Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 203–215
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

TÉLÉDÉTECTION ET MESURES GÉOPHYSIQUES POUR LA PROSPECTION DU GISEMENT DE FER NICKEL D'AMBATOVY, MADAGASCAR

PASCAL RAMANANTSIZEHENA[*,a], HORTENSE ANDRIAMANANTENA[b] et SETA RANDRIAMAMPIONONA[b].

[a] *Département Information Géographique et Foncière*
École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A)
B. P. 1500, Antananarivo 101, Madagascar
Téléphone : (261) 20 22 490 00 ; courriel : pramanantsizehena@dts.mg

[b] *Division Géologie*
Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques
B. P. 3330, Antananarivo 101
Ministère de la Recherche Scientifique, Antananarivo, Madagascar
Courriel : mrs@wanadoo.mg

(soumis le 1er mars 2002 ; révisé le 21 mai 2002 ; accepté le 18 décembre 2002)

Le gisement de fer-nickel d'Ambatovy au sein du massif d'Antampombato contiendrait au moins 725 000 t de nickel, quantité jugée toutefois insuffisante pour envisager son exploitation industrielle. Cependant, des infrastructures adaptées à une telle opération existent déjà dans cette région. C'est dans cette optique que nos recherches ont été menées pour vérifier la possibilité d'un prolongement éventuel de ce gisement sous la zone sédimentaire au nord-ouest de ce massif. Des techniques de détection à distance ont été utilisées pour être en conformité avec la réglementation en vigueur concernant la protection de l'environnement et atteindre un coût de production le plus bas possible. L'analyse des données obtenues à partir de photographies aériennes datant de 1965 et d'une image ETM+ de Landsat-7 de 1999 nous a permis d'établir une carte de synthèse. Celle-ci révèle la présence d'une formation gneïssique non décelée sur la carte dressée antérieurement par le Service géologique. Elle permet ainsi de distinguer quatre entités géologiques au niveau du site étudié, dont la formation sédimentaire précédemment mentionnée. La carte d'anomalies magnétiques établie lors de la campagne de mesures géophysiques a mis en évidence l'existence d'une formation à haute susceptibilité magnétique. Celle-ci est attribuée à l'extension du gisement sous la partie sédimentaire située au nord-ouest du massif. Par ailleurs les sondages électriques ont fourni les épaisseurs du mort terrain sus-jacent et du minerai recherché. L'hypothèse de recherche formulée est ainsi vérifiée.

Mots-clefs : Cartes thématiques ; ETM+ de Landsat ; prospection minière ; masse intrusive ; photos aériennes ; mesures géophysiques.

REMOTE SENSING AND GEOPHYSICAL MEASURES FOR PROSPECTING THE STRATUM OF IRON NICKEL IN AMBATOVY, MADAGASCAR

The subsoil of Madagascar contains a great potential in mining resources but its efficient production represents only today 1 to 2 % in value of the Malagasy economy. The existence of a stratum of iron nickel in Ambatovy within the massif of Antampombato (Province of Toamasina) is revealed in a report concerning the geological works achieved in this region. Evaluated at least to about 0,72 million tons, the quantity of nickel metal was insufficient to justify an industrial exploitation of the ore. However such an operation would pay to the region that already possesses some basic infrastructures. It is then necessary to estimate the total quantity of nickel-bearing lateritic soil contained in a possible extension of that stratum in the sedimentary zone located to the North- West of the massif. It is therefore about verifying this hypothesis of the extension by the use of remote sensing techniques combined with geophysical measures. Classic methods of prospecting would indeed entail a prohibitive cost and especially an irreversible deterioration of its immediate environment. The aerial photos of 1965 used in this survey permitted to establish thematic maps of different occupations of soil that are in a more or less direct relation to the subjacent formation. These information have been completed by the data extracted from the channels Red, Near and Middle Infrared of the ETM+ sensor of Landsat-7 in order to corroborate the separations of the aforesaid classes by the limits between the present soil cover. Four different zones corresponding to the sedimentary formation, to gneiss, to the migmatite and to the gabbro-peridotite of the intrusive mass were then mapped. The geophysical measures have been essentially done in the likely extension zone of the stratum. The electric borings proved with the help of a tabular model the existence of five different resistance grounds as well as the evaluation of the thickness of the overlaying lacustrian sediment. The measures of the anomaly of the vertical component of the terrestrial magnetic field were done in different points chosen on three clearly defined profiles. It led to the realisation of the magnetic anomalies map. This map reveals the presence of high magnetic susceptibility formation. This formation is probably related to the extension of the gabbroïque massif in the research areas. The results of the

[*] Correspondant principal

geophysical measures thus confirm the delineation of the extension of the intrusive stack and contribute to the assessment of the potential quantity of corresponding ores. It brings in this way an important contribution to the economy of the region. The used method constitutes further a certain novelty for the following reasons: it reconciles the mining prospecting and the preservation of the environment, it allows a previous assessment of the cost of the production operations, it presents a scientific interest through the possible survey of the contact metamorphism between the intrusion and the cashing rock.

Keywords : Thematic maps ; Landsat ETM+ ; mining prospection ; intrusive mass ; aerial photographs ; geological measures.

1. INTRODUCTION

L'écart de plus en plus grand entre le potentiel en ressources minières du sous-sol de Madagascar et leur faible contribution au développement du pays ne peut plus laisser personne indifférent. Le gisement de fer-nickel d'Ambatovy situé au sein du massif d'Antampombato dans la province de Toamasina, fait partie de ces ressources non exploitées (figure 1). Il est révélé dans un rapport résumant les travaux géologiques effectués dans cette région (Delbos et Rantoanina, 1960). Ce site renfermerait des réserves estimées à 56 000 000 t avec 48 % de fer et 1 % de nickel, ce qui correspond à une quantité minimale en nickel métal de 725 000 t. Ce tonnage n'est certes pas suffisant pour permettre une véritable exploitation industrielle. Toutefois, la situation géographique du gisement se prête aussi bien à un traitement local qu'à l'exportation du minerai grâce, d'une part, à la proximité de barrages hydroélectriques et, d'autre part, à l'existence d'un réseau de chemins de fer et de routes le reliant au port international de Toamasina.

L'hypothèse d'une extension du gisement sous la zone sédimentaire adjacente au massif est alors à vérifier. Dans l'affirmative, une étude approfondie du prix de revient de la tonne de minerais sera réalisée. L'approche choisie pour prouver cette extension du gisement repose sur l'utilisation des techniques de la télédétection aérospatiale combinée avec des mesures géophysiques de type électrique et magnétique. Les avantages de cette approche par rapport aux méthodes classiques de prospection sont nombreux.

Par exemple, elle aboutit à une délimitation relativement rapide de la zone d'extension de l'intrusion sans contrevenir aux dispositions actuellement en vigueur en matière d'études d'impacts environnementaux. On peut alors parler de développement durable d'une région qui est le contexte international dans lequel tout investissement d'une importance donnée doit être décidé.

Elle permet aussi de prévoir la rentabilité économique d'une éventuelle exploitation industrielle grâce à une réduction importante du coût de production.

Elle peut enfin largement contribuer à l'étude du métamorphisme de contact entre la masse intrusive gabbroïque et l'encaissante. Cette étude peut alors faire l'objet d'un thème de recherche dont l'intérêt scientifique n'est plus à démontrer. De nombreux travaux de recherche sur ce thème sont actuellement en cours dans au moins quatre régions différentes de Madagascar.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Le site est à environ 20 km au nord de Moramanga, ville située à 110 km à l'est de la capitale, Antananarivo. Il se trouve dans une région sillonnée de cours d'eau et parsemée de lacs et d'étangs peu ou très profonds dont la présence et la fréquence traduisent celles des dépressions y afférant. Son relief est tantôt moutonné arrondi tantôt accidenté. La forme, l'aspect et l'importance de ce relief sont fonction de la formation géologique sous-jacente.

Sa végétation est en partie composée d'une forêt naturelle dont la présence est associée aux conditions géographiques du secteur concerné. Dans le cas présent, il est toutefois assez délicat d'établir des relations très précises entre les types de peuplements et les conditions de leur existence. En effet, la recherche est plutôt basée sur les expressions topographiques du paysage et les caractéristiques de ce dernier dépendent généralement de la nature pétrographique des roches, du style tectonique, du climat sous lequel elles se développent ainsi que des modifications sur l'environnement qui en résultent. Les fondements théoriques de cette méthode sont décrits par Scanvic (1983). Les pins et eucalyptus formant certes un ensemble touffu n'ont été introduits que tardivement et ne sont donc pas révélateurs du type de sol où on les rencontre.

Il faut noter également l'existence de lavaka (excavations) qui est un phénomène d'érosion typique des formations latéritiques dans les pays tropicaux.

Leur présence et leur fréquence sont liées aux formations géologiques qu'ils affectent.

Le site est composé essentiellement d'une masse intrusive gabbroïque relativement récente (500 millions d'années) profondément latéritisée jusqu'à moins 30 m de profondeur. Cette masse se trouve au sein d'un bouclier ancien (2 800 millions d'années) dont la couverture en surface est constituée d'une carapace ferrugineuse présentant une certaine concentration d'hématite (Delbos et Rantoanina, 1960). Ce bouclier joue le rôle de roche

encaissante. Cette description du gisement permet de mieux comprendre le choix de la méthode utilisée pour vérifier l'hypothèse de son extension dans la zone sédimentaire.

Le site occupe dans sa totalité une superficie d'au moins une centaine de kilomètres carrés, ce qui justifie l'utilisation des photos aériennes et de l'imagerie satellitaire pour son étude.

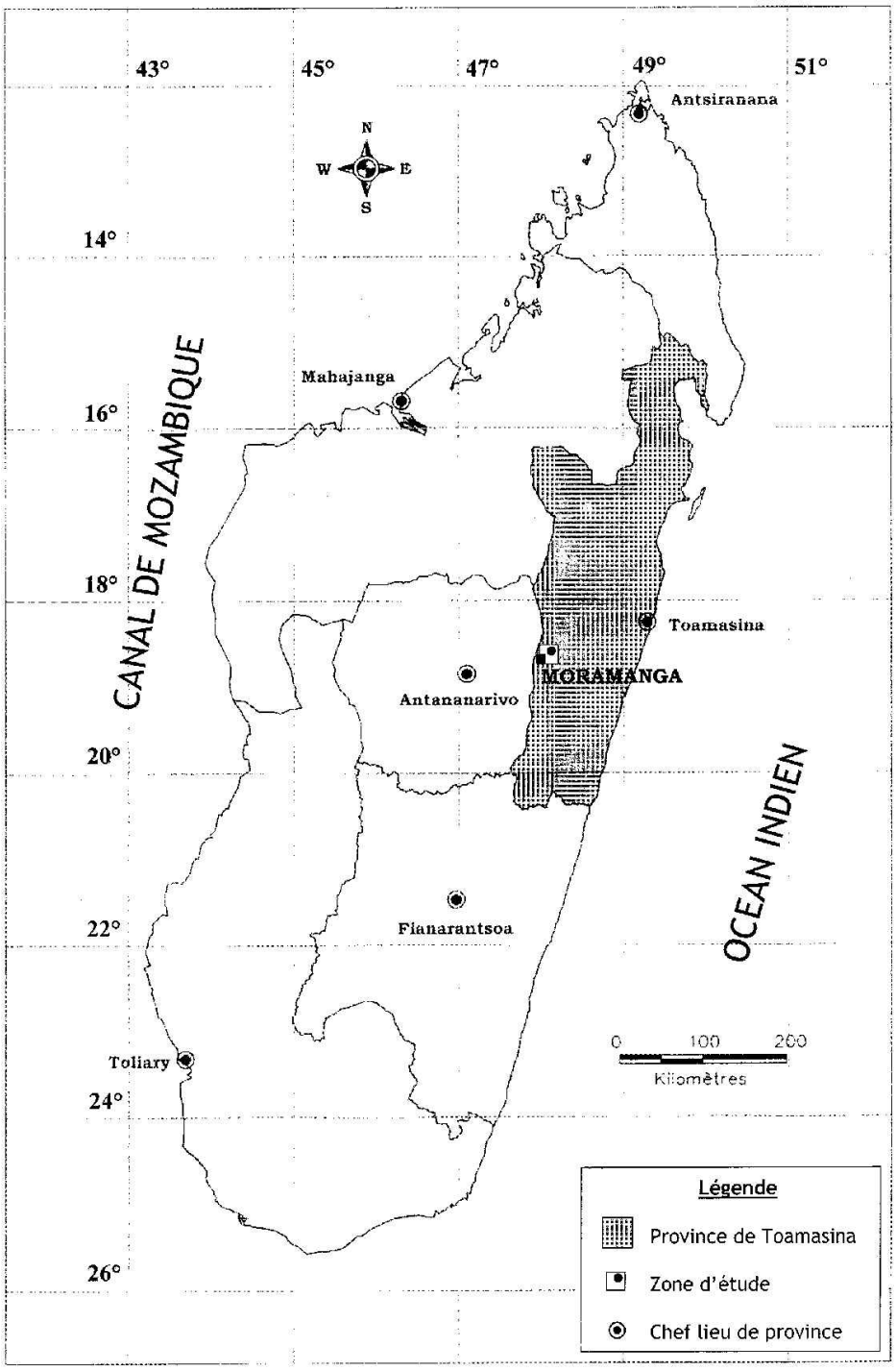


FIGURE 1 Carte de localisation de la zone d'étude. *Place of the studied zone.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Photographies aériennes

L'ensemble du secteur étudié a été couvert à l'aide de 46 photos à l'échelle du 1/25 000 et datant de 1965. Celles-ci ont été obtenues auprès de l'Institut de cartographie et d'hydrographie, dont le sigle en malgache est FTM. Une vérification de la ligne de vol a permis de les répartir en quatre groupes différents. En étudiant chaque série de photos par couplet, d'une part, et en respectant le principe de leur recouvrement latéral, d'autre part (Dizier et Léo, 1989), nous avons obtenu quatre bandes consécutives disposées parallèlement à la ligne de vol. Celles-ci sont composées d'est en ouest de :

– 1re bande : n°116 à 107 ;
– 2e bande : n° 079 à 091 ;
– 3e bande : n° 338 à 329 ;
– 4e bande : n° 295 à 306.

Ces quatre bandes ainsi rassemblées par mosaïquage représentent une vue aérienne du secteur étudié (figure 2).

Nous avons ensuite reporté sur une carte topographique (échelle du 1/100 000) les limites du terrain observables avec les photos aériennes. Pour ce faire, nous avons utilisé des éléments ponctuels ou linéaires visibles à la fois sur la photo et sur la carte comme, par exemple un cours d'eau, une route ou voie ferrée, *etc.*

Différentes cartes thématiques relatives aux lacs et étangs, à la forêt naturelle, aux lavaka et à l'hydrologie ont pu alors être établies après interprétation des différents stéréogrammes. Chacun de ces thèmes présente des particularités liées à la formation géologique sous-jacente tel que mentionné précédemment.

L'étude analytique des cartes thématiques comprend deux étapes. La première consiste à analyser les données relevées à la suite des observations stéréoscopiques. La seconde consiste à dégager des ensembles dominants en fonction :

– de la forme, de l'aspect ou de l'allure dans le cas de l'hydrographie ou encore du relief (Scanvic, 1983) ;

– de la densité ou de la dominance dans le cas de la végétation ;

– de la fréquence d'apparition dans le cas des lavaka, des lacs et des étangs.

Certains éléments de la carte thématique relative aux lacs, étangs et forêt naturelle se trouvent, à titre d'exemple, sur la figure 2.

3.2. Image satellitaire

L'étude des photos aériennes a été complétée par l'analyse d'une image ETM+ de Landsat-7 datant de novembre 1999 avec une résolution spatiale de 30 m.

3.2.1. Amélioration de la visualisation.

Un choix adéquat de trois canaux parmi les sept disponibles constituait la première étape de l'analyse de l'image satellitaire. Les canaux 3, 4 et 5 c'est-à-dire rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge ont été retenus. Ils correspondent aux bandes spectrales (0,63–0,69 µ) , (0,75–0,90 µ) et (1,55–1,75 µ). Dans la composition obtenue à l'aide de ces canaux, les nuances de rouge ont été attribuées aux niveaux de gris du canal 4 qui semblait le plus corrélé avec la végétation, celles du vert au canal 5 et celles du bleu au canal 3 qui était le moins riche en information. L'image encore floue résultant de la superposition des trois plans d'image a nécessité l'utilisation de la méthode d'équipopulation (Bonn,1992). Complétée par un étalement manuel de la distribution des niveaux de couleur, cette opération a permis de renforcer le contraste et d'obtenir une image améliorée (figure 3). La légende définitive se trouve sur la figure 4.

3.2.2. Corrections géométriques

Les corrections géométriques sont généralement constituées par larectification de toute distorsion géométrique de l'image qui peut être due au relief, à l'altitude du satellite, à l'angle de visée, à la vitesse de la prise de vue. Dans le cas de notre image, ces types de distorsion ont déjà été corrigés par le personnel de l'USGS (United States Geological Survey), mais les corrections géométriques et de géoréférencement effectuées par ce dernier ont été faites en projetant les images dans le système de projection UTM. La grande différence entre les systèmes de projection UTM et Laborde (système de coordonnées à Madagascar) a ainsi imposé une nouvelle correction et un rééchantillonnage de l'image. Quatre points d'amer reconnaissables à la fois sur les trois images ont été alors utilisés malgré la présence des nuages sur celles-ci. Les caractéristiques des corrections sont les suivantes : l'écart type est de 0,91 pixel en X et de 0,103 pixel en Y avec comme écart type maximum 1,405 pixel en X et 0,118 en Y. Ces chiffres indiquent les coefficients du polynôme de transformation , la fonction de transformation adoptée ayant été la polynomiale de degré 1 (Bonn et Rochon, 1992).

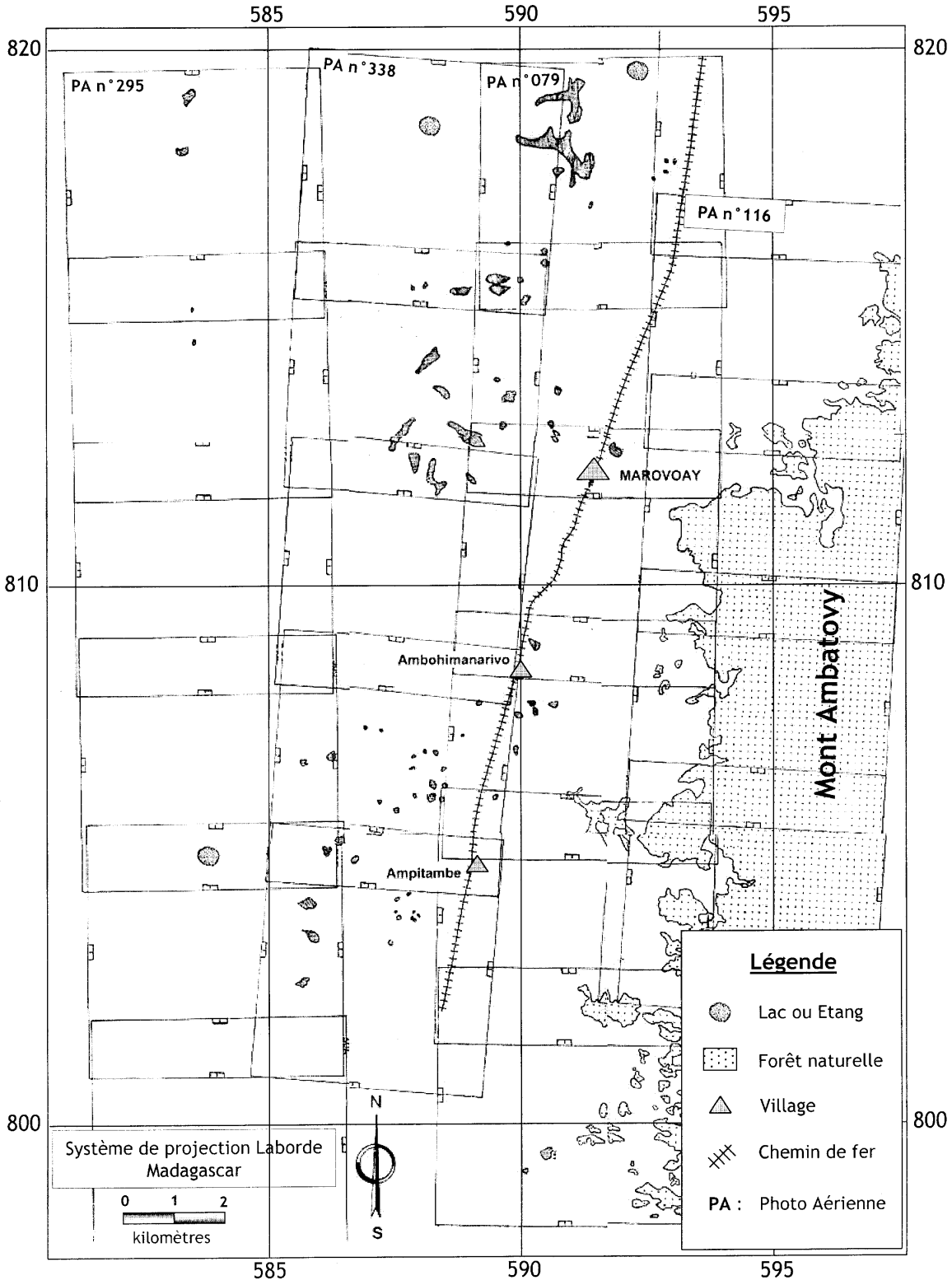


FIGURE 2 Zone d'étude couverte par les photos aériennes. *Studied area covered by the aerial photos.*

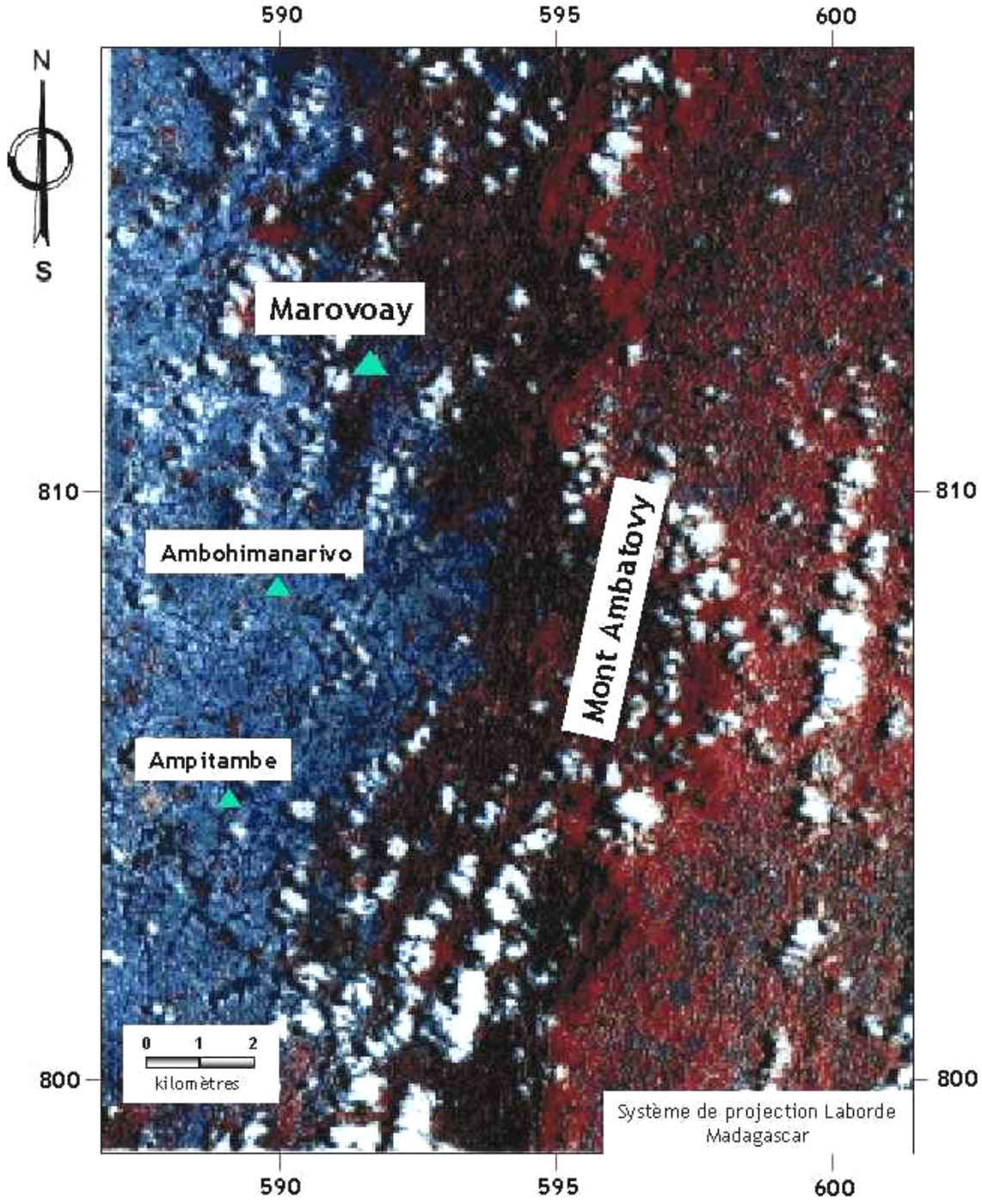


FIGURE 3 Partie de l'image améliorée ETM+ correspondant à la zone couverte par les photos aériennes. *Common zone between a part of the improved ETM+ image and the aerial photos.*

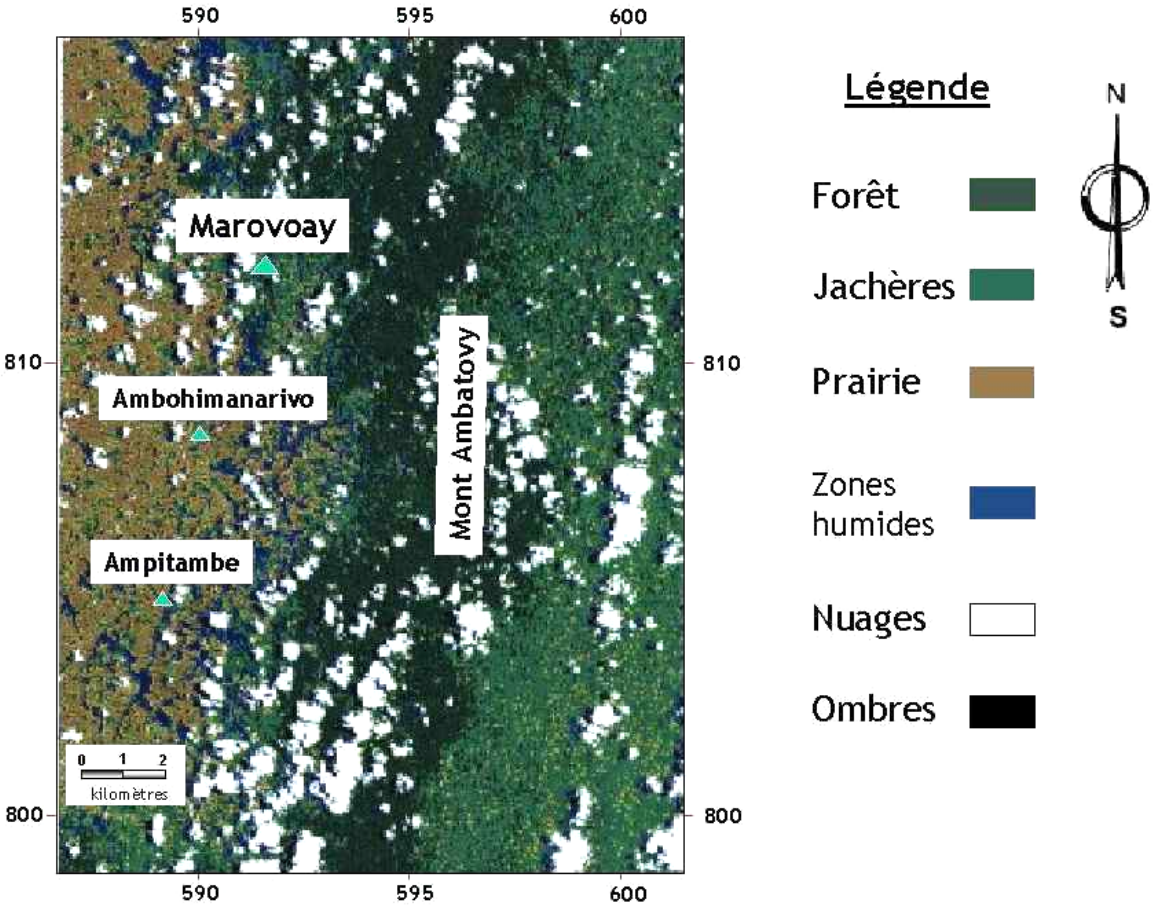


FIGURE 4 Résultats de la classification faite sur l'image ETM+. *Results of the classification proceeded on the ETM+ image*.

3.2.3. Classification de l'image

Les trois canaux précédents ont été utilisés dans la classification pour les raisons suivantes. Le proche infrarouge sert généralement pour quantifier la biomasse tandis que le canal rouge constitue un excellent indicateur de végétation chlorophyllienne. Le moyen infrarouge quant à lui, constitue une bande sensible à la quantité d'eau dans le feuillage (Girard et Girard, 1989). Les classes choisies sont la forêt naturelle, les jachères, les prairies, les zones humides ainsi que les nuages et les ombres. La forêt naturelle ainsi que les lacs ou étangs de la figure 2 sont alors intégrés dans ces différents thèmes. La disponibilité de plusieurs données exogènes relatives à ces classes (carte d'occupation du sol de la zone étudiée faite par la FTM en 1997, inventaire écologique et forestier national par Rabary, 1994, du Ministère des eaux et Forêts) nous a conduits à choisir la classification dirigée du logiciel Multiscope avec la méthode du maximum de vraisemblance. La distribution des valeurs radiométriques dans les parcelles d'entraînement y est décrite par une fonction de densité probabiliste. Celle-ci est fondée sur la théorie de probabilité qu'un pixel donné appartienne à chaque classe et l'attribue à celle où il a obtenu le maximum de probabilité d'appartenance (Bonn et Rochon, 1992). Sur le tableau 1, on donne les données numériques moyennes des parcelles d'entraînement utilisées dans notre étude par ce logiciel.

TABLEAU 1 Données numériques brutes relatives aux parcelles d'entraînement. *Averaged numerical data used for the ground truth.*

	Canal proche	Canal moyen	Canal
Classes	infrarouge	infrarouge	rouge
Forêt	86	45	25
Jachères	84	53	40
Prairie	75	61	61
Zones humides	49	49	34
Nuages	144	165	161
Ombres	24	42	20

La classification proprement dite a été réalisée en trois étapes classiques dont la réalité de terrain.

L'analyse des éléments diagonaux de la matrice de confusion, dont les valeurs sont comprises entre 88,8 % (jachères) et 99,2 % (forêt naturelle) a permis de réaliser la classification définitive de l'image. Nous avons utilisé la méthode de classification dirigée fondée sur le principe du maximum de vraisemblance. Le plus grand problème rencontré fut la détermination des contours des nuages dont les valeurs radiométriques étaient très diversifiées. Une opération d'homogénéisation a peaufiné cette classification, elle a été réalisée avec les paramètres suivants : taille du voisinage d'homogénéisation à 3×3 pixels, seuil d'homogénéisation à 4 pixels et nombre maximum de pixels ayant la même radiométrie que le centre à 2.

Cette opération d'homogénéisation, relativement rapide, équivaut à un filtre passe bas et le seuil d'homogénéisation correspond au nombre minimum de points devant avoir la radiométrie majoritaire pour que la modification de radiométrie soit effective. Cette équivalence est décrite par Bonn et Rochon (1996). L'image classée correspondante constitue la figure 4.

3.2.4. Synthèse des données aérospatiales

La synthèse des différentes cartes thématiques provenant des photographies aériennes et de l'image satellitaire a permis de délimiter quatre types de formations dénommées A, B, C et D (figure 5). Cette synthèse consistait à corroborer les limites séparant les différentes classes retenues par la réalité formée par les couvertures actuelles du sol. La nature des formations affleurantes a été contrôlée par une vérification in situ. La formation A est une roche sédimentaire composée d'une série d'alternances de formations d'argile sableuse et de sable argileux. La formation B est une formation gneissique dont les altérations au niveau des minéraux sont semblables à celles de la biotite et de l'amphibole. La formation C est une formation latéritique de migmatite caractérisée par sa texture nébuleuse avec souvent de larges confusions de teinte claire et rosâtre. La formation D est une formation de gabbro-péridotite dont les latérites sont plus argileuses (absence d'éléments siliceux) et où la teinte ocre jaune devient dominante.

Des rapprochements avec des données documentaires, citées au paragraphe 3.2.3, ont permis d'aboutir au résultat qualitatif selon lequel la formation D représente le complexe intrusif basique qui constitue le mont Ambatovy dont l'encaissante n'est autre que la formation C.

3.3. Mesures géophysiques

3.3.1. Mesures électriques

Des sondages électriques ont été effectués sur des terrains tabulaires dans la zone d'extension probable du gisement à l'aide d'un appareil de mesure de résistivité de marque ABEM SAS 300. Ces sondages furent réalisés aux points numérotés 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 de la figure 6 et qui se trouvent donc essentiellement sur la partie sédimentaire située au nord-ouest du massif intrusif. Une interprétation d'après un modèle tabulaire (Tabbagh, 1999) a fourni une bonne estimation de l'épaisseur des sédiments lacustres sus-jacents tout en révélant la présence de cinq terrains de résistivités différentes. Cette épaisseur varie entre 30 cm et 20 m ce qui va relativement faciliter l'extraction et l'estimation des minerais recherchés.

3.3.2. Mesures magnétiques

Des mesures de l'anomalie ΔF de la composante verticale du champ magnétique terrestre (exprimée en gammas) ont été réalisées suivant trois profils P1, P2 et P3 (figure 6) où P1 et P2 sont parallèles entre eux et orientés perpendiculairement à la direction présumée de l'extension du gisement.

Le profil P1 passe sur une partie affleurante du gabbro-péridotite et contient 13 points de mesure. Le second P2 est un peu plus au nord et recoupe la structure, s'il y a extension, vers le nord-ouest ; il contient 17 points de mesure. Le troisième profil P3 longe la route Moramanga–Morarano et permet avec ses 25 points de mesure de compléter les données. Les mesures suivant ces profils étaient effectuées à l'aide d'un magnétomètre à protons marque Géometrix tandis qu'un autre, de marque Scintrex, servait à réaliser des mesures toutes les 15 minutes sur la station de base de Marovoay. La localisation des points de mesure sur le terrain a été faite à l'aide des photographies aériennes et de cartes topographiques à l' échelle du 1/100 000 des années 1960. Chacun des profils P1 et P2 avait environ 20 km de longueur. Sur chacun de ces profils la valeur maximale de ΔF se trouvait dans la direction supposée de l'intrusion (figure 7). La carte d'anomalies magnétiques qui en résultait (figure 8) révèle la présence d'une formation de haute susceptibilité magnétique. Cette formation est probablement liée au prolongement du massif gabbroïque dans la région d'étude.

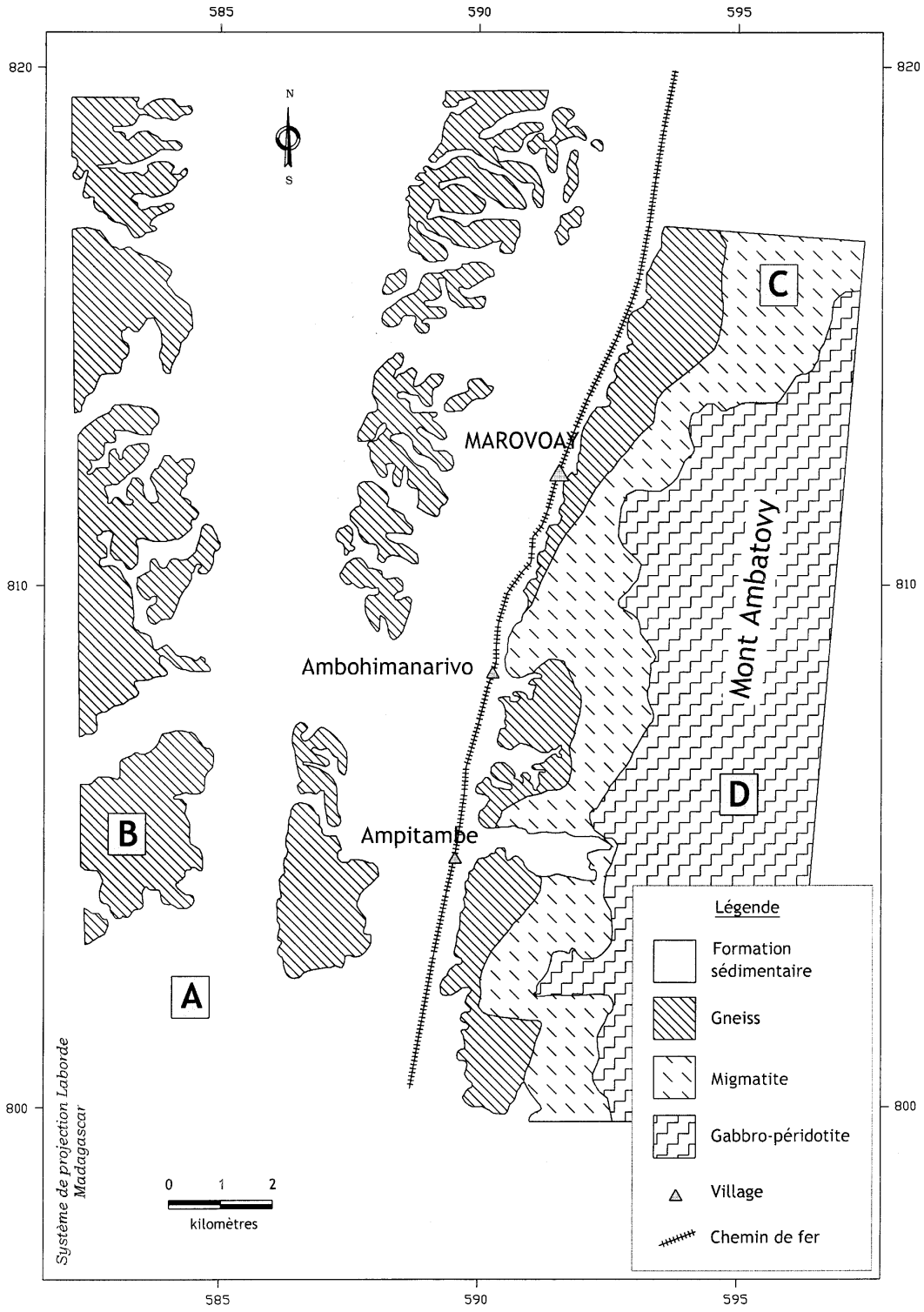


FIGURE 5 Visualisation des quatre formations géologiques constituant le site étudié. *Presentation of the four geological formations forming the site.*

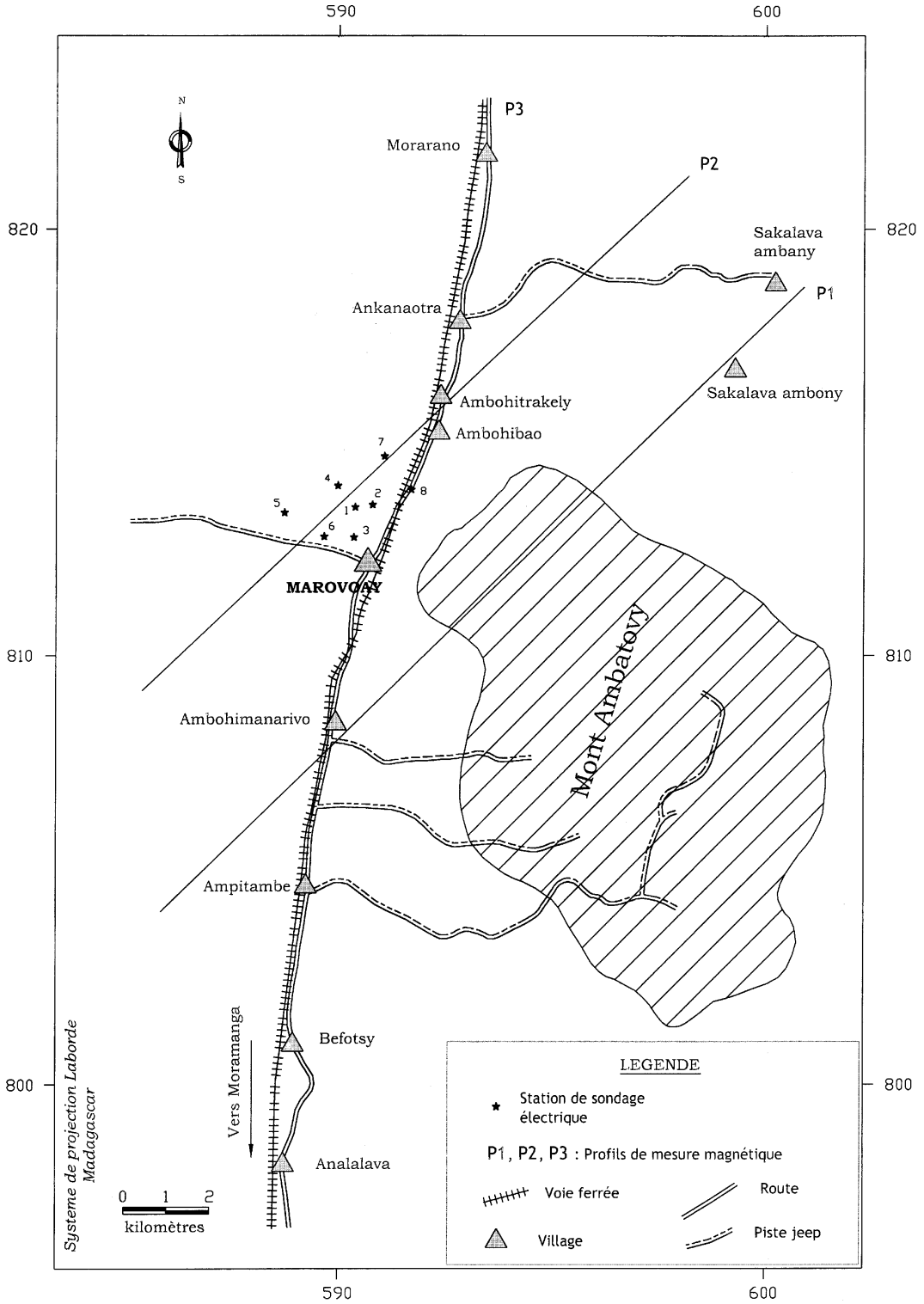


FIGURE 6 Emplacement des profils de mesure magnétique et des stations de sondage électrique. *Localization of the profiles of magnetic measure and of the stations of electric soundings.*

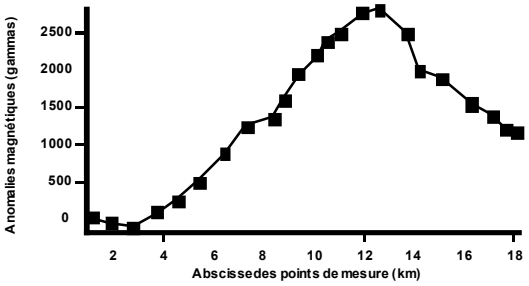


FIGURE 7 Exemple de courbe montrant l'allure des anomalies magnétiques le long des profils P1 et P2. *Example of the shape of magnetic anomalies measured along the P1 and P2 profiles.*

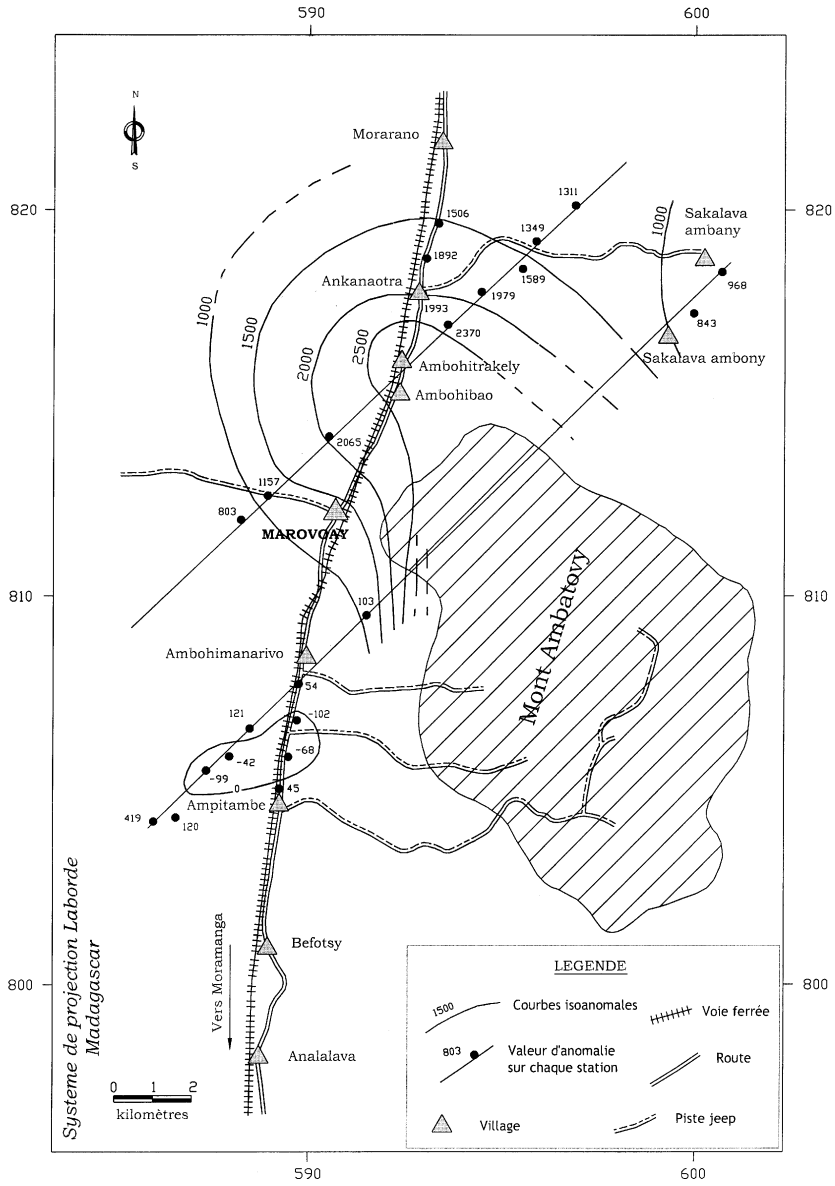


FIGURE 8 Tracé des courbes isoanomales sur la zone d'extension probable du gisement. *Plotting of the magnetic anomalies curves above the presumed zone of extension.*

4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La combinaison de l'analyse des photographies aériennes et du traitement de l'image satellite ETM+ de Landsat-7 a conduit à l'établissement de façon relativement rapide de la carte géologique de la zone étudiée. Le recoupement des données obtenues à partir de ces deux supports d'information a montré une fois de plus la complémentarité des bandes spectrales visible et infrarouge dans l'utilisation de la télédétection aérospatiale en prospection minière. Les informations ainsi obtenues figurent dorénavant dans la série des résultats de recherche récoltés depuis la fin des années 1970 (Cole,1977). C'est l'aboutissement de la synthèse des informations provenant de deux sources différentes et prises à des dates différentes. La combinaison de données fournies par des capteurs différents est en effet une pratique relativement courante en recherche géologique et minière (Daily and Elachy, 1978 ; Kahle et *al*., 1980). Cette synthèse a non seulement permis la délimitation recherchée mais a aussi de beaucoup réduit la durée de l'opération de réalité du terrain. Cette délimitation de l'extension du gisement a ensuite été confortée par les résultats de la campagne de mesures géophysiques. Deux types de données obtenues de manière indépendante ont ainsi conduit vers une même conclusion. La méthodologie adoptée pour vérifier l'hypothèse de recherche s'est donc avérée efficace et pour le moins bien appropriée dans le cas d'Ambatovy. Scanvic (1978) a procédé de manière analogue en utilisant un ensemble intégré de techniques pour cartographier les structures superficielles et profondes susceptibles de constituer des champs géothermiques au mont Dore en France. Une étude objective, exhaustive et approfondie des résultats obtenus nécessite toutefois de bien connaître au préalable les possibilités mais aussi les limites des outils utilisés.

5. DISCUSSION

La particularité et la spécificité de la méthodologie employée résident dans la compatibilité et dans la complémentarité des résultats apportés par la télédétection aérospatiale et les mesures géophysiques. En effet la délimitation possible sinon probable du gisement est obtenue par la répartition des couvertures végétales et la synthèse des cartes d'occupation du sol du site étudié, tel que mentionné au paragraphe 3.2.4. Cette extension est en corrélation avec la présence d'anomalies magnétiques révélatrices de l'existence d'une formation à forte susceptibilité magnétique. Les mesures géophysiques permettent par ailleurs une évaluation du volume de minerais présent sur le site grâce aux mesures électriques complétées par des prélèvements et des analyses d'échantillons en des points bien déterminés. Les données correspondantes ne figurent toutefois pas in extenso dans cet article où la priorité est donnée à l'absence de contradictions entre les déductions faites à partir des différents résultats obtenus. Ces derniers n'excluent toutefois pas d'ouvrir la discussion sur leur éventuelle amélioration et donc le renforcement de leur validité. Deux remarques peuvent alors être formulées. La première concerne la classification de l'image ETM+ lors de laquelle a été mentionné que la détermination des contours des nuages posait un problème particulier. La question que l'on pourrait se poser est alors la suivante : l'application d'une analyse de texture combinée avec une analyse spectrale de l'image aurait-elle entraîné une précision supplémentaire notable dans l'opération de classification ? En effet, dans la négative, le temps de calcul serait inutilement augmenté alors qu'une simple opération d'homogénéisation a suffi pour résoudre, peut être provisoirement, ce type de problème. La seconde se rapporte aux mesures géophysiques. L'anomalie ΔF du champ magnétique par rapport à la base (située à Marovoay) déterminée au niveau de chaque station a été obtenue par différence entre le champ moyen mesuré (une série de 3 à 5 mesures a été effectuée à chaque station) et la valeur relevée à la base au moment de la mesure. Ainsi, les valeurs de ΔF aux extrémités nord-est des profils P1 et P2 sont élevées par rapport à celles du sud-ouest. Cette différence est due au fait que ces profils traversent le socle cristallin au nord-est alors, qu'au sud-ouest, ils sont en terrain sédimentaire.

Le socle cristallin possède en effet une susceptibilité magnétique non négligeable liée à la forte valeur de l'aimantation rémanente du gabbro selon des travaux réalisés antérieurement (Rémiot, 1968).

Ces fortes valeurs de ΔF liées au socle cristallin sont toutefois relativement faibles comparées à celles dues au prolongement du gisement sous la formation sédimentaire et observées sur la carte d'anomalies magnétiques. Il n'y a donc pas de risque de fausse interprétation de ces courbes iso-anomales. Cette remarque nous permet alors d'exclure, du moins au niveau de notre recherche, la nécessité d'effectuer des mesures gravimétriques (souvent associées aux mesures magnétiques) pour différencier l'effet du socle et du gabbro. Une cartographie détaillée de l'ensemble du site pourrait en effet imposer la réalisation de telles opérations. Rappelons toutefois que les résultats d'analyse des échantillons prélevés sur la zone sédimentaire confortent de façon satisfaisante

l'interprétation de la carte d'anomalies magnétiques sur la figure 8.

Globalement parlant, la méthode choisie n'était peut-être pas tout à fait idoine car il s'agissait avant tout d'apporter une solution pratique donc facile à mettre en œuvre pour résoudre un problème concret posé par des décideurs et exploitants miniers. C'est pourquoi la solution proposée, qui doit être avant tout opérationnelle, repose sur des techniques ayant déjà fait chacune leur preuve. Elle a fait apparaître en particulier le gneiss (formation B sur la carte de synthèse de la figure 5) qui ne figure pas sur la carte établie au 1/100 000 par le Service géologique, mais y est assimilé à la migmatite, c'est-à-dire à la formation C sur notre carte de synthèse. Ce détail anodin en apparence constitue néanmoins un des aspects novateurs de la méthodologie adoptée et milite ainsi en sa faveur. Compte tenu de ces différentes remarques, nous pouvons donc affirmer sans trop de risque de nous tromper, que l'hypothèse formulée au départ et qui est à l'origine de ces différentes investigations est vérifiée.

6. CONCLUSION

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans cette étude ont mis en évidence l'efficience de la méthodologie adoptée ; elle est basée sur l'opérationalité et la complémentarité des techniques de détection à distance utilisées. Il devient donc possible de faire une évaluation relativement précise de la quantité de minerais disponible sur le site considéré, ce qui permet la connaissance préalable de la rentabilité de leur exploitation. Il faut exploiter dorénavant les apports de cette approche dans l'étude du métamorphisme de contact entre la masse intrusive gabbroïque et les roches encaissantes gneissiques et migmatitisées. La présence du gneiss sur la carte de synthèse et son absence sur la carte du Service géologique constituent un argument de poids en faveur de cette voie de recherche. Cette étude a montré par ailleurs qu'on peut concilier prospection minière et conservation de l'environnement en vue du développement durable d'une région. L'extension du gisement sous la couche sédimentaire a été prouvée par une méthode différente de celle couramment utilisée par le monde professionnel de la prospection minière. Forts de cette expérience nous envisageons la réalisation prochaine d'une étude analogue sur une autre région avec des images ETM+ de SPOT-4 qui comportent donc le moyen infra rouge.

Remerciements

Cette recherche se situe dans le cadre des opérations de conciliation de la prospection minière avec la conservation de l'environnement.

Elle a été réalisée en collaboration avec la FTM qui a bien voulu mettre à nos dispositions les photographies aériennes et l'image satellitaire en tant qu'agence d'exécution de l'Office National pour l'Environnement. L'Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo ont pris une part déterminante dans la campagne de mesures géophysiques. Nous lui sommes très reconnaissants.

Le contenu de cette recherche a fait l'objet d'une communication orale présentée aux IXe Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF). Nous exprimons notre profonde gratitude à l'AUF qui nous a permis de participer à ce colloque tenu à Yaoundé du 29 novembre au 02 décembre 2001.

Références

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de Télédétection ; Volume 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Bonn, F. (1996) Précis de Télédétection ; Volume 2 : Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 633 p.

Cole, M. (1977) Landsat and airborne multispectral and thermal imagery used for geological mapping and identification of ore horizons in Lady Annie Lady Lorett and Dugold River areas Queensland, Australia. Trans. Inst. Min. Metall. B, 86, p. B195-B215.

Daily, M. and Elachy, C. (1978) Application of multispectral radar and Landsat imagery to geological mapping in Death Valley. Jet Propulsion Laboratory, Publication 78-19, Pasadena, California, 47 p.

Delbos,C. et Rantoanina, J. (1960) Étude géologique des feuilles Moramanga-Brickaville. Travaux du bureau géologique, Tananarive, 12 p.

Dizier, J.L. et Léo, O. (1989) Télédétection. Techniques et Applications Cartographiques. Éditeur BDPA, Paris, 275 p.

Girard, M.C et Girard, C.M. (1989) Télédétection Appliquée. Zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris, 260 p.

Kahle, A. , Rowan, L.C. and Soha, J. M. (1980) Multispectral middle infrared combined with visible and near infrared imaging for geological applications. Sixth Annual Pecora Symposium and Exposition, April 1980, 24 p.

Rabary, M. (1994) Inventaire écologique et forestier national-Zone de Moramanga. Bulletin n° 36, 20 p.

Remiot, R. (1968) Étude des conséquences de l'aimantation rémanente du gabbro. Cahier ORSTOM, Série géophysique n° 9, Tananarive, 18 p.

Scanvic, J.-Y. (1978) Commentaires sur les cartes de photofracturation de la région du Mont Dore (France). Rapport du Bureau de Recherches Géologiques et Minières 78 SGN 422 GEO.

Scanvic, J.-Y. (1983) Utilisation de la Télédétection dans les sciences de la terre. Manuels et méthodes n°7, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 159 p.

Tabbagh, J. (1999) Interprétation par un modèle tabulaire d'un sondage électrique. Université Paris 6, Unité Mixte de Recherche Sisyphe 7619, Département de Géophysique Appliquée, www.ccr.jussieu.fr/dga/people/jeanne%20Tabbagh/qwseln.htm