

Analyse et interprétation des données aéromagnétiques et spectrométriques de la région d'Andriamena

Rasolomanana E.^{1,2*}, Andriamirado L.C.², Randrianja R.¹, Ratefiarimino A.³

1 Département Mines, ESPA, Univ. Antananarivo, BP 1500

2 Laboratoire de Géophysique Appliquée, IOGA, Univ. Antananarivo, BP 3843

3 Programme de Gouvernance des Ressources Minérales, MMH, Ampandrianomby

* Auteur correspondant Tel. +261320449205 E-Mail : erasolo@hotmail.com

Résumé- L'étude se passe dans la région d'Andriamena. La société KRAOMA dispose déjà de 19 carreaux miniers exploités pour la chromite et ce, depuis plusieurs années. La société a acquis 159 autres nouveaux carrés dans la même région. Il s'agissait d'étudier, à partir de différents documents cartographiques : images satellitales, cartes du champ magnétique total transformées, carte spectrométrique ternaire en U, Th et K, analyses chimiques, la potentialité en chromite et, éventuellement en minéralisations aurifères, de ces nouveaux carrés.

Les résultats obtenus ont permis de se fixer sur les zones anormales intéressantes en tenant compte des gisements anciennement et/ou en cours d'exploitation et, tout particulièrement d'arrêter, le nombre de carreaux à abandonner. Enfin, l'utilité des méthodes géophysiques s'en trouve notablement accrue au terme de cette étude et de nouvelles perspectives s'ouvrent quand à leurs applications à Madagascar.

Mots clés- *Andriamena, carreaux miniers, chromite, aéromagnétique, spectrométrie, image satellitale*

1- Introduction

L'étude combine l'analyse et l'interprétation d'image de télédétection, de cartes aéromagnétiques transformées ainsi que de cartes de spectrométrie K, Th et U réalisées dans la zone Sud d'Andriamena à 160 km au Nord d'Antananarivo où un grand nombre de carreaux miniers appartient à une société minière, Kraomita Malagasy (Kraoma). Cette étude avait pour objet la mise en évidence d'anomalies éventuellement provoquées par des minerais de chromite, d'or, de béryl ainsi que par d'autres minéralisations associées aux gîtes de pegmatites et aux différentes intrusions qui ont façonné le cadre géologique régional.

Kraoma a assuré les travaux de prospection géologique et géochimique à large maille couvrant la majeure partie des nouveaux carreaux et de son côté, le chargé d'étude prenait à sa charge l'analyse des cartes numériques et des observations de terrain mises à sa disposition par Kraoma, ainsi que la présentation et l'interprétation des documents cartographiques rassemblant les résultats.

2- Conditions géographiques et géologiques

L'ensemble de la région chromifère s'étend sur 60 km du Nord au Sud, entre les parallèles 17° 13' et 17° 45'S et sur 45 km d'Est en Ouest, entre les méridiens 47° 22' et 47° 47'E. C'est un pays entièrement montagneux, d'altitude moyenne 1000m, les dénivelées entre sommets et vallées ne dépassant pas quelques centaines de mètres. Cette région est bordée à l'Ouest et à l'Est par les deux fleuves Betsiboka et Mahajamba. Elle est dominée au Sud-Ouest par le plateau circulaire de Vohambohitra, d'altitude 1500m, et au Sud par les divers sommets d'altitude semblable formant le Tampoketsa.

Les produits latéritiques, dont l'épaisseur atteint plusieurs mètres, recouvrent toute la région. Un élément caractéristique du paysage est constitué par les lavaka : ce sont des sortes d'entonnoirs d'érosion à parois subverticales qui entaillent les flancs des collines. Leurs formes sont très variées, et leurs dimensions passent de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, avec des profondeurs atteignant 10 à 20m dans certains secteurs prospectés.

Ces lavaka semblent résulter du glissement de loupes d'argiles latéritiques sur leur soubassement rendu glissant par la nappe aquifère. Ils mettent à nu des affleurements qui, sans leur existence auraient été cachés par le recouvrement. C'est ainsi que de nombreuses lentilles de chromite ont été découvertes en prospectant le fond des lavaka.



Les lavaka, figures caractéristiques de la région d'Andriamena

Au point de vue géologique, les gneiss, de divers types, plus ou moins migmatisés, sont prépondérants, ils contiennent des amas résiduels de roches basiques (gabbros, norites) et ultrabasiques (pyroxénolites, péridotites).

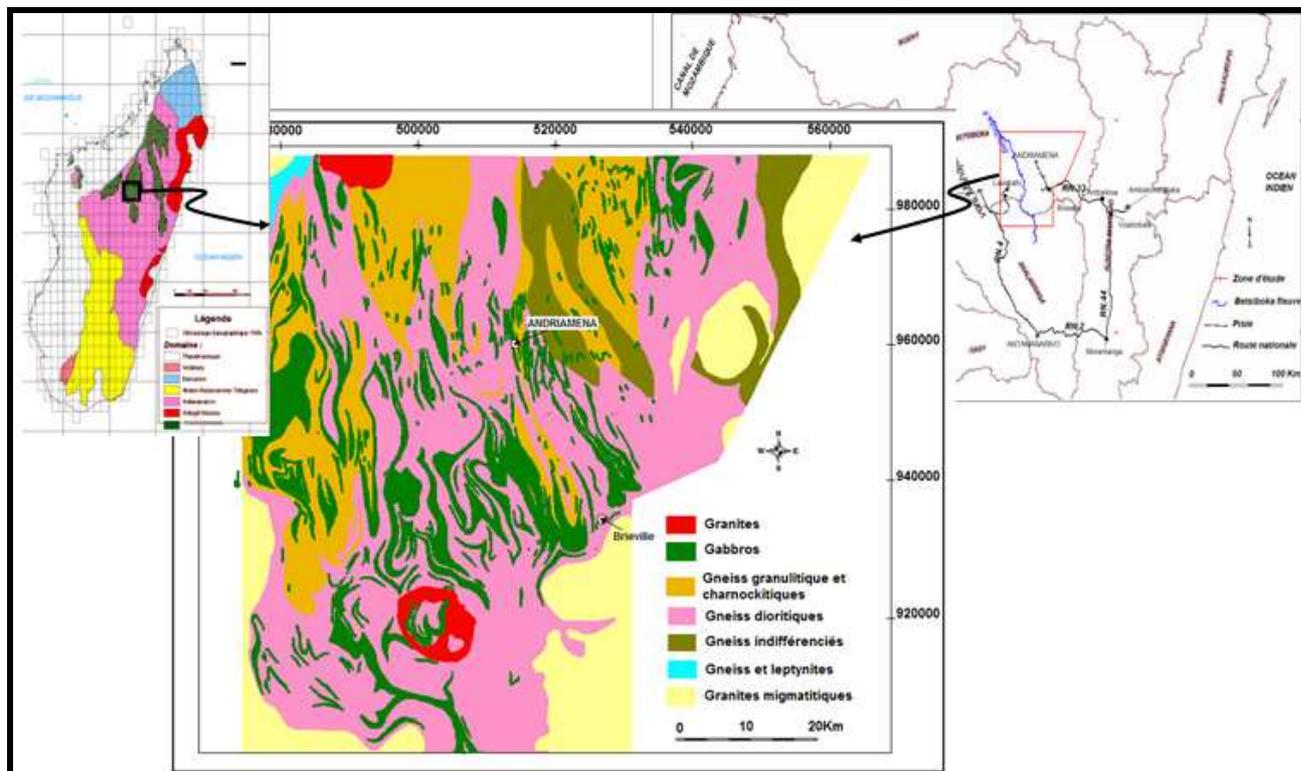


Figure 1- Carte de localisation de la zone d'étude (i) en rapport à la carte des domaines tectono-métamorphiques du socle cristallin précambrien de Madagascar (PGRM, 2008), (ii) à la carte administrative et (iii) sur fond de carte géologique simplifiée de la zone

Deux formations géologiques principales sont mises en évidence : un socle complexe polystructuré granulitique (granite à deux micas) localement retromorphosé et des corps intrusifs de nature

ultrabasique à textures magmatiques parfois préservées. Les formations sont recoupées par différents types de dykes et intrusions tardives (pegmatite, charnockite, basalte, etc...). La schistosité régionale est très homogène, et orientée NW-SE à NNW-SSE. Les pendages sont toujours très forts et peuvent être NE ou SW. Vers le Sud, cette formation vient se resserrer entre le massif granitique du Vohambohitra et les migmatites du Tampoketsa.

Les amas de chromite sont généralement contenus dans des lentilles de pyroxénolites, qui constituent la gangue du minerai. Ces pyroxénolites, roches ignées très anciennes, subissent parfois des altérations qui les transforment en talcshistes ou soapstones. Il existe maintenant plus de 300 lentilles de chromite connues et près de 800 indices localisés (Voir carte des indices Figure 2). Ces concentrations se répartissent suivant des alignements sensiblement parallèles, comme les roches ultrabasiques qui les contiennent. A noter que la chromite n'est pas magnétique.

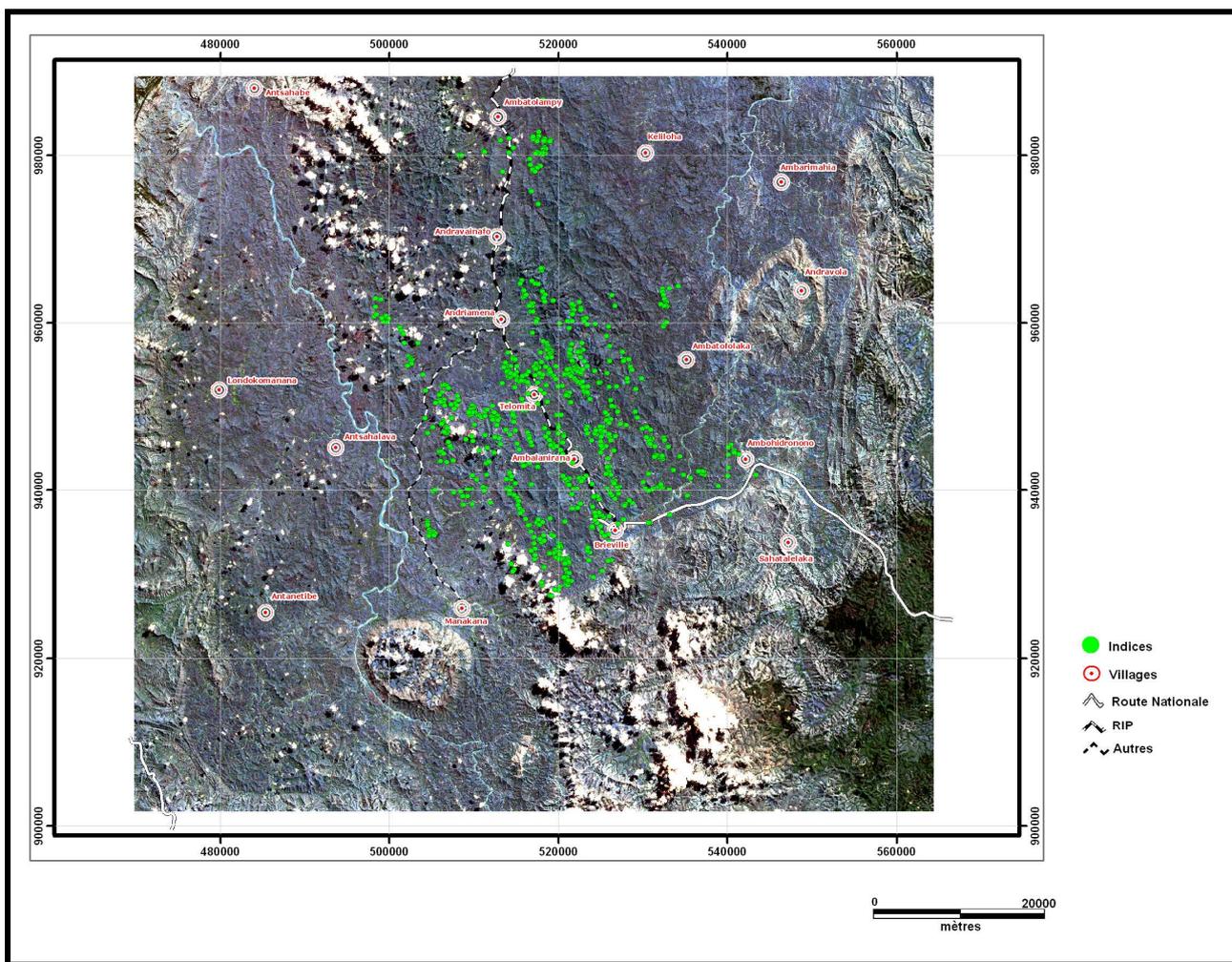


Figure 2- Carte des indices superposée à l'image Landsat ETM+ (Scène 159072, RGB=123)

3- Données particulières aux secteurs prospectés

Deux secteurs ont été étudiés : l'ancien Permis Kraoma délimité sur la carte, ci-après, comprenant les carreaux actuels de Kraoma et les nouveaux carreaux localisés tous dans la partie Est de ce qu'on appelle l'Unité d'Andriamena avec, principalement, les deux gros gisements d'Ankazotaolana et de Bemanevika et les indices de chromite identifiés. Puis, répartis au Nord à l'Est de cette première zone, le reste des nouveaux carreaux.

4- Moyens mis en oeuvre

Kraoma, disposant, d'une logistique assez importante et d'une expérience confirmée en matière de prospection minière, a pris en charge l'exécution des levés de terrain. Des observations géologique et minéralogique, des collectes d'échantillons de roches, de sols et d'alluvions. En outre, Kraoma disposait de l'ensemble des données aéromagnétiques et spectrométriques numériques couvrant la région et nécessaires pour mener l'étude géophysique. Les cartes d'anomalie du champ magnétique total, de la Réduction au Pôle, du Signal Analytique, du Gradient Vertical, et de l'image ternaire spectrométrique K, Th et U ont été retenues pour l'étude.

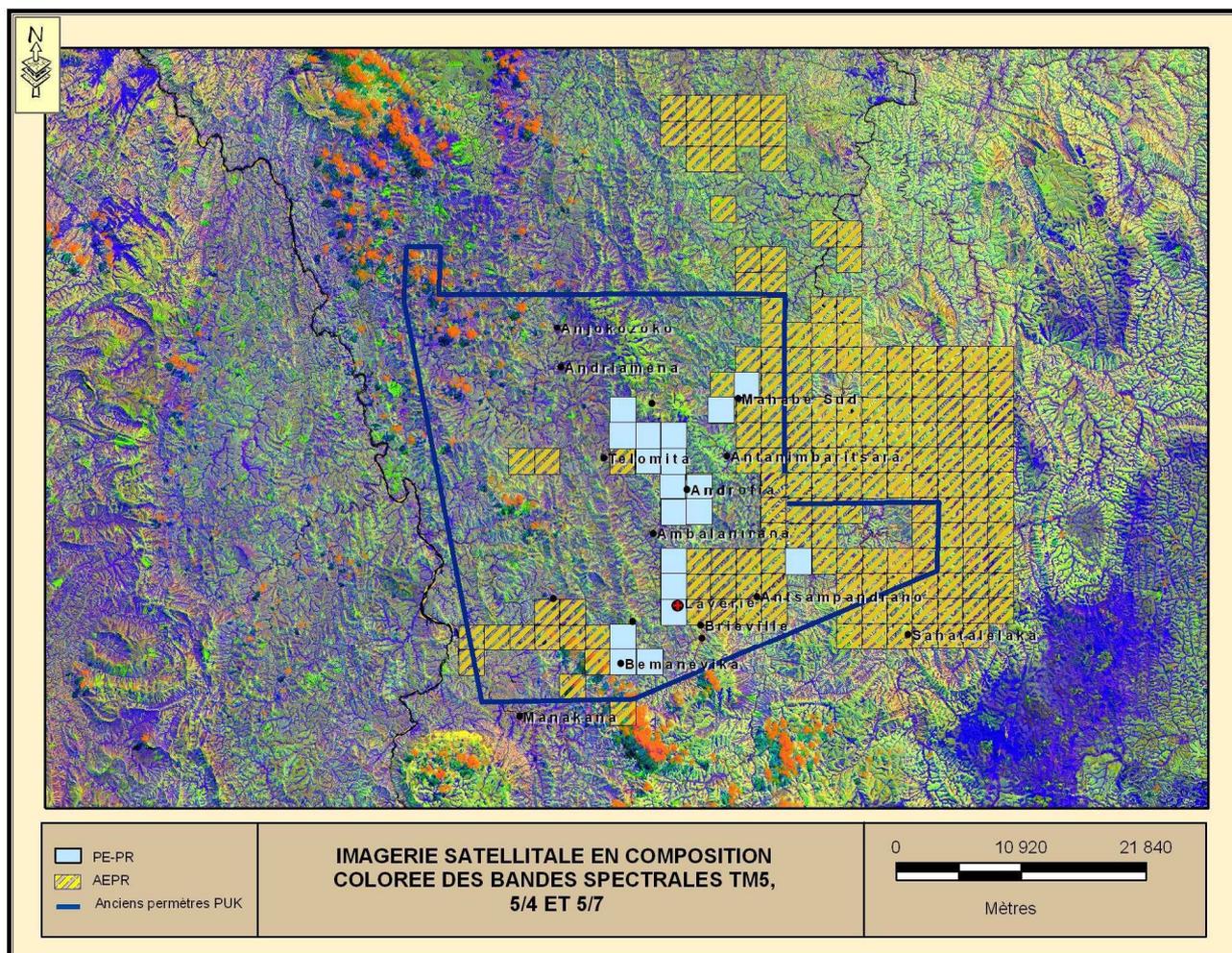


Figure 3- Carte de localisation des carreaux miniers sur fond d'image satellitale Landsat

5- Analyse et interprétation structurale de l'image satellitale Landsat

Pour tirer avantage des données de télédétection, il faut être en mesure d'extraire l'information significative de l'imagerie. L'analyse et l'interprétation ont pour but d'identifier et de mesurer différentes cibles dans une image pour pouvoir en extraire l'information utile. Une cible, ici, est définie comme étant toute structure ou objet observable dans une image : des points, des lignes ou des surfaces, c'est-à-dire qu'elle doit contraster avec les structures avoisinantes. L'étude a mis en évidence les points suivants :

- les ultramafites d'Andriamena sont intrusives dans les formations de la ceinture d'Andriamena de l'Unité de Tsaratanana. L'Unité d'Andriamena, socle cristallin relatif des ultramafites d'Andriamena, est de nature supracrustale (Martel – Jantin et al., 1988 ; Rakotomanana, 1996), d'âge Archéen Inférieur et affectée d'un métamorphisme ultra haute température à saphirine (Goncalvès, 2002). Elle est formée par une alternance des termes acides et

basiques regroupés dans la série charnockite composite (*Rakotomanana, 1996*). Deux événements magmatiques affectent la région dont un magmatisme mafique-ultramafique impliqué dans la mise en place des intrusions mafiques-ultramafiques du 790 Ma (*Guérrot et al., 1991*) et un autre événement magmatique du 630 Ma, plus tardif, serait à l'origine des intrusions granitoïdes et pegmatitiques (*Paquette, 2004*).

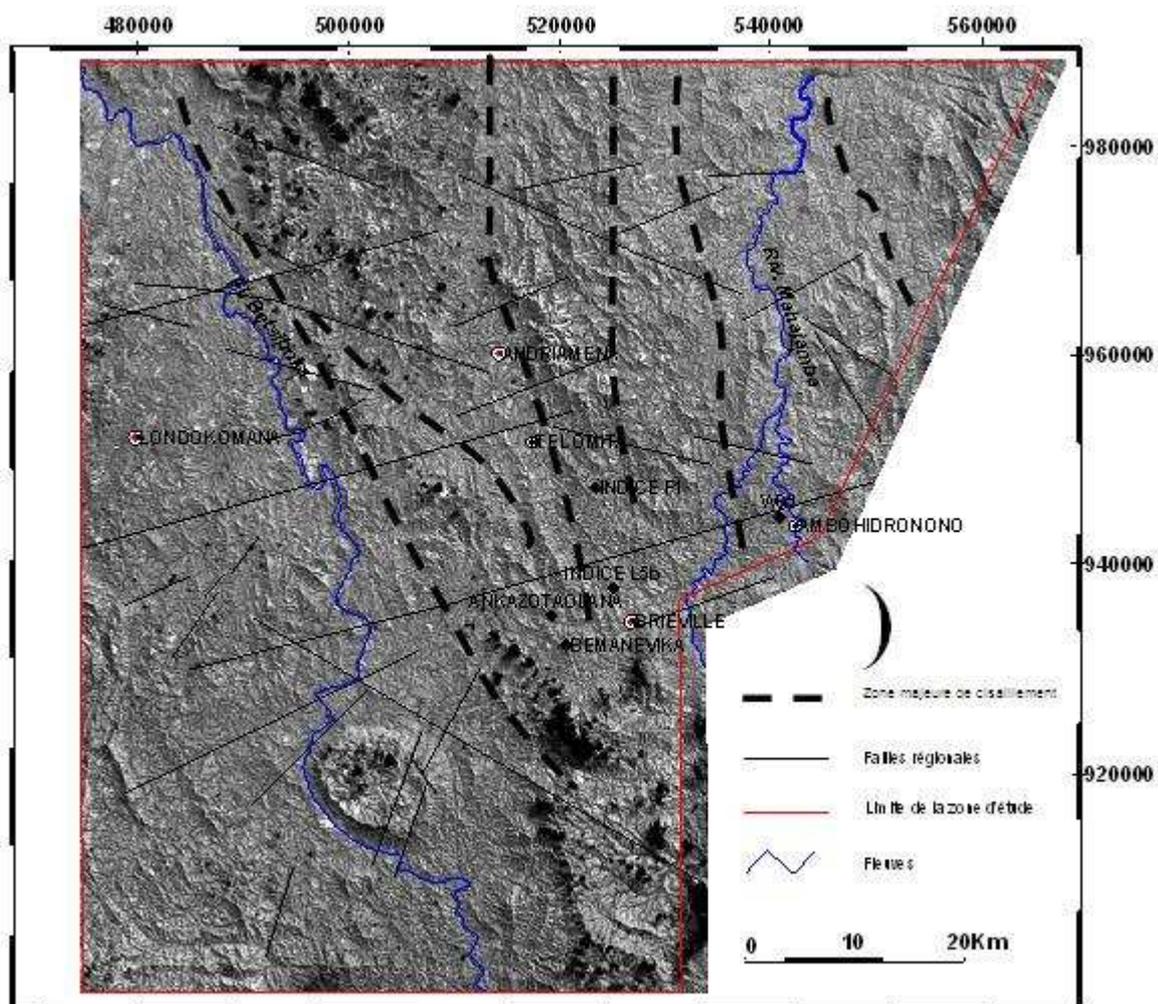


Figure 4- Tracé des principales failles et cassures ayant affecté l'Unité d'Andriamena

- les deux principaux modèles magmatiques ont toujours été mis en compétition pour caractériser l'Unité d'Andriamena et pour définir la nature et l'origine des ultramafites. Le BRGM a d'abord proposé le modèle ophiolitique (*Jourde, 1975*) puis celui d'un vaste complexe stratiforme métamorphisé ultérieurement (*Augé et al., 1987*) que l'USGS a également soutenu en 2003. Les ultramafites constitueraient des complexes de type andin dont la mise en place se serait faite au 790 Ma dans un contexte de marge immature et elles sont en de petits batholites sans extension. Les corps intrusifs ont une disposition cartographique en des chapelets de lentilles parfois de forme sigmoïde conformes à la foliation des encaissantes orthogneissiques.

- les minéraux des mafites et des ultramafites ont généralement été polygonisés malgré le fait que les roches ont bien préservé leurs textures magmatiques. Les différentes intrusions d'Andriamena sont sources de nombreuses substances utiles telles que chromite, MGP, or, ainsi que des pierres gemmes (béryl, ...), fines (tourmaline, ...), d'ornementation et industrielle (quartz, ...);

6- Interprétation des cartes magnétiques et spectrométrique

L'analyse des différentes cartes magnétiques et spectrométrique qui suivent repose essentiellement sur l'aspect qualitatif, c'est-à-dire que les anomalies à valeurs relativement élevées et dont la nature géologique des formations qui les supportent correspondrait à des ultrabasites et à des granites seront particulièrement retenues. Les carreaux qui se superposent à ces zones anormales feront donc l'objet d'études géologique et géochimique plus détaillées.

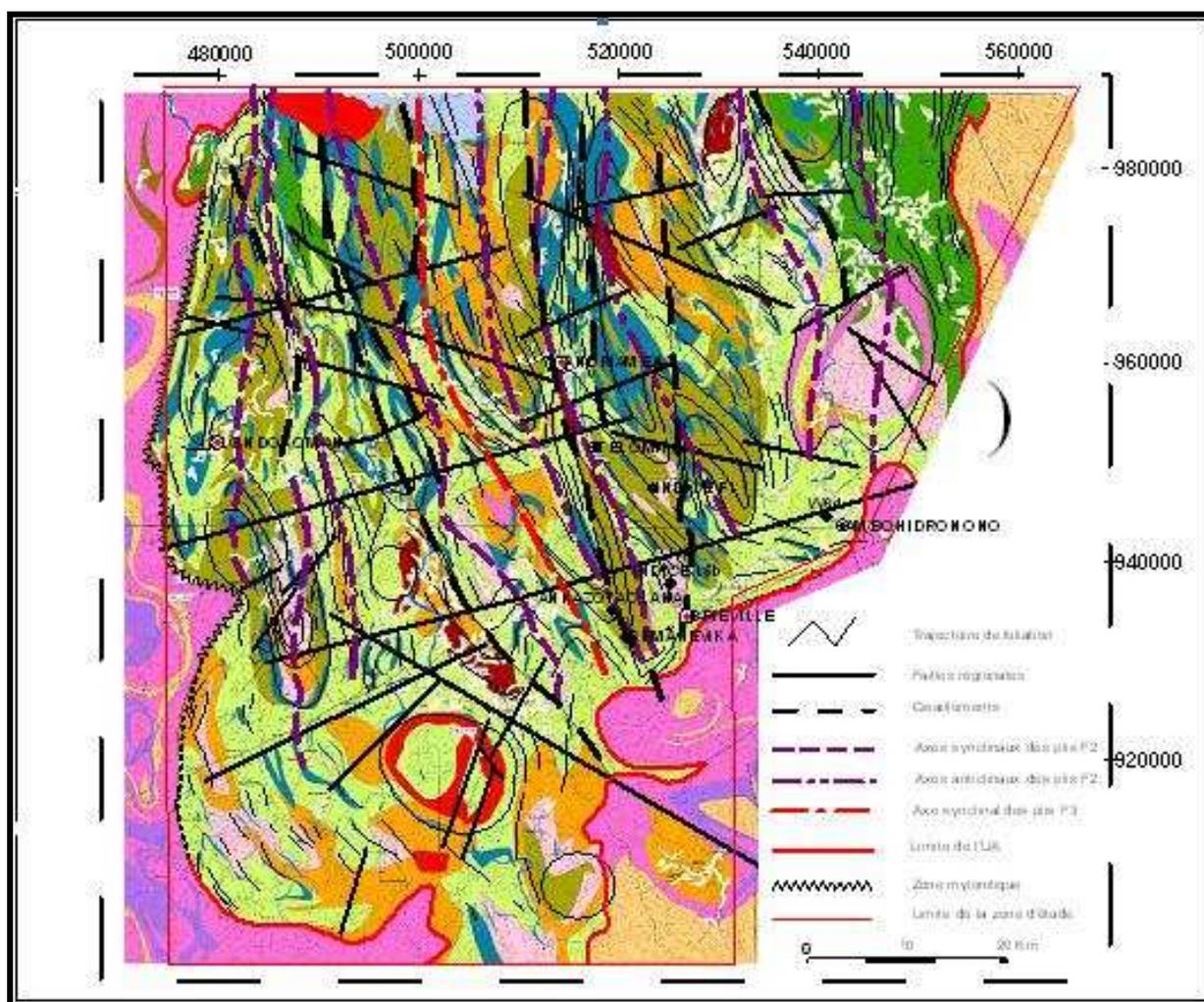


Figure 5- Carte de géologie structurale

Cette carte est présentée pour faciliter l'interprétation des cartes géophysiques.

- Carte du champ magnétique total (CMT)

La carte du CMT, corrigée par rapport au champ de référence CRGI, présente de nombreuses anomalies : linéaires (au Nord et au Centre), plus ou moins circulaires ou à la limite elliptiques à l'Ouest, au Sud et à l'Est). Structures très caractéristiques des intrusions ultrabasiques avec des directions d'agencement NW-SE à NNW-SSE correspondant étrangement à la schistosité régionale et à l'alignement des deux gros gisements d'Ankazotaolana et de Bemanevika et puis régional en occupant toute la partie Est et Sud-Est du secteur.

Ces anomalies magnétiques se traduisent par une variation de l'ordre de +670 nT entre les plus fortes et les faibles valeurs observées. Les carreaux faisant partie de l'ancien permis se superposent dans la majorité des cas à de bonnes anomalies magnétiques qui seraient liées à des roches ultrabasiques porteurs de minéralisations chromifères. Par contre, les nouveaux carreaux sont localisés plus dans le socle migmatito-gnessique et relativement près d'une intrusion importante de granite à l'Est du secteur, et seraient plus intéressantes en minéralisations aurifères et autres pierres fines et semi-précieuses.

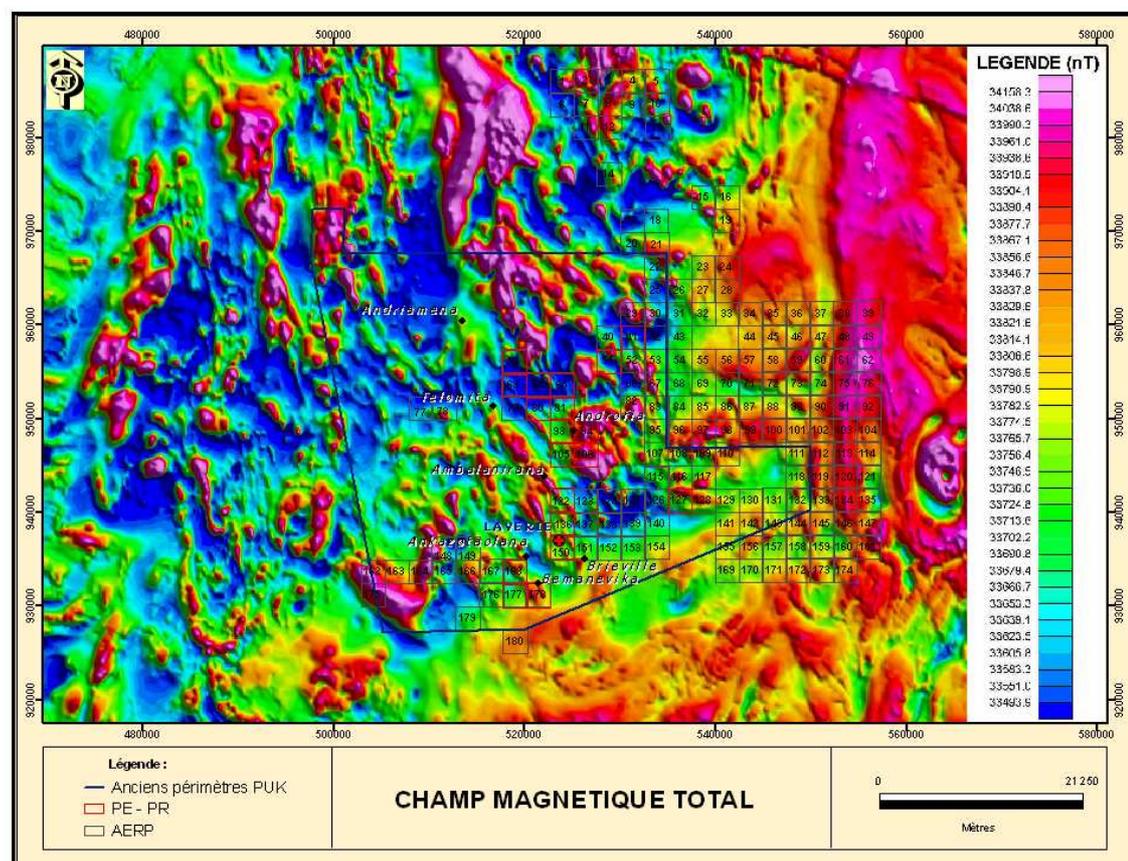


Figure 5- Carte du Champ Magnétique Total

Compte tenu de ces différentes remarques, on peut retenir les carreaux suivants :

- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 18 19 21 23 24 26 27 28 29 30 31 34 35 36 38 39 40 41 42 43 46 48
- 49 50 51 52 53 54 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 70 71 72 73 74 75 76 78 79 80 81 82 83 84
- 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 105 106 107 108 109 110 112 113 116 117
- 119 120 121 122 123 124 125 127 128 134 136 137 138 139 144 146 147 148 149 150 151 155 156
- 157 161 162 163 164 165 166 167 168 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180

- Carte réduite au pôle (RP)

La carte de réduction au pôle se caractérise par le fait que les roches, sources des aimantations, se placent exactement à l'aplomb des bandes d'anomalies magnétiques observées. Les anomalies magnétiques et le champ ne sont pas toujours en bonne correspondance dans la carte du CMT, ce n'est donc pas le cas dans la réduction au pôle, l'opération de décoalescence libère de cette contrainte.

On observe toujours sur la carte ces directions particulières NW-SE de bandes d'anomalies magnétiques de l'unité chromifère d'Andriamena. Les carreaux se superposant à ces bandes sont ceux choisis en premier puis, en ce qui concerne la partie Est du secteur où les anomalies

magnétiques sont aussi importantes, un certain nombre de carreaux outt aussi intéressant sont choisis.

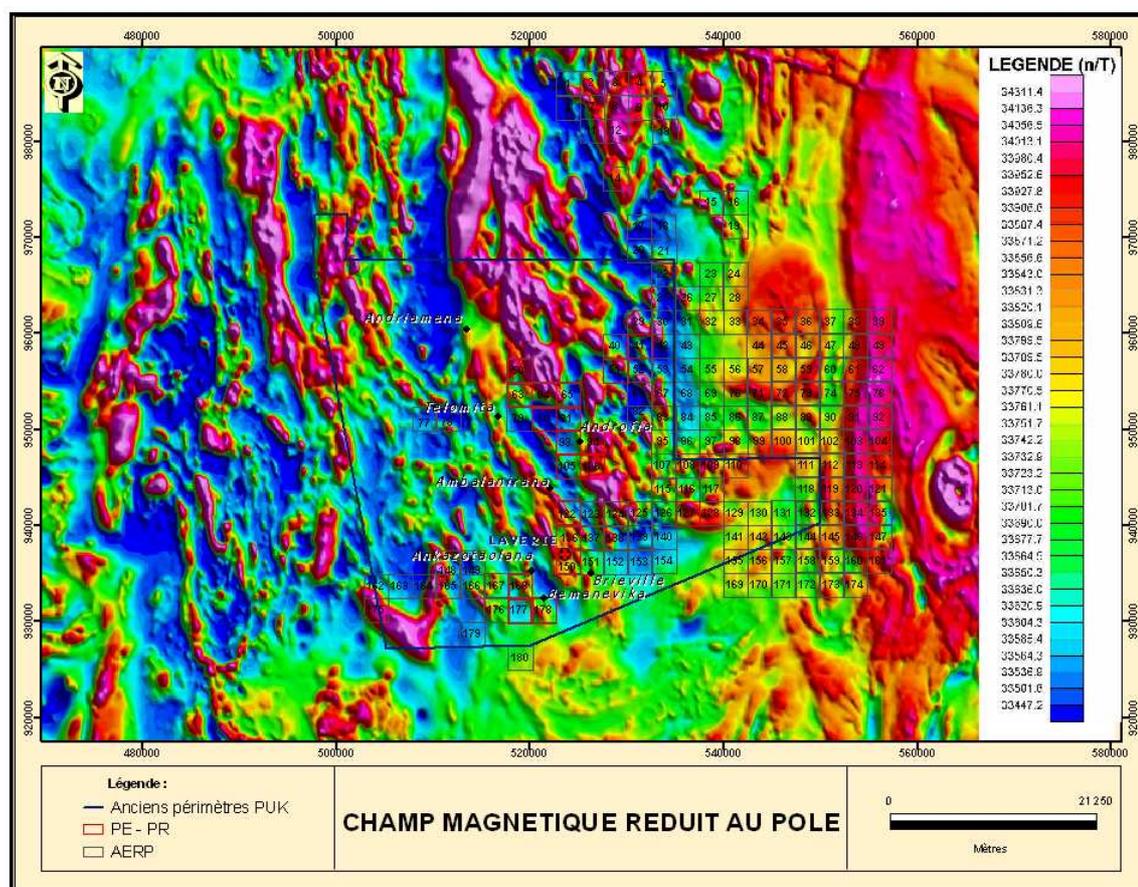


Figure 6- Carte Réduite au Pôle

Les carreaux retenus sont alors :

- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 18 19 23 26 27 28 29 30 31 34 35 36 38 39 40 41 42 43 46 48 49 50
- 51 52 54 59 61 62 63 64 65 66 67 68 70 71 72 73 74 75 76 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
- 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 105 106 107 108 109 110 112 113 116 117 119 120 121
- 122 123 124 125 127 128 134 136 137 138 139 146 147 148 149 150 151 156 157 161 162 164 165 167
- 168 170 172 173 174 175 176 177 178 179

- Carte du signal analytique (SA)

Nabighian (1972, 1984) a développé la notion de signal analytique, ou l’enveloppe, des anomalies magnétiques. Une caractéristique importante du signal analytique est qu’il est independant de la direction d’aimantation de la source quand on sait que le champ magnétique est un vecteur dont la direction et l’intensité varient en fonction du temps et du lieu d’observation. L’amplitude du signal analytique est simplement liée à la valeur de l’aimantation.

Roest et *al* (1992) montrent que l’amplitude obtenue par le signal analytique est la somme du carré des dérivées du champ magnétique total par rapport à x, y, z. L’Unité d’Andriamena où socle précambrien et roches basique-ultrabasiques se côtoient se démarquent favorablement. On n’a eu, apparemment aucun problème à choisir les carreaux dans ce secteur. A l’Est, dans la partie cristalline,

apparaissant en beaucoup plus claire sur la carte, le niveau d'altération a permis de trancher sur le choix des carreaux.

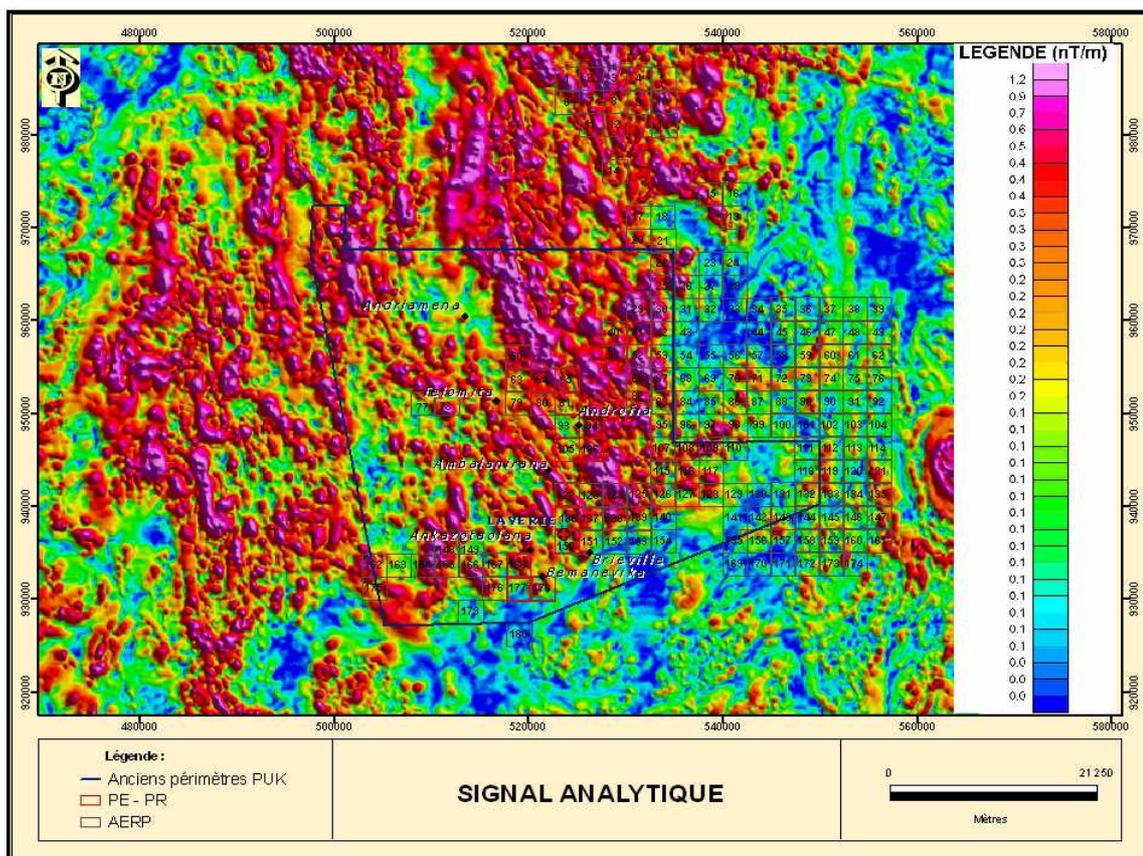


Figure 7- Carte du Signal Analytique

On a retenu ainsi les carreaux suivants :

- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 18 19 21 23 26 27 29 30 31 36 40 41 42 43 46 50 51 52 53 54 57 59
- 60 63 64 65 66 67 68 70 71 72 73 74 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 89 90 93 94 95 96 97 98 99 100
- 101 102 105 106 107 108 109 110 112 116 117 119 121 122 123 124 125 127 128 136 137 138 139 147
- 148 149 150 151 156 157 161 162 163 164 165 166 167 168 170 173 174 175 176 177 178 179

- Carte du gradient vertical (GV)

La carte du gradient vertical repose sur la mise en évidence de structures superficielles, c'est un filtre numérique passe-haut. On peut constater que les anomalies sont plus fines, plus rectilignes par rapport à ce qu'on a observé sur les trois premières cartes.

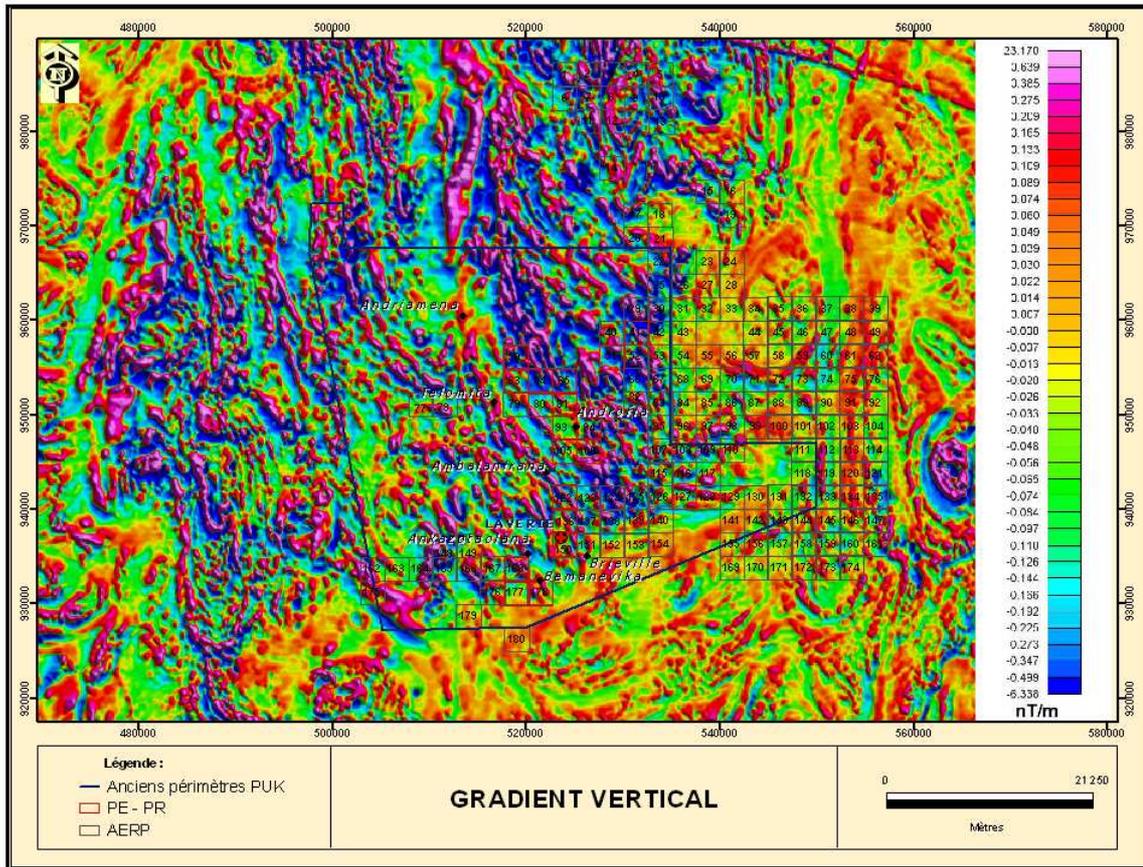


Figure 8- Carte du Gradient Vertical

Les bandes d'anomalies du champ épousent notablement les lignes de schistosité régionale. On n'a pas eu de grande difficulté à choisir les carreaux :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 18 19 21 23 26 27 29 30 31 36 40 41 42 43 46 50 51 52 53 54 57 59
 60 63 64 65 66 67 68 70 71 72 73 74 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 89 90 93 94 95 96 97 98 99 100
 101 102 105 106 107 108 109 110 112 116 117 119 121 122 123 124 125 127 128 136 137 138 139 147
 148 149 150 151 156 157 161 162 163 164 165 166 167 168 170 173 174 175 176 177 178 179

- Carte ternaire K, Th et U

Le potassium (K), l'uranium (U) et le thorium (Th) sont les trois éléments radioactifs les plus abondants dans la nature. Le K est un des principaux éléments constitutifs des roches et est le principal élément d'altération dans la plupart des gisements de minerai. L'uranium et le thorium sont présents en quantités à l'état de trace; ce sont des éléments mobiles et immobiles respectivement. La concentration de ces éléments varie selon le type de roche. Lorsque la signature «normale» d'un radioélément est interrompue par un corps minéralisé, les anomalies radioélémentaires correspondantes fournissent des indices directs utilisés en prospection.

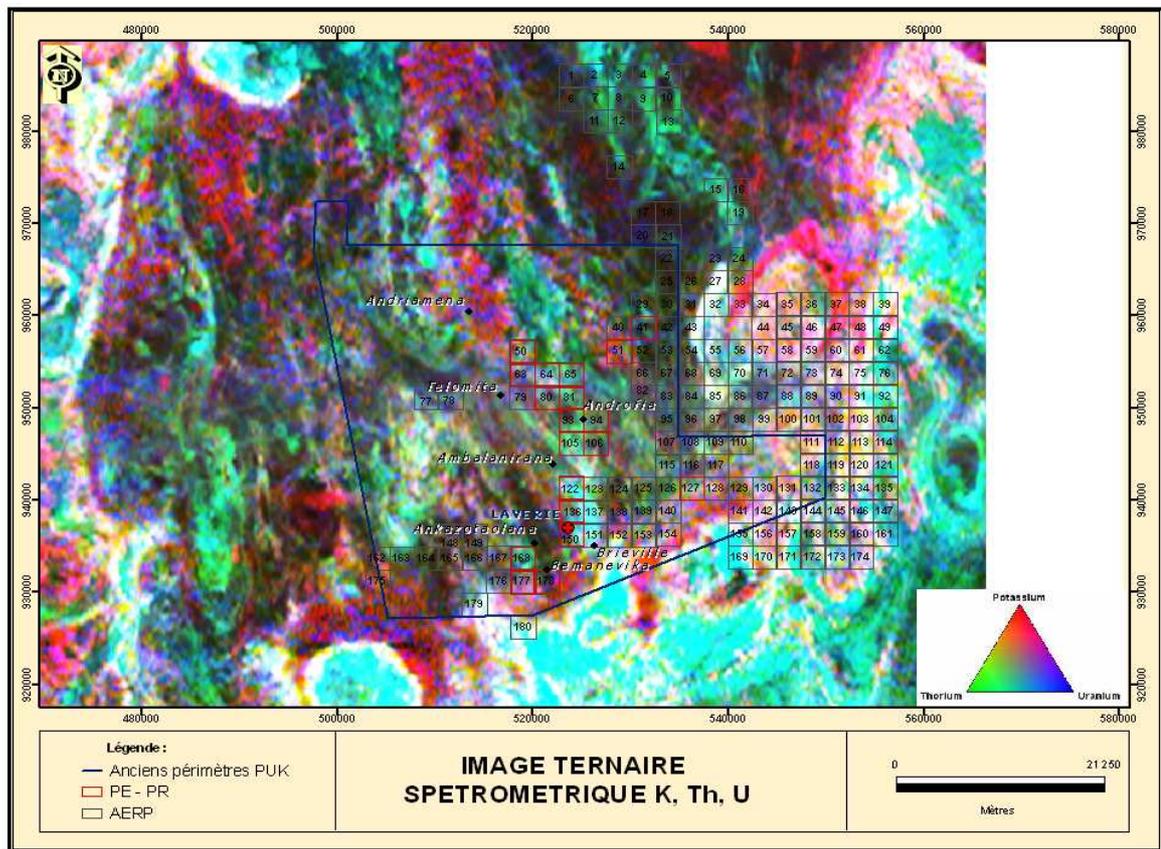


Figure 9- Image ternaire spectrométrique K, Th et U

Cette analyse essaie d'établir des liens entre les contrastes mesurés pour les radioéléments et la cartographie de la géologie du substratum rocheux ou des formations en surface et les altérations associées aux gisements de minerais. Toutes les roches et tous les matériaux qui en proviennent sont radioactifs et contiennent des quantités détectables d'éléments radioactifs.

On observe, qu'au centre, les trois éléments sont intimement liés. On a choisi donc les carreaux où les concentrations en ces trois radioéléments sont assez élevées :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 18 21 23 24 26 27 29 30 31 36 38 40 41 42 43 48 50 51 52 53 54 56 60
 61 63 64 65 66 67 68 70 73 74 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 93 94 95 96 97 98 99 100 101
 102 105 106 107 108 109 110 116 117 119 120 122 123 124 125 127 128 136 137 138 139 148 149 150
 151 155 156 162 163 164 165 166 167 168 170 175 176 177 178 179

- Choix final des carreaux

La première indication intéressante est évidemment fournie par l'extension, donnée sur les cinq cartes, des anomalies magnétiques et spectrométrie ternaire K, Th et U et la superposition d'un grand nombre de carreaux à ces anomalies géophysiques.

Finalement, un simple croisement des résultats obtenus pour chaque carte a permis de retenir finalement les carreaux suivants, représentant près de 76,4 % des carreaux proposés à l'étude :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 18 19 21 23 26 27 29 30 31 34 35 36 38 39 40 41 42 43 46 48 49 50
 51 52 53 54 56 57 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 70 71 72 73 74 75 76 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87
 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 105 106 107 108 109 110 112 113 116 117

7- Conclusion

L'analyse faite des résultats d'observations géophysiques a été volontairement limitée aux anomalies considérées comme les plus significatives compte tenu de leur intégration dans le contexte géologique et géomorphologique. Cette étude a permis, en tout cas, de choisir les carreaux intéressants pour Kraoma pour la suite de ses activités de prospection et d'exploitation. Ce qui paraît en tout cas très important, c'est la démonstration qui aura été faite de l'efficacité de la méthode d'analyse de cartes aéromagnétiques appliquée à ce type de recherche minière et combinée à une analyse d'image satellitale Landsat et de cartes géologiques au 1/100.000.

Les données de spectrométrie gamma fournissent des renseignements importants sur les processus géomorphologiques et sur les propriétés des sols qui aideront Kraoma à perfectionner les modèles géochimiques employés dans l'exploration. Pour l'interprétation, il faut bien connaître la nature des matériaux de surface et leur relation avec le substratum rocheux.

Certes, l'étude expérimentale a été faite mais la précision n'est pas excellente pour des raisons multiples, parmi lesquelles on doit citer une vérité terrain incomplète mais Kraoma s'en chargera et qu'il faudra, en outre, attendre les résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés par Kraoma pour confirmer les choix faits.

Il est à souhaiter que si les indications actuelles s'avèrent positives, la combinaison analyses d'images satellitales-cartes aéromagnétiques et spectrométriques K, Th et U étant ainsi confirmées, cette méthode, encore perfectible dans son application à la recherche des gîtes de minerais métallifères, soit adoptée comme un outil efficace d'exploration à Madagascar.

Remerciements

Les auteurs tiennent à adresser leurs sincères remerciements à la Société Kraomita Malagasy pour la mise à disposition des données et la prise en charge des frais de l'étude. Par souci de confidentialité, certains détails n'ont pas été précisés.

References bibliographiques

- Augé, T., Rakotomanana, D., 1987, Compte rendu des travaux préliminaires sur le complexes d'Andriamena, Madagascar. BRGM DAM/GIS, non publié
- Bertucat M., 1967, Roches basiques et ultrabasiques d'Andilamena, Andriamena et Marolambo et leur minéralisation. Rapport BRGM TAN 67 – A/12
- Bertucat, M., 1966, Etude géologique et prospection au 1/100 000 des feuilles de Tsiandrara, Londokomanana (O-43), Andriamena (P-43), Ampandranana (Q-43), Rapp. BM TAN66-A 30
- Bésairie H., 1966, Gîtes minéraux de Madagascar, Ann. Géol. Madagascar, fasc XXXIV
- Bouladon, J., 1986, La chromite : un minerai toujours recherché, Chronique de la recherche minière, n°485, pp. 53-63
- Brenon P., 1956, Roches basiques et ultrabasiques de Madagascar, Doc., No. 118, Serv. Géol. Madagascar
- Compagnie Générale de Géophysique (CGG), 1969, Etude par prospection gravimétrique, Région d'Andriamena (Madagascar), Rapport pour la COMINA, Rapport Telomita, 1993.
- Giraud P., 1955, Etude géologique de la feuille Andriamena, Trav. Bur. Géol., No. 68, Serv. Géol. Madagascar
- Giraud P., 1956, Prospection des pegmatites et gisements de chromite de la région d'Andriamena – Manakana, Trav., Bur. Géol. Madagascar, No. 74
- Giraud P., 1958, Les roches basiques de la région d'Andriamena à Madagascar et leur minéralisation chromifère, Université de Clermont, Thèse

- Giraud P., 1970, Sur quelques repères dans l'histoire géologique de la région d'Andriamena, C.R. Sem. Géol. Madagascar 1969, pp. 139-142
- Gonçalvès, P., 2002, Pétrologie et Géochronologie des granulites de Ultra-hautes températures de l'unité basique d'Andriamena (Centre-Nord Madagascar), Thèse, Université Blaise Pascal, p.319
- Gonçalvès, P., Nicollet, C., Lardeaux J-M., 2003, Finite pattern in Andriamena unit (north-central Madagascar): evidence for late Neoproterozoic-Cambrian thrusting during continental convergence, *Precambrian Research*, Vol. 123, pp. 135-157
- Guérot, C., Cocherie, A. & Ohnenstetter, M., 1993. Origin and evolution of the West Andriamena Pan-African mafic – ultramafic complex in Madagascar as shown by U-Pb, Nd isotopes and trace element constraints. *EUG VIII*, Strasbourg, France. *Terra Abstract*, Vol. 5, p. 387
- Jourde, G., 1966, Etude géologique et prospection au 1/100 000 des feuilles OPQ-41, R42-43, OP-44, Rapp. BRGM TAN67-A10
- Martel – Jantin B., Johan, Z., B., Augé, T., Ohnenstetter, M., 1988, Convention platinoïdes et substances connexes. Mission platinoïdes Andriamena, Rapport technique de la mission 1987, BRGM Rapport 88 MDG 018
- Paquette J-L., Goncalves P., Devouard B., Nicollet C., 2004, Micro-drilling ID-TIMS U-Pb dating of single monazites: A new method to unravel complex poly-metamorphic evolutions. Application to the UHT granulites of Andriamena (North-Central Madagascar), *Contrib Mineral Petrol*, Vol. 147, pp. 110-122
- Rakotomanana, D., 1996, Potentiel métallogénique des complexes mafiques – ultramafiques de Madagascar, Thèse, INPL/CRPG, p.243