET LA CARTE TECTONIQUE DE MADAGASCAR	34
CHAPITRE III : STRUCTURE GEOMETRIQUE DES NAPPES AQUIFERES PAR APPROCHE GEOPHYSIQUE.....	36
III-1. L' HYDROGEOPHYSIQUE	36
III-1.1 LES METHODES DE L'HYDROGEOPHYSIQUE.....	36
III-1.2 TECHNIQUES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE UTILISEES	37
III-1.2.1 Le sondage électrique (SE)	38
III-1.2.2 Le Trainé électrique (TE).....	38
III-1.2.3 L'imagerie par tomographie électrique (ITE)	38
III-1.2.4 Le STDEM	39
III-2 MATERIELS ET METHODES.....	39
III-3 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	51
III-3.1 PLAN DE MASSE ET MISE EN ŒUVRE	51
III-3.2 RESULTATS ET INTERPRETATION.....	56
III-3.2.1 Les sondages électriques	56
III-3.2.1.1 Courbes de sondages électriques de type H	56
III-3.2.1.2 Courbes de sondages électriques de type HKH.....	57
III-3.2.1.3 Courbes de sondages électriques de type A en remontée trainante.....	59
III-3.2.1.4 Courbes de sondages électriques de type « une seule branche montante ».....	60
III-3.2.2 Les Sondages TDEM	61
III-3.2.3 Imagerie par tomographie électrique (ITE).....	63
FOKONTANY VILIAHAZO	69
FOKONTANY AMBOLOMBORONA	74
FOKONTANY ANDRIAKELY	74
CHAPITRE 4 : QUALITE DES EAUX ET PERENNITE DES RESSOURCES	80
IV-1. QUALITE ET ORIGINES DE LA POLLUTION DES EAUX DE LA ZONE D'ETUDE	80
IV-1.1 SYNTHESE DES TRAVAUX ANTERIEURS	80

A- Résultats issus du projet CORUS en 2004.....	81
B- Résultats issus du projet GEOPOL	82
IV-1.2 NOUVELLES ANALYSES DES ECHANTILLONS D'EAUX SOUTERRAINES	83
IV-1.3 INTERPRETATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET DES RESULTATS DES ANALYSES DES IONS MAJEURS	89
a) TDS ET pH.....	89
b) DURETE OU TITRE HYDROTOMETRIQUE (DT ou TH).....	90
c) LA MATIERE ORGANIQUE (MO).....	91
d) LA TURBITIDE.....	91
e) LA CONDUCTIVITE	91
f) L'AMMONIUM.....	92
g) LE NITRATE	93
h) LE NITRITE.....	93
i) CALCIUM ET MAGNESIUM	94
j) SODIUM ET CHLORURE.....	94
k) SULFATE	95
l) BICARBONATE.....	95
m) FER.....	95
IV-1.4 INTERPRETATION DU CHIMISME DES EAUX	101
a) Faciès chimiques des eaux	102
b) Les autres éléments chimiques.....	107
IV-2. ETUDE DE LA PERENNITE DE LA RESSOURCE EN EAUX PAR LA DATATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	109
IV-2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUE ET CHIMIQUE DU RADIUM.....	111
IV-2.2 LE RADIUM DANS LES EAUX SOUTERRAINES	111
IV-2.2.1- Le rayonnement alpha	111
IV-2.2.2- Le rayonnement beta	112
IV-2.2.3- Le rayonnement gamma	112
IV-2.3 EXTRACTION DU RADIUM DANS L'EAU SOUTERRAINE.....	112
IV-2.4 APPAREIL DE MESURE DES ISOTOPES DU RADIUM	113
IV-2.5 RESULTATS DE MESURE DES ISOTOPES DU RADIUM.....	115
IV-2.6 INTERPRETATION DES RESULTATS	117
IV-3.6.1 L'équation principale.....	118
IV-3.6.2 Temps de résidence des eaux souterraines de la zone d'étude.....	122

IV-2.7 PERENNITE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE	124
IV-2.7.1 ETUDE DE LA RECHARGE DES NAPPES AQUIFERES	124
a) Objectifs	125
b) Intérêt de l'étude de la recharge	125
c) Méthodologie.....	125
IV-2.7.2 PERENNITE DES RESSOURCES.....	133
CHAPITRE 5 : SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS.....	135
CONCLUSION.....	138
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	138
ANNEXE 1 : DONNEES ISSUES DU PROJET CORUS ET GEOPOL.....	155
ANNEXE 2 : DONNEES SISMIQUES DE LA ZONE D'ETUDE	177
ANNEXE 3 : RESULTATS DES ANALYSES SPECTRALES DES EAUX SOUTERRAINES	180
ANNEXE 4 : LE LOGICIEL D'INVERSION RES2DINV.....	186

RESUME

Etude hydrogéologique des hautes terres centrale de la région Analamanga par méthodes géophysique et hydrochimique

Les trois Districts les plus peuplés de la région Analamanga abritent près de 10% de la population totale de Madagascar. Le système d'adduction d'eau est généralement assuré par la société d'eau et d'électricité « JIRAMA ». Actuellement, la JIRAMA se trouve de plus en plus en difficulté face à la croissance des besoins en eau ainsi qu'à la diminution de volume des eaux de surface exploitable. On a alors décidé d'évaluer la potentialité des ressources en eaux souterraines, et d'étudier la pérennité des ressources pour voir la possibilité de leur exploitation dans le futur.

Les méthodes géophysique et hydrochimique ont été choisies à cet effet.

Les méthodes utilisées ont répondu aux questions posées dans cette étude. Les résultats obtenus par les deux méthodes montrent que le niveau statique des eaux souterraines varie de 2 à 10m en basse altitude et de 6 à 25m dans les nappes d'altération en haute altitude. Les nappes de fracture se trouvent en général à plus de 25m de profondeur ; la zone d'étude comporte trois types de nappe dont les nappes alluvionnaires caractéristiques de la plaine alluvionnaire, les nappes latéritiques et les nappes de fracture caractéristiques des hautes altitudes ; les eaux souterraines de subsurface sont vulnérables à la pollution en surface, par contre les eaux des aquifères latéritiques sont de bonne qualité ; l'âge des eaux souterraines varient de 0,1 à 9,7 ans dont 12 sur les 14 échantillons sont âgés plus de 2 ans, ce qui veut dire que la pérennité des ressources en eaux souterraines sont encore assurées pendant au moins 2ans même s'il n'y a pas de recharge de l'aquifère. Un modèle à 2D montrant les zones potentielles probables est proposé.

MOTS-CLES : *Analamanga, eaux souterraines, pollution, potentialité, pérennité, géophysique, hydrochimie, isotope, radium*

ABSTRACT

Hydrogeological study of the central High Plateau of Analamanga region using geophysical and hydrochemical methods

The three districts of Analamanga region is the most populated. They contain 10% of the total population of Madagascar. Generally, water supply is ensured by the electricity and water society JIRAMA. Nowadays, the JIRAMA is more and more in trouble due to the increase of the demand and the diminution of surface waters available. It is then decided to evaluate the groundwater potentiality and to study the sustainability of the groundwater resources to see the possibility of its exploration in the future.

Geophysical and hydrochemical methods were choosen for that purpose.

The used methods answered the questions asked in this study. The obtained results from both the two methods show that static water level range from 2 to 10 meters in low altitude and from 6 to 25 meters in high altitude. The fractured aquifer is generally located at more than 25 meters depth. The study area includes three types of aquifer: the alluvium aquifer characteristics of the low altitude, the lateritic aquifer and the fractured aquifer characteristics of the high altitude. Subsurface groundwaters are vulnerable to pollution; however lateritics aquifer waters are in a good quality. Groundwater age range between 0,1 to 9,7 years and 12 out of the 14 samples aged more than 2 years, which means that the sustainability of the groundwater resources is ensured during at least the two next year even if the aquifer is out of recharge. A 2D model, showing the probable potential zones, is proposed.

KEYWORDS : *Analamanga, groundwater, pollution, potentiality, sustainability, geophysic, KEYWORDS :* *Analamanga, groundwater, pollution, potentiality, sustainability, geophysic, hydrochemistry, isotope, radium*

Directeur de these:
RATSIMBAZAFY Jean Bruno Auguste
Professeur émérite

L'impétrant:
RAJAOMAHEFASOA Riva Eliniaina
Tél: (+261) 33 11 544 58; Email: eliniaina@gmail.com