



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----o0o-----

ECOLE SUPERIEURE  
POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

-----o0o-----

**DEPARTEMENT MINES**

-----o0o-----



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**en vue de l'obtention du**

**Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.)**

**Option : Génie Minéral**



**«VALORISATION DES INFORMATIONS  
DE GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE  
RUISSEAUX. APPLICATIONS SUR LES  
FEUILLES PQ53 D'IFANADIANA-  
KIANJAVATO (SUD-EST DE  
MADAGASCAR).»**

**RAMILIJAONA RIJA MALALA**

*Soutenu publiquement le mercredi 16 juin 2010*







UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----o0o-----

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO



-----o0o-----

DEPARTEMENT MINES

Formation Doctorale

-----o0o-----

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**en vue de l'obtention du**

**Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.)**

**Option : Génie Minéral**

**«VALORISATION DES INFORMATIONS DE  
GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE RUISSEAUX.  
APPLICATIONS SUR LES FEUILLES PQ53  
D'IFANADIANA-KIANJAVATO (SUD-EST DE  
MADAGASCAR)»**



Présenté par : **RAMILJAONA RIJA MALALA**

Devant le jury composé de

*ARISOA RIVAH Kathy*

*PRESIDENT*

*RAKOTOMANANA Dominique*

*RAPPORTEUR*

*RASOLOMANANA Eddy*

*EXAMINATEUR*

*RANDRIANJA Roger*

*EXAMINATEUR*

*RALISON Bruno*

*EXAMINATEUR*

*Soutenu publiquement le mercredi 16 juin 2010*

# SOMMAIRE

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES ANNEXES

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION

PARTIE I : PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

- 1.1. Exposé des problématiques
- 1.2. Contexte physique de la zone d'étude
  - 1.2.1. Localisation de la zone d'étude
  - 1.2.2. Contexte climatique et de végétation
  - 1.2.3. Orographie et hydrographie
  - 1.2.4. Économie
  - 1.2.5. Historiques des travaux

PARTIE II : QUELQUES TECHNIQUES DE PROSPECTION ET LES DONNEES GEOCHIMIQUES.

CHAPITRE II : QUELQUES TECHNIQUES DE PROSPECTION

- 2.1. Prospection géochimique
- 2.2. Prospection directe
- 2.3. Prospection alluvionnaire
  - 2.3.1. Caractères généraux des gîtes alluvionnaires
  - 2.3.2. Mode de formation des gîtes secondaires.
    - 2.3.2.1. Erosion (Altération)

#### 2.3.2.2. Transport

#### 2.3.2.3. Dépôt

#### 2.3.3. Mode de dépôt

#### 2.3.4. Types de minéraux rencontrés dans les alluvions

#### 2.3.5. Règles de prélèvement des échantillons

#### 2.3.6. Remarques sur la pratique de la prospection alluviale

### 2.4. Les données géochimiques

## PARTIE III : LES DIFFERENTES CARTES, LA ZONE D'ETUDE DANS SON CONTEXTE NATIONAL ET TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITALE

### CHAPITRE III: DESCRIPTION DU LOGICIEL

#### 3.1. Description du logiciel de modélisation

#### 3.2. Illustration du fonctionnement du logiciel de modélisation

##### 3.2.1. Les données à traiter

##### 3.2.2. Visualisation graphique des données à traiter

##### 3.2.3. Résultats et discussions

### CHAPITRE IV: LA ZONE D'ETUDE DANS SON CONTEXTE NATIONAL

### CHAPITRE V: LES DIFFERENTES CARTES OBTENUES.

#### 5.1. Comment obtenir les différentes cartes de géochimie

#### 5.2. Méthode d'élaboration de cartes géochimiques d'interprétation

### CHAPITRE VI: TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITALE

## PARTIE IV : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

### CHAPITRE VII : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

#### 7.1. Les roches parasédimentaires et métavolcaniques (et les équivalents métamorphiques)

##### 7.1.1. Complexe du Mangoro

###### 7.1.1.1. Groupe de Vondrozo

##### 7.1.2. Complexe du Masora

###### 7.1.2.1. Groupe de Vohilava

- 7.1.3. Groupe d'Ambatolampy
- 7.1.4. Complexe de Manampotsy
  - 7.1.4.1. Formation d'Andasibe
  - 7.1.4.2. Groupe d'Ampasary
- 7.1.5. Groupe de Mananjary
- 7.2. Les roches plutoniques (et les équivalents métamorphiques)
  - 7.2.1. Suite d'Imorona-Itsindro
    - 7.2.1.1. Subsuite d'Angavo-Ankazobe
  - 7.2.2. Suite de Kiangara
    - 7.2.2.1. Subsuite de Kianjavato
  - 7.2.3. Suite d'Ambalavao

## CHAPITRE VIII : METAMORPHISME

- 8.1. Métamorphisme rétrograde
- 8.2. Résumé du métamorphisme.

## PARTIE V : INTERPRETATION DES DIFFERENTES CARTES

## CHAPITRE IX : INTERPRETATION DES CARTES ET RESULTATS

- 9.1. Les modèles métallogéniques
  - 9.1.1. L'affiliation au magmatisme ultrabasique
  - 9.1.2. L'affiliation Non Rigoureuse
  - 9.1.3. Complexants et indicateurs de la température.
  - 9.1.4. Eléments Majeurs, Mineurs
  - 9.1.5. Eléments Rares
  - 9.1.6. Métaux Rares
  - 9.1.7. Terres Rares
- 9.2. Cartes de synthèse

## PARTIE VI : PROSPECTIVES, PERSPECTIVES GEOCHIMIQUES DE LA REGION

## CHAPITRE X : PROSPECTIVITE DE LA REGION

- 10.1. Plan technique
- 10.2. Plan économique
- 10.3. Plan social

## CHAPITRE XI : PERSPECTIVE GEOCHIMIQUE DE LA REGION

## CONCLUSION

## BIBLIOGRAPHIES

## WEBOGRAPHIES

## AUTRES

## LISTE DES ANNEXES

## TABLE DES MATIERES

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1-</b> Carte de localisation de la Zone d'étude. ....	6
<b>Figure 2-</b> Climat de la zone d'étude des mois de Mai-Septembre (saison sèche), Octobre-Avril (saison pluvieuse). ....	7
<b>Figure 3-</b> Carte des sols de la région, par Riquier (1968) à l'échelle de la carte originale (1cm = 10km). ....	9
<b>Figure 4-</b> Carte d'indice de végétation. ....	10
<b>Figure 5-</b> MNT avec altimétrie et hydrographie. ....	11
<b>Figure 6-</b> Hydrographie de la région vue sur une image satellitale SPOT (R: XS1, G: XS2, B : XS3). ....	14
<b>Figure 7-</b> Carte hydrographique de la zone d'étude sur fond de MNT .....	15
<b>Figure 8-</b> Carte de versant de la zone d'étude (Dérivation de MNT).....	15
<b>Figure 9-</b> Représentation schématique de l'épaisseur et de la nature minéralogique de la zone d'altération en fonction de la latitude.....	23
<b>Figure 10-</b> Liaison entre le programme principal et les différents fichiers et sous-programmes nécessaires. ....	34
<b>Figure 11-</b> Fenêtre principale du logiciel de modélisation (exemple présentation de log(Argent)).....	35
<b>Figure 12-</b> Détails des menus de la zone ① de la figure 16. ....	35
<b>Figure 13-</b> Fenêtre pour visualiser la courbe des valeurs brutes (exemple ici Al : Aluminium). ....	36
<b>Figure 14-</b> Visualisation des valeurs à traiter. ....	36
<b>Figure 15-</b> Détails des options de la zone ④. ....	37
<b>Figure 16-</b> visualisation graphique en choisissant les lignes d'isovaleurs .....	38
<b>Figure 17-</b> visualisation graphique d'anomalie en choisissant Anomalie à S1 .....	38
<b>Figure 18-</b> Unités tectoniques de Madagascar selon Collins et Windley (2002). ....	41
<b>Figure 19-</b> Exemple d'une carte d'ombrage. ....	45
<b>Figure 20-</b> Modèle Numérique du Terrain de la zone d'étude (Dérivée du MNT).....	46
<b>Figure 21-</b> MNT avec géologie semi-transparente. ....	46
<b>Figure 22 -</b> Légende géologique de la zone d'étude.....	55Bis
<b>Figure 23-</b> Géologie de la zone d'étude .....	56
<b>Figure 24-</b> localisations des échantillons avec estimation des PT.....	59
<b>Figure 25 -</b> Légende des cartes des modèles métallogéniques. ....	63Bis

<b>Figure 26-</b> Affiliation au magmatisme ultrabasique sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente. ....	64
<b>Figure 27-</b> Les éléments chimiques de filiation non rigoureuse sur fonds de l'altimétrie et de la géologie transparente.....	66
<b>Figure 28-</b> Coordinnants et complexants sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente. ....	67
<b>Figure 29-</b> Eléments majeurs et mineurs sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente. ....	69
<b>Figure 30-</b> Eléments rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente. ....	71
<b>Figure 31-</b> Métaux rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.....	72
<b>Figure 32-</b> Terres rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.....	73
<b>Figure 33-</b> Légende des toutes les cartes de synthèse ci-après.....	74Bis
<b>Figure 34-</b> Carte de synthèse : Nord-Ouest. ....	75
<b>Figure 35-</b> Carte de synthèse : Sud-Ouest. ....	78
<b>Figure 36-</b> Carte de synthèse : Nord-Est. ....	80
<b>Figure 37-</b> Carte de synthèse : Sud-Est. ....	83
<b>Figure 38-</b> Légende de la carte de synthèse.....	85Bis
<b>Figure 39-</b> Carte de synthèse. ....	86

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1-</b> Température minimale et maximale mensuelle. (Source : Servizio Agrometeorologio Regionale per la Sardegna SAR 2006) .....	8
<b>Tableau 2-</b> Précipitations moyennes mensuelles. (Source : Servizio Agrometeorologio Regionale per la Sardegna SAR 2006).....	8
<b>Tableau 3-</b> Vents et ses directions (Mananjary) : (Source : Service météorologique 2001)....	8
<b>Tableau 4-</b> Edition des données SRTM du GLCF. ....	44
<b>Tableau 5-</b> Précisions relatives à l'acquisition des données SRTM. ....	45
<b>Tableau 6 -</b> Résumé de la détermination de la pression et température. ....	60



## LISTE DES ACRONYMES

<b>ANR</b>	: Affiliation Non Rigoureuse.
<b>AUB</b>	: Affiliation Ultra-Basique.
<b>BGS</b>	: British Geology Surveys.
<b>BMS</b>	: Base Metal Sulfides
<b>BRGM</b>	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
<b>CC</b>	: Coordinnants, Complexants.
<b>EMm</b>	: Elements Majeurs mineurs.
<b>ER</b>	: Elements Rares.
<b>ESPA</b>	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
<b>FE</b>	: Fluide Epithermal.
<b>FH</b>	: Fluide Hypothermal.
<b>FM</b>	: Fluide Mésothermal.
<b>FTM</b>	: Foiben-Taosaritanin'i Madagascar.
<b>GASP</b>	: Grenat AluminoSilicate-Plagioclase.
<b>GBPMQ</b>	: Garnet, Biotite Plagioclase Moscovite.
<b>GLCF</b>	: Global Land Cover Facility.
<b>IOGA</b>	: Institut d'Observatoire de Geophysique d'Antananarivo.
<b>ITCZ</b>	: InterTropical Convergence Zone.
<b>MMH</b>	: Ministère des Mines et des Hydrocarbures.
<b>MNT</b>	: Modèle Numérique du Terrain.
<b>MN</b>	: Métaux Noble.
<b>MR</b>	: Métaux Rares.
<b>NASA</b>	: National Aeronautics and Space Administration.
<b>OSPE</b>	: Octahedric System Potential Energy.
<b>PNF</b>	: Polymétalliques Non Ferreux.
<b>PGE/M</b>	: Platine Groups Elements/Minerals.
<b>PGRM</b>	: Projet de Gouvernances de Ressources Minerals.
<b>PT</b>	: Pression Température.
<b>SRTM</b>	: Shuttle Radar Topography Mission.

**SS** : Sub-Suite.

**TR** : Terres Rares.

**USGS** : United States Geological Surveys.

**ZC** : Zone de Cisaillement.

## LISTE DES ANNEXES

<b>Annexe 1:</b> Carte des index, indices et géochimie de l'or. ....	e
<b>Annexe 2:</b> Processus et produits d'Altération. ....	i
<b>Annexe 3:</b> Tableau périodique des éléments. ....	y
<b>Annexe 4:</b> Quelques notions des bases theoriques de la géochimie.....	aa
<b>Annexe 5:</b> Différentes cartes des éléments chimiques ( $\log_{10}$ ). ....	ee
<b>Annexe 6:</b> L'échelle des temps géologiques. ....	ddd
<b>Annexe 7:</b> Programmation pour le logiciel de modélisation .....	eee
<b>Annexe 8:</b> Métallotecte majeur et minéralisations exprimées pour les anomalies.....	ppp

## REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui, à divers titres, m'ont permis de mener à bien ce travail.

C'est en témoignage d'une respectueuse reconnaissance que je citerai :

➤ Professeur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) d'avoir autorisé la soutenance de ce mémoire;

➤ Docteur ARISOA RIVAH Kathy, Chef du Département Mines, de m'avoir accueilli au sein de cette filière de formation et d'avoir accepté de présider le jury;

➤ Docteur RAKOTOMANANA Dominique, Chef de Volet Géologie du PGRM et Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) pour m'avoir proposé le sujet et d'avoir bien voulu l'encadrer malgré ses multiples responsabilités. Il m'a accompagné tout au long de ce travail. Sa disponibilité et ses généreux secours au cours de certains de mes moments difficiles ont été d'une très grande qualité, et d'un immense réconfort;

➤ Professeur RASOLOMANANA Eddy, Enseignant Chercheur à l'ESPA et à l'IOGA d'Antananarivo et Responsable de la formation Doctorale du Département Mines. Il m'a fait le grand honneur de juger ce travail;

➤ Professeur RANDRIANJA Roger, Enseignant Chercheur à l'ESPA d'Antananarivo, qui a bien voulu accepter de participer au jury comme examinateur;

➤ Docteur RALISON Bruno, Enseignant Chercheur à la Faculté des Sciences, Chef du Département des Sciences de la Terre, d'avoir accepté d'être membre de jury comme examinateur;

J'adresse mes plus sincères remerciements au Dr ANDRIAMBAHOAKA Jedidia, Enseignant Chercheur à l'IOGA pour m'avoir aidé à la manipulation et à la réalisation du logiciel de modélisation. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance ;

Je tiens aussi à remercier cordialement tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire: parents, familles et amis qui m'ont soutenu moralement et financièrement durant mes études. J'adresse mes remerciements et mes reconnaissances exceptionnelles à mon père et à ma mère qui ont souhaité vivement que ce mémoire se réalise.

Je n'oublie pas de remercier le corps enseignant du Département Mines de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et en particulier celui de l'option Génie Minéral. Et sans oublier Dieu qui m'a permis d'arriver jusqu'ici.

# INTRODUCTION

Madagascar se singularise par bien de caractères qui parmi tout d'autres, son contexte géographique, son potentiel minier jugé relativement considérable, ainsi que l'importance de sa richesse en faune et en flore endémiques. La mise en valeur de ce potentiel minier a toujours été l'un des objectifs majeurs des dirigeants qui se sont succédés à la tête du pays. Malgré les actions entreprises, les performances enregistrées par le secteur minier jusqu'ici sont restées insuffisantes, notamment en ce qui concerne sa contribution au Produit National Brut et à l'économie en général.

Le Projet de Gouvernance des Ressources Minérales (PGRM) du Ministère des Mines et des Hydrocarbures (MMH) a procédé à la révision et à la modernisation de la cartographie géologique et minière au 1/100.000 de Madagascar avec une synthèse par bloc au 1/500.000. Outre les levés de géophysique aéroportée et les travaux géologiques au sol, des échantillonnages de lits vifs des ruisseaux ont été réalisés. Différents organismes et groupements d'organismes internationaux de géologie ont contribué à la réalisation des programmes. L'un de ces groupements d'organismes internationaux de géologie est le Consortium British Geological Survey – US Geological Survey – GLW conseils. Ce consortium a été en charge de la zone B dont fait partie notre zone d'étude qui est formée par les feuilles géologiques d'Ifanadiana (P53) et de Kianjavato (Q53)

Les travaux qui ont duré de 2004 à 2007 ont généré une masse exceptionnelle de nouvelles données géologiques et géochimiques qui devraient permettre d'apprécier les possibilités de minéralisation.

L'objectif principal de cette étude est la réalisation des diagnostics de minéralisations en amont des points de prélèvement des sédiments de ruisseaux qui révèlent des anomalies en un ou en plusieurs éléments chimiques.

Cet ouvrage est présenté en six grandes parties qui sont:

- Partie I : Problématique, contexte physique de la zone d'étude et historiques des travaux
- Partie II : Prospection géochimique et bases théoriques
- Partie III : les différentes cartes, la zone d'étude dans son contexte national et traitement d'image satellitale
- Partie IV : Géologie de la zone d'étude

- Partie V : Traitement des données et interprétations
- Partie VI : Prospectives et perspectives géochimiques de la région

# **PARTIE I : PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE**

# CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

## 1.1. Exposé des problématiques

L'étude entreprise, par le consortium BGS/USGS-GLW, pour le compte du PGRM (MMH) entre dans le cadre de la revalorisation de la ressource minière de Madagascar. Les Zones A, B et D Nord ont fait l'objet d'une révision de la couverture cartographique géologique détaillée et d'une prospection géochimique des sédiments des ruisseaux.

La révision de la cartographie géologique a permis l'élaboration de nouvelles cartes géologiques au 1/100.000 et l'échantillonnage géochimique a permis de générer des cartes et des données géochimiques pour l'étude de la prospectivité de la zone d'étude.

Ces différentes masses d'information sont disponibles séparément à la Base des données pour la Promotion et la Gouvernance des Ressources Minérales (BPGRM). Chaque type de document et chaque type d'information a ses valeurs propres et ses propres destinations. Comme la prospection minière est une application directe de la géologie, il faut alors élaborer un document qui consignerait la synthèse de toutes ces informations et de toutes ces données. Cette étude vise à proposer une synthèse de zone en prenant l'exemple de la région d'Ifanadiana-Kianjavato.

Le socle cristallin est un ensemble cristallin précambrien magmatique et métamorphique. Divers événements géologiques tels que le métamorphisme, la tectonique, l'altération-érosion,... ont contribué au façonnage de ce socle. Chaque événement est susceptible de contribuer à la génération ou à la concentration des éléments chimiques et des substances minérales, plus particulièrement pour ses fortes possibilités de circulation des fluides minéralisateurs.

## 1.2. Contexte physique de la zone d'étude

### 1.2.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude (**figure 1**) se trouve à environ 600km au Sud-Est d'Antananarivo. Elle est couverte par les feuilles P53 (Ifanadiana) et Q53 (Kianjavato). Sur le plan administratif, Ifanadiana et Kianjavato appartiennent respectivement aux districts d'Ifanadiana et de Mananjary dans la région de Vatovavy. La région de Vatovavy occupe une superficie d'environ 13.069 Km<sup>2</sup> et se trouve géographiquement limitée par les coordonnées 514687m et 665663m de latitude Sud et 436182m et 626441m de longitude Est.



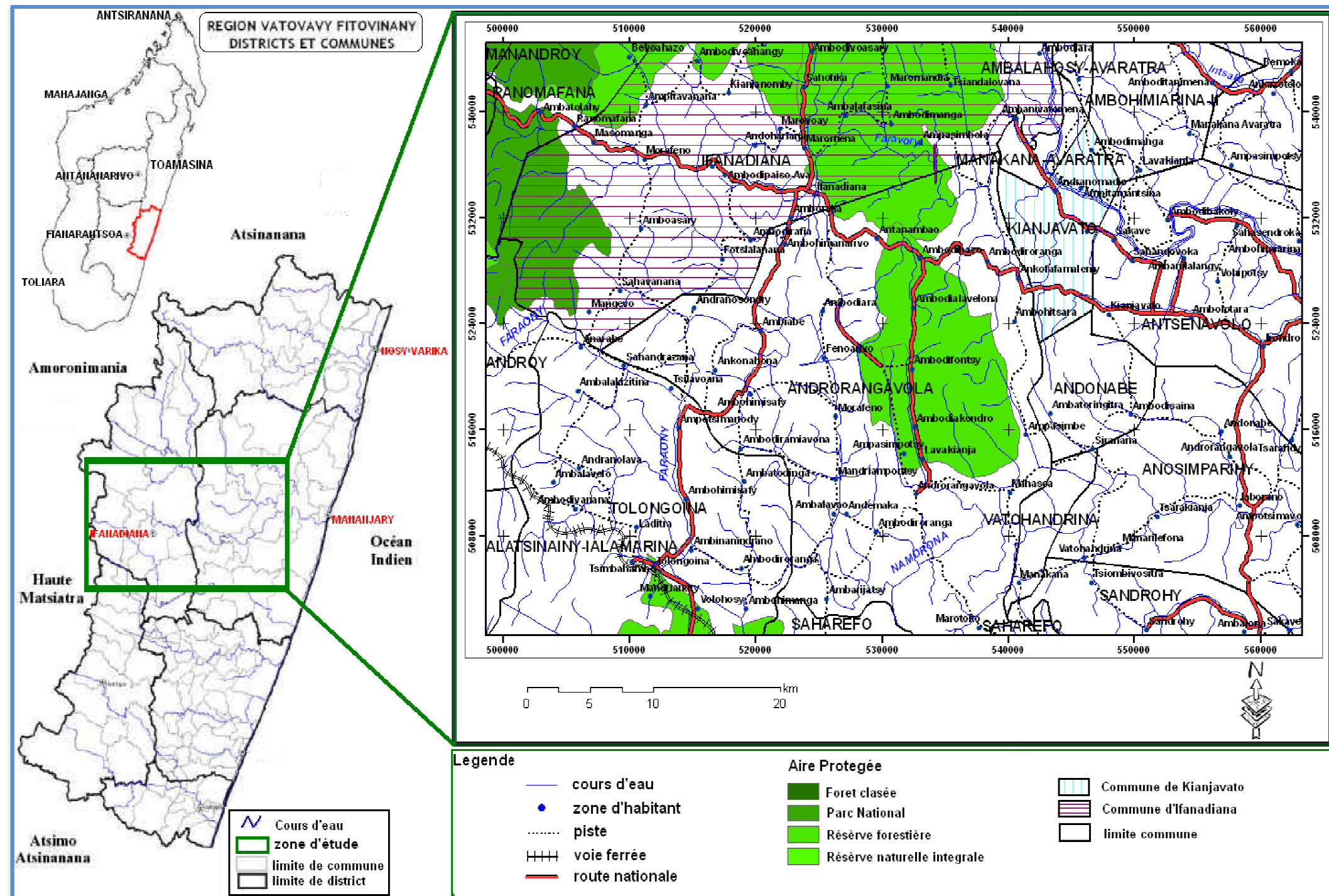


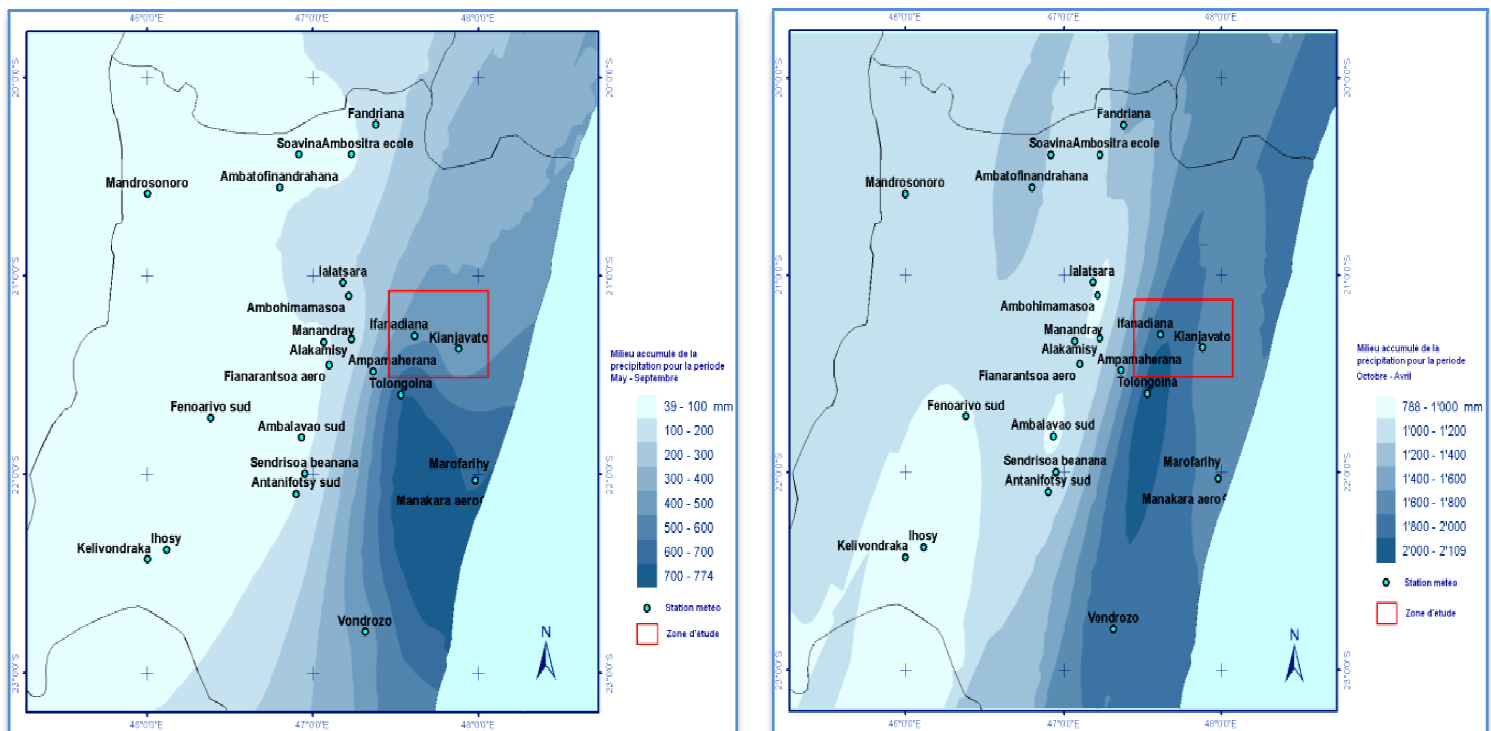
Figure 1- Carte de localisation de la Zone d'étude.

## 1.2.2. Contexte climatique et de végétation

### 1.2.2.1. Contexte climatique

Les caractères saillants du climat au Sud-Est de Madagascar sont la prédominance des alizés soufflant du Sud-Est (de l'Océan indien) vers le Sud, la fréquence des zones de convergence inter-tropicale et la diversité morphologique entre la côte Est et les plateaux montagneux centraux.

Dans l'ensemble, le climat est chaud et humide. Le climat est fortement influencé par la proximité de la bordure occidentale de l'anticyclone de l'Océan Indien. Par conséquent, les alizés soufflent constamment d'Est en Ouest, entraînant des masses d'air humide et chaud occasionnant une forte pluviométrie. La saison pluvieuse s'étale de Décembre à Avril (**figure2**). Les mois les plus pluvieux sont Janvier et Février tandis que le mois moins arrosé est Septembre.



**Figure 2-** Climat de la zone d'étude des mois de Mai-Septembre (saison sèche), Octobre-Avril (saison pluvieuse).

**Température :** Les températures annuelles varient selon l'altitude et la position par rapport à la mer. Les tableaux suivants donnent les informations y afférentes :

	Station	Jan	Fév.	Mars	Av	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Min	Ifanadiana	19.4	19.2	18.6	17.6	14.7	12.4	12.5	12.3	13.7	15.6	17.4	18.8
	Kianjavato	21.3	21.2	19.8	19.1	16.6	14.5	14.0	14.0	14.8	17.1	18.9	20.3
Max	Ifanadiana	30.0	30.0	28.4	28.2	26.1	24.1	23.6	24.2	26.3	28.7	29.6	30.2
	Kianjavato	32.1	31.4	30.5	30.2	28.1	26.4	25.3	25.9	36.9	29.1	30.2	31.8

**Tableau 1-** Température minimale et maximale mensuelle. (Source : Servizio Agrometeorologio Regionale per la Sardegna SAR 2006)

**Pluviométrie :** La répartition de la pluviométrie mensuelle se fait comme le suivant :

Station	Jan	Fév.	Mars	Av	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Ifanadiana	410.3	410.8	414.3	136.8	85.5	96.1	102.9	106.3	67.7	66.1	170.0	352.0
Kianjavato	345.8	374.8	300.1	150.3	70.2	66.9	94.1	89.1	64.1	104.1	172.6	265.9

**Tableau 2-** Précipitations moyennes mensuelles. (Source : Servizio Agrometeorologio Regionale per la Sardegna SAR 2006)

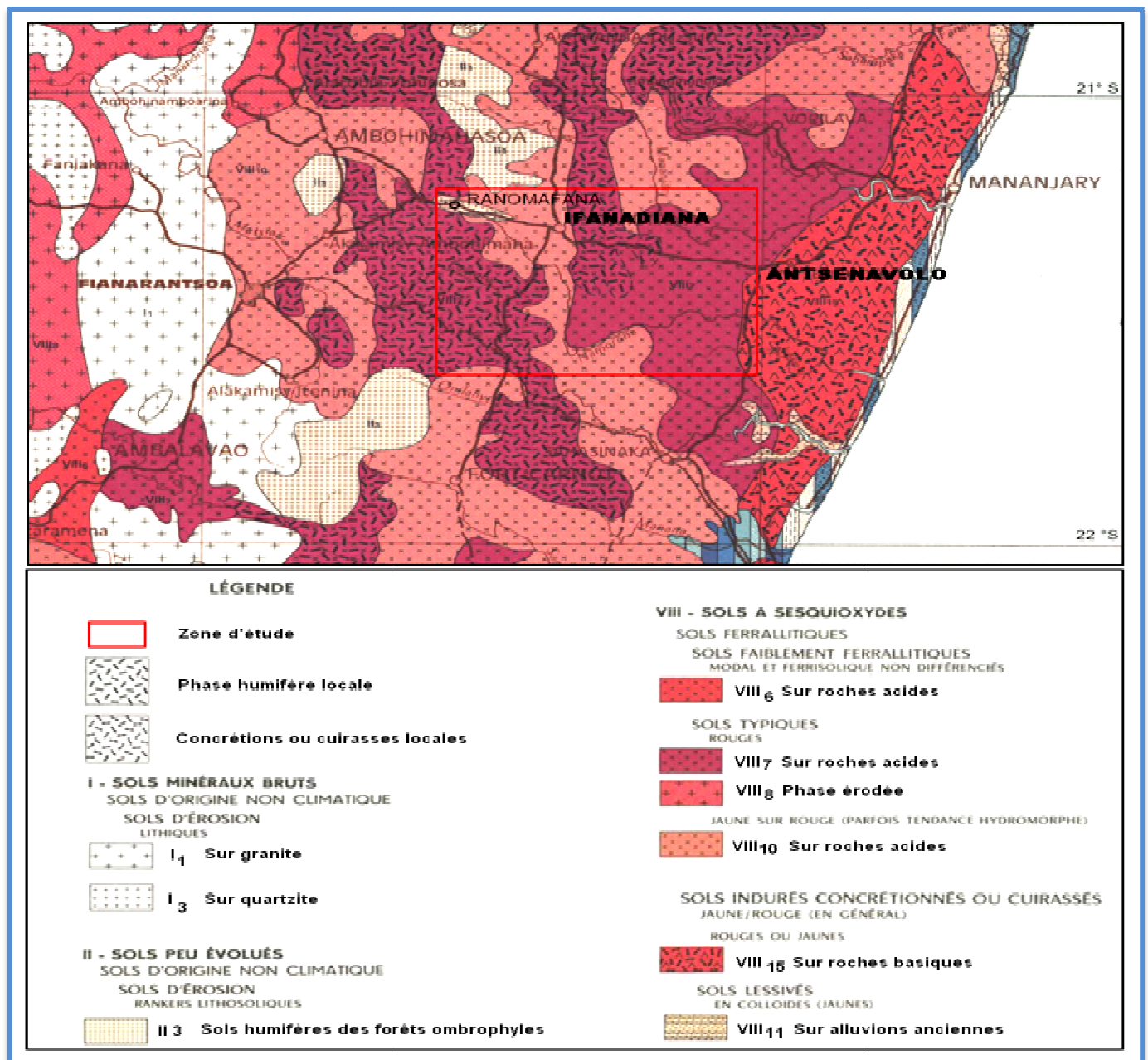
	Jan	Fév.	Mar	Av	Mai	Juin	Juillet	At.	Sept	Oct.	Nov	Dé
Vent moy	12	13	11	11	10	10	10	12	14	16	14	13
Direction	E	E	S/E	SW/E	SW/E	SW/SE	SW/SE	S/E	N/NE	N/NE	NE	NE
Vent max	148	155	126	216	101	118	216	144	115	180	101	162

**Tableau 3-** Vents et ses directions (Mananjary) : (Source : Service météorologique 2001).

**Cyclones :** Des cyclones tropicaux traversent l’Océan Indien et frappent périodiquement la région. Vatovavy est ainsi parmi les régions ravagées fréquemment par les cyclones. Mananjary se trouve dans le «couloir cyclonique », ce dernier s’étendant vers le Nord jusqu’à Maroantsetra. Le risque cyclonique diminue du Nord au Sud.

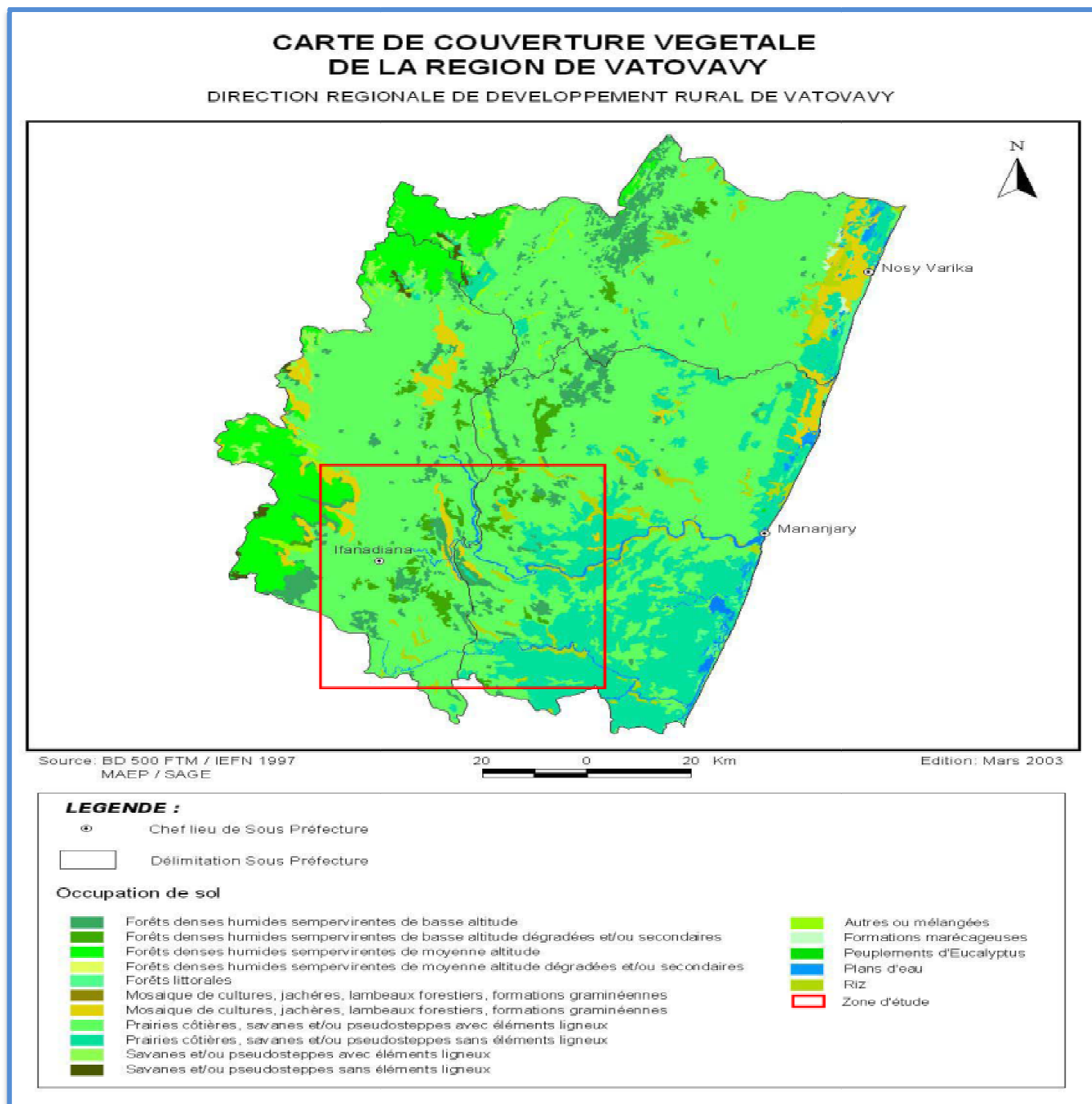
#### 1.2.2.2. Sols et végétation

**Sols :** Sur les hauts reliefs de la falaise dominant des sols ferralitiques rajeunis, mais très fragiles, riches en humus, favorables à une mise en valeur plus ponctuelle. Les sols des hautes et moyennes collines sont ferralitiques, composés de minéraux érodés et dégradés. Les sols d'apports alluviaux et colluviaux des basses collines et des niveaux d'aplanissement côtiers présentent une texture très riche. Les dunes et les cordons littoraux s'étendent le long de la côte sur une largeur inférieure à 5 km et donnent des sols aux propriétés physiques médiocres. Les sols de pseudo-steppes des plateaux à couvert graminéens ont de bonnes propriétés physiques. Les dunes et cordons littoraux sont inondables. (**Figure 3**).



**Figure 3-** Carte des sols de la région, par Riquier (1968) à l'échelle de la carte originale (1cm = 10km).

**Végétations :** Les végétations de la région de Vatovavy comprennent principalement (**figure 4**) les forêts secondaires (savoka) localisées aux moyennes collines, les formations graminéennes à base d'Aristida sur les embouchures, les formations littorales, les ravinala et bambou sur les zones côtières, les forêts-galeries sur les moyennes et bases collines, les réserves forestières de première importance (Ifanadiana), parc national de Ranomafana et les tavy et les aires de déboisement (2500 ha/an).



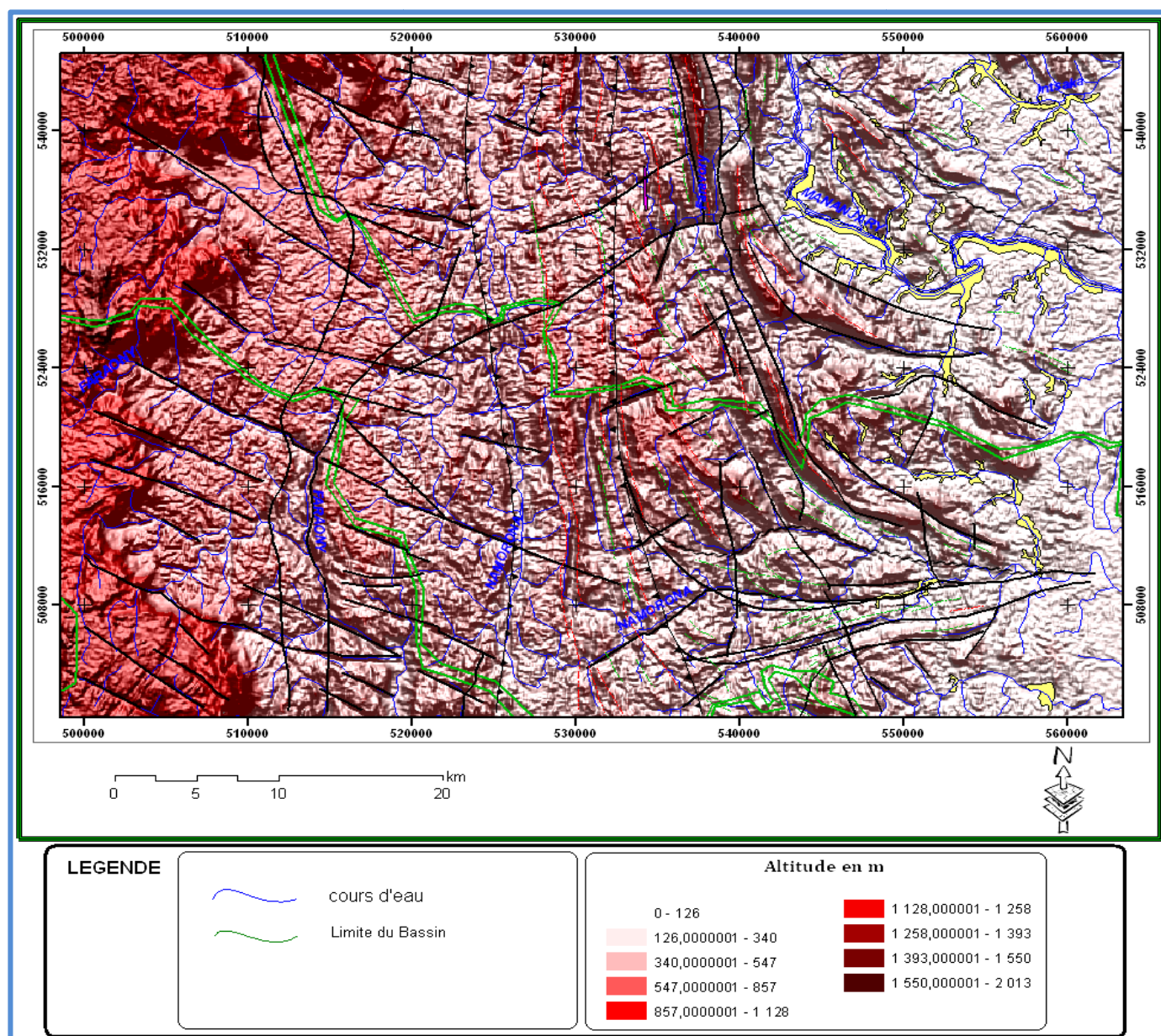
**Figure 4-** Carte d'indice de végétation.



### 1.2.3. Orographie et hydrographie

#### *Orographie*

Les feuilles Ifanadiana et Mananjary chevauchent une anomalie importante de l'orographie générale de la falaise orientale (**figure 5**). On peut distinguer 2 unités orographiques :



**Figure 5-** MNT avec altimétrie et hydrographie.

- La falaise, constituée par des éléments accidentés de l'escarpement de faille de l'Est malgache, dont l'altitude varie entre 500 m et plus de 1000 m. Des pentes fortes aux dénivellations importantes ponctuées par des chutes de rivière encadrent des étroites et profondes vallées.

- La zone des collines (ou tanety) moyennes et basses, dont l'altitude varie entre 50 m et 500 m, lesquelles collines au sommet arrondi et dénudées par le tavy sont séparées par des vallées plus larges où se concentre la population.

La zone littorale ne comporte ni delta, ni grande plaine alluviale. A l'amont d'une côte basse, sableuse et rectiligne, règne un système de lagunes enserré entre des cordons littoraux et les premiers reliefs de l'arrière-pays mais, par contre, entrecoupé de vallées et d'estuaires bordés de petites surfaces alluviales.

En dessous, vers l'Est, s'allongent une série de chaînons parallèles dont certains très abrupts (la pente est très forte) présentent vers l'Est de petites falaises secondaires (chaînons du Tolotsokona, prolongé jusqu'au Vatovavy). Leur altitude décroît progressivement de l'Ouest à l'Est, mais aussi du Nord vers le Sud, à 40 kilomètres de la mer, le chaînon d'Andranotonga au Nord de Vohilava et le Vatovavy culminent encore au-dessus de 500 mètres, altitude d'Ifanadiana et du pied de la falaise.

### ***Hydrographie***

La configuration générale du réseau hydrographique est modelée par la courbure orogénique précédemment décrite et que met en évidence le cours moyen du fleuve Mananjary (**figure 5**). Le cours de ce grand fleuve reste constamment parallèle aux lignes de schistosité des schistes cristallins sur lesquels il coule. La partie de son bassin qui nous intéresse couvre 4.800 km<sup>2</sup>. Plusieurs rivières importantes sont parmi ses affluents (rive droite : Sahanofa, Ivoanana, Faravory – rive gauche : Ampasary, Saka, Maha). Leurs cours comprennent plusieurs tronçons dont les tracés sont contrôlés par des facteurs divers : pentes morphologiques, directions des schistes cristallins, cassures tectoniques. Ces influences apparaîtront clairement par la comparaison des schémas «HYDROGRAPHIE ». En particulier, le parallélisme des cours d'eau descendant la falaise est en liaison avec un réseau des failles parallèles, tandis que les parties Nord-Sud correspondent aux lignes de schistosité.

Le fleuve de *Mananjary* draine les hauts plateaux du *Betsileo* entre *Ambositra* et *Ambohimahaso*. Les formations géologiques sont des migmatites et migmatites granitoïdes à l'Ouest, des gneiss et micaschistes à l'Est. Les formations du socle sont profondément latérisées et transformées en sols ferralitiques rouge et bariolée rouge et jaune. La couverture végétale est essentiellement représentée par une forêt ombrophile dense de l'Est. Elle est en voie de dégradation au Nord et à l'Est du bassin (savoka et prairie humide).

La *Mananjary*, de direction initiale Nord-Ouest/Sud-Est (**figure 6**), reçoit la *Sahanofa* en rive droite, l'*Ampasary* en rive gauche, puis en rive droite son affluent principal, l'*Ivoanana*. A la hauteur d'*Ambodibakoly*, le cours de la *Mananjary* prend une direction Ouest-Est et rejoint l'Océan Indien au Sud de la ville de *Mananjary*.

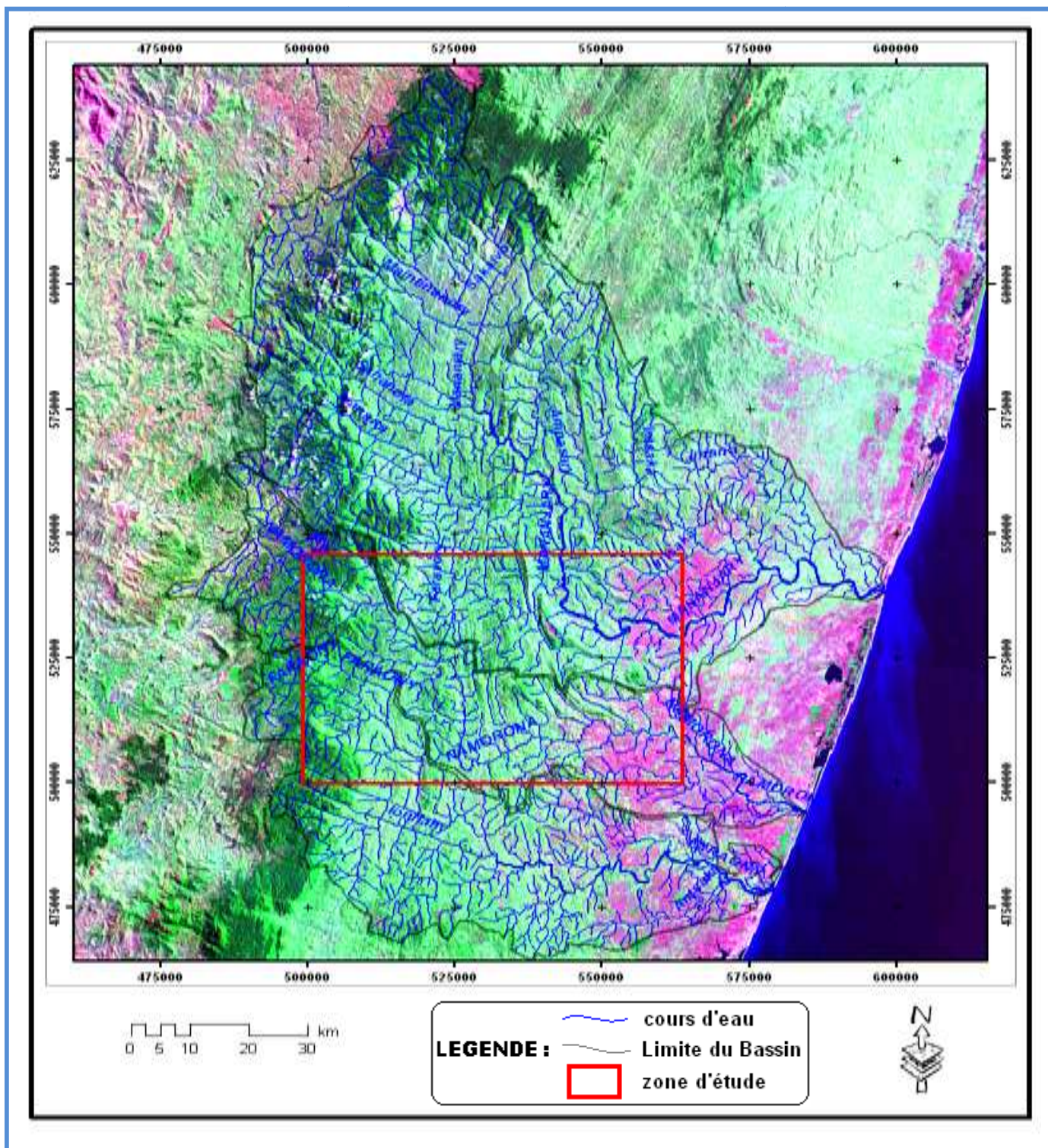
Le fleuve *Namorona* et ses affluents drainent un bassin très étroit de 1490 km<sup>2</sup>. Il n'a pas d'importants affluents. Sur 20km, son cours coupe à angle droit les strates cristallines. Plusieurs rapides sont notés au Sud d'*Androrangavola*. Les chutes du *Namorona* à *Vohiparara* en haut de la falaise sont les plus importantes de la région.

L'ensemble des cours d'eau se présente en des cours à régime torrentiel entrecoupés de nombreux rapides. Les chutes d'eau importantes abondent tout au long de la falaise. Le *Mananjary* forme encore des rapides à trente kilomètres de son embouchure.

Le bassin de la *Namorona*, entre ceux de la *Mananjary* et de la *Faraony* (**figure 6**), draine la falaise de *Tanala*, un peu au Nord de *Fianarantsoa*. Le bassin supérieur repose sur les gneiss et micaschistes de la série d'*Ambositra* (système du graphite), le bassin inférieur est situé sur les roches basiques du *Vohibory*, puis plus à l'Est sur les coulées crétacées. Les sols se sont développés des gneiss et des micaschistes pour être des sols ferrallitiques jaune et rouge (latérites) puis des roches volcaniques basiques pour donner des latérites rouges indurées. La végétation est essentiellement représentée par la savane et la prairie à une forêt de reboisement ainsi que de savoka. A l'Est du bassin, la forêt est secondaire avec des lambeaux de forêts primaires résiduels.

Le bassin du *Faraony*, situé entre ceux de la *Namorona* et de la *Matitanana*, est issu de la falaise orientale (*Tanala*) et repose sur les formations cristallines du socle (gneiss, micaschistes et migmatites du système du graphite) profondément altérées en latérites ferrallitiques jaune sur rouge. La forêt dense ombrophile, présente sur les contreforts de la falaise, est en voie de dégradation et la majeure partie du bassin est du domaine de la "savoka", forêt dégradée par suite de défrichements successifs.

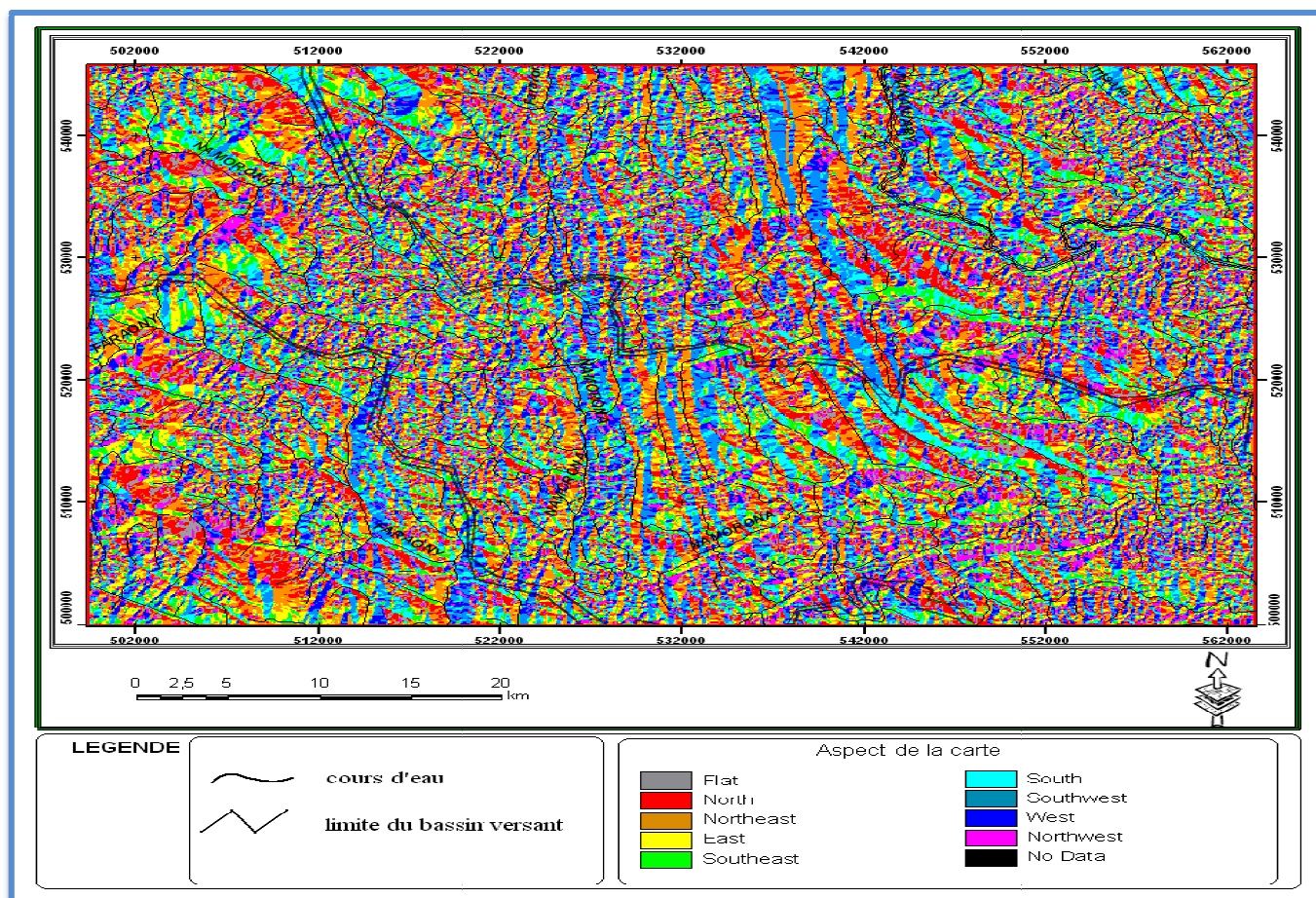
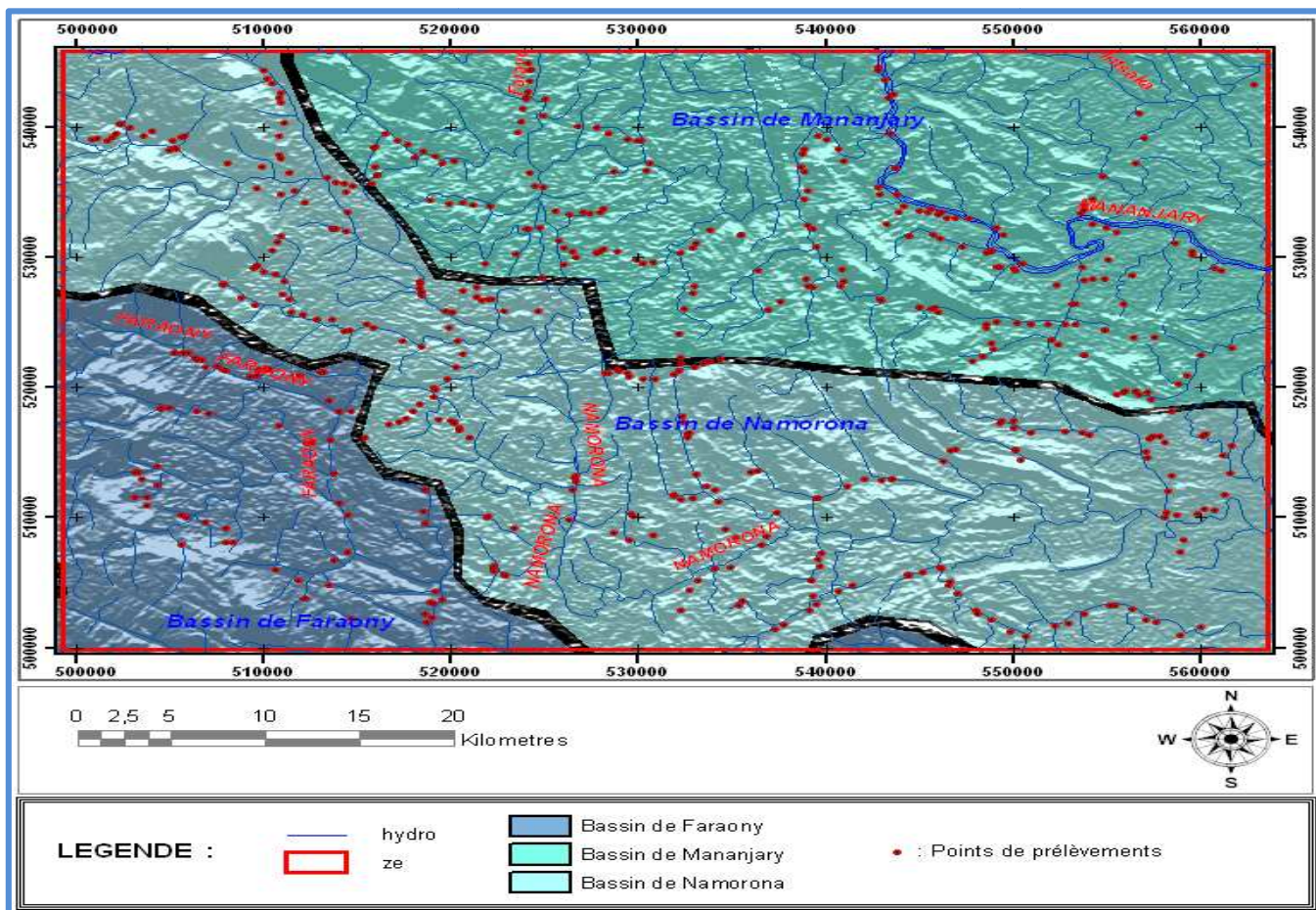




**Figure 6-** Hydrographie de la région vue sur une image satellitale SPOT (R: XS1, G: XS2, B : XS3).

Pour mieux comprendre la circulation d'eau, on met à echelle plus étroite la carte hydrographique de la zone d'étude sur fond de l'image MNT (Modèle Numerique de Terrain) avec des prélèvements géochimiques (Figure7). La carte de versant montre la direction générale des cours d'eau et ses affluents (Figure 8).





#### 1.2.4. Économie

L'économie de la région repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage. Compte tenu des conditions du milieu naturel évoquées, quatre types de cultures sont généralement pratiquées : les cultures vivrières dominées par les cultures de riz et de manioc, les cultures de rente, en particulier le café, les cultures industrielles et les cultures fruitières.

Les cultures maraîchères sont encore dans la phase d'initiation. Les spéculations agricoles sont dominées par les polycultures pluviales traditionnelles.

L'agriculture rencontre plusieurs problèmes qui constituent autant de facteurs de blocage pour son développement : phénomène d'érosion causé surtout par la pratique de tavy et l'insuffisance et le mauvais état des voies de communication. En plus, l'utilisation des engrais est vraiment très marginale dans la région de Vatovavy.

Outre l'agriculture, l'élevage (surtout bovin) constitue une activité essentielle de la région de Vatovavy. Vient ensuite l'élevage porcin.

Par ailleurs, la région possède des potentialités considérables : le sous-sol recèle d'importantes ressources minières qui demeurent sous exploitées : pierres précieuses et semi-précieuses (or, émeraude, béryl), quartz, cristal de roche. L'exploitation est menée suivant des pratiques traditionnelles.

#### 1.2.5. Historiques des travaux

En 1933 A.Lenoble, en 1952 A.Emberger étudient la zone des hauts plateaux de Fianarantsoa et H. de la Roche en 1951 a travaillé sur la Falaise et la Côte. Ils ont identifié les grandes unités et les grandes structures dans le cadre d'une cartographie de reconnaissance au 1/200.000. Ils ont également mis en évidence une opposition géologique entre la partie orientale migmatitique de direction méridienne monotone et à plongement isoclinal et la partie occidentale bien plus complexe où les formations surtout ectinitiques se moulent autour de massifs granitiques puissants. Ces derniers font partie du groupe d'Ambatolampy (système du Graphite) tandis que les premières appartiennent au groupe d'Ifanadiana (système du graphite) avec la série de Vondrozo à la base et la série de Tolongoina au sommet. Boulanger (1958), dans une synthèse au 1/100.000 de la région côtière, conserve une succession identique au sein du système du Graphite. Il a toutefois placé le groupe côtier de l'Ampasary dans le système du Vohibory et a proposé que les massifs granitiques centraux fassent partie du système Androyen tandis que la Série des Schistes et quartzites est toujours considérée

comme récente. Dans le centre, les formations du groupe d'Ambatolampy sont mal définies. Elles s'étendent en une bande méridienne depuis le Nord d'Antananarivo jusqu'au Sud de Fianarantsoa. Elles sont séparées des groupes Itremo-Ikalamavony par une zone migmatito-granitoïde imprécise et confuse. Sur la Côte, les groupes de l'Ampasary et du Manampotsy sont assimilés en un ensemble méridien qui se situerait au-dessus du groupe du Mangoro-Vondrozo. La falaise est de nature migmatitique extrêmement monotone.

En 1958, Rantoanina et ses équipes ont rédigé une « notice explicative sur les feuilles Kianjavato et Antsenavolo (QR53) » pour la recherche des minéralisations possibles de la zone cristalline et l'étude géologique au 1/100.000 destinée à compléter les levés au 1/200.000 existants. Les résultats acquis ont été les suivants : Cartographie géologique de base ; prospection directe des substances : nickel, disthène, sillimanite, graphite, cristal de roche ; prospection alluviale ; géologie : selon eux, la zone étudiée appartient à la série de Vohilava et de l'Ampasary. Ces deux séries faisant partie du système de Vohibory et l'étude pétrographique par L.Delbos.

**PARTIE II : QUELQUES TECHNIQUES DE  
PROSPECTION ET LES DONNEES  
GEOCHIMIQUES.**

## **CHAPITRE II : QUELQUES TECHNIQUES DE PROSPECTION**

La prospection est la recherche des sites de concentration des substances utiles dans le but de découvrir des gîtes d'intérêt économique (gisement: gîte d'une substance minérale présentant un intérêt économique) c'est-à-dire permettant des exploitations rentables. Etant donné les aspects très divers des recherches éventuelles, ce genre de programme nécessite la mise en œuvre de plusieurs méthodes et techniques d'investigation.

### **2.1. Prospection géochimique**

Diverses méthodes de recherches minières ont été mises au point depuis les années 50 et utilisées dans l'exploration des dépôts des minéraux. L'altération des gîtes des ressources minérales libère des quantités significatives de minéraux et d'éléments chimiques que le vecteur transport (en général l'eau) véhicule vers l'amont pour les déposer au fil du chenal d'écoulement du cours d'eau ou qu'ils sont piégés sur les sites préférentiels de dépôt. Ces minéraux et ces éléments chimiques peuvent alors être présents dans les eaux souterraines ou dans les sols pour éventuellement former les gîtes. La formation des concentrations des éléments ou des minéraux est contrôlée par la chimie, le potentiel de réduction-oxydation, l'acidité et l'alcalinité de ces sols.

Les prélèvements géochimiques peuvent se faire sur les sols, les sédiments des cours d'eau, des lacs. La biochimie se fait par la collecte de différents échantillons d'espèces de plantes et des sécrétions animales comme les fourmilières. Les échantillons sont destinés à des analyses chimiques pour le dosage des éléments chimiques les constituants.

Les zones dont la teneur en minéral est anormalement élevée (mesurée, dans le cas des sédiments, en parties par million) peuvent indiquer la présence de dépôts de minéralisation en amont. Dans le cas des sédiments fluviaux, les anomalies géochimiques peuvent se former quand les conditions d'oxydo-réduction du pH du cours d'eau favorisent la précipitation, la concentration d'infimes quantités de minéraux. Ce genre d'anomalie n'indique pas nécessairement l'existence d'un gîte de minéralisation en amont, mais informe de la présence des éléments chimiques ou des minéraux dans les roches que les eaux ont lessivées.

### **2.2. Prospection directe**

La prospection alluviale est une approche indirecte de la recherche minière. La compréhension de ses données doit tenir compte des facteurs éventuels pour la formation d'une concentration des minéralisations. Aussi dans une autre conception de la pratique de prospection minière, la prospection directe sur le terrain apporte plus d'informations relativement percutantes. Toutefois la prospection directe n'est généralement menée que pour caler les données des méthodes indirectes.

### 2.3. Prospection alluvionnaire

Ce chapitre intéressant la prospection indirecte des minéralisations utiles rencontrées dans les alluvions nous permet de voir plus clair : les caractères généraux des gîtes alluvionnaires, les conditions d'érosion et d'alluvionnement et de formation de gîtes, les modes de dépôts et les sites préférentiels d'accumulation de minéraux utiles, les types de minéraux rencontrés dans les alluvions, les méthodes de prospection alluviale et les équipements de prospection.

#### 2.3.1. Caractères généraux des gîtes alluvionnaires

Un gîte alluvionnaire est défini par les caractères suivants:

- dépôt de terre, sable ou toute autre matière sans cohésion ou à cohésion partielle dont l'accumulation résulte d'apport puis dépôt de matériaux détritiques qu'un vecteur d'altération-érosion a déplacé des formations géologiques situées en amont et ce par l'action mécanique de certains du vecteur comme l'eau de ruissellement, le vent ou la marée.
- avoir été déposé après un transport plus ou moins long.
- être un gîte minier c'est-à-dire contenir des substances utiles à des teneurs ou à des concentrations exceptionnelles. Le gîte dévient un gisement si la quantité de substances utiles contenue est dotée d'intérêt minier et économique.

**N.B.:** Un gîte éluvionnaire est caractérisé par une faible distance de transport des matériaux détritiques. Un gîte est dit colluvionnaire quand la distance de déplacement est négligeable ou nulle.

#### 2.3.2. Mode de formation des gîtes secondaires.

Trois vecteurs contrôlent la formation des gîtes secondaires (colluvionnaire, éluvionnaires et alluvionnaires). Ce sont l'érosion, le transport et le dépôt

##### 2.3.2.1. Erosion (Altération)

L'érosion est le mécanisme de désagrégation de la roche contenant ou non une substance minérale ou un élément chimique utile. Elle est due à un concours de phénomènes qui mettent en jeu des agents mécaniques, physiques et chimiques (goutte de pluie qui tombe, eau de ruissellement, action du soleil, du froid, du gel et dégel, présence de l'anhydride carbonique ( $H_2CO_3$ ) dissout dans l'eau météorique)

De plus interviennent certains phénomènes physico-chimiques comme l'extraction par hydrolyse et lixiviation des éléments chimiques des roches. Cette chaîne d'altération est responsable de kaolinisation des feldspaths, la transformation des micas, la latéritisation, etc...

Ce mécanisme est responsable du lessivage des ions constitutifs. Le rôle de l'eau est primordial dans les différentes phases de l'altération pour transformer la roche en la rendant moins résistante, donc disposée à la désagrégation et ensuite en la transformant pour la rendre chimiquement dissociable (voir annexe 2)

#### 2.3.2.1.1. L'altération mécanique

L'altération est l'ensemble des processus physiques qui utilisent les discontinuités de la roche pour la fragmenter.

##### ***Fragmentation d'origine thermique***

Variations de températures subies par les roches (thermoclastie ou cryoclastie).

*Thermoclastie* : seuls les changements de température créent des tensions dans les roches des régions à fortes amplitudes thermiques (déserts chauds par exemple).

*Cryoclastie (gélifraction)* : fragmentation due à l'alternance gel/dégel de l'eau qui remplit au préalable les vides des roches.

On peut citer en exemple l'éclatement du calcaire par le gel dans les pays froids.

***Hydroclastie*** est l'ensemble des processus mécanique de l'eau à l'état liquide comme dans le cas du ravinement dans les terres noires. L'hydroclastie travaille en usant de la variation de volume du matériau consécutivement à la variation de la quantité en eau au cours des temps (exemple des argiles et dessiccation).

##### ***Fragmentation par le vent***

En climat chaud, l'agent d'altération physique le plus actif est le vent grâce au sable qu'il transporte. Ce genre de mécanisme façonne des modelés et ce, en particulier comme les roches en champignon.

##### ***Haloclastie***



En climat désertique, la fragmentation des roches se fait sous l'effet de l'importante pression de sels dans les fissures et les cavités.

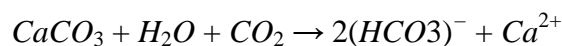
#### 2.3.2.1.2. L'altération chimique (météorisation chimique)

Il s'agit d'une dissociation des liens chimiques entre les minéraux, voire entre les ions. La transformation peut se faire par addition ou par soustraction d'éléments chimiques. Cela a pour résultat la production de débris fins.

Les agents de l'altération chimique sont l'eau (de loin la plus importante et agit par dissolution des ions), l'oxygène de l'air qui se combine avec d'autres composés et/ou d'autres éléments chimiques, par suite de la libération de l'acide ion  $H^+$  des minéraux, de la biosphère et de l'homme.

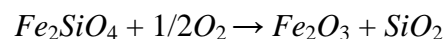
La température joue également un rôle très important sur la vitesse d'altération. Pour une augmentation de  $10^\circ C$  de la température ambiante, la vitesse de réalisation des réactions chimico-minéralogiques est doublée.

**La dissolution :** Dissociation d'une molécule en ions par un solvant. Dans le cas de la météorisation, le solvant est l'eau. La présence du  $CO_2$  étend le pouvoir dissolvant de l'eau. L'attaque des calcaires pour constituer les reliefs karstiques ainsi que la dissolution des gypses en sont un exemple parfait.



**L'oxydation :** Provoquée par l'oxygène de l'air

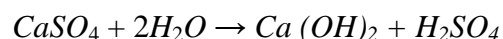
Traces carbonées, carbonates et sulfures transformés en oxydes.



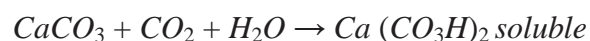
(Olivine + dioxygène  $\rightarrow$  oxyde ferrique + silice)

Ce mécanisme est en partie responsable de l'altération du granite favorisant ainsi la formation des nappes d'arènes.

**L'hydratation :** Concerne les roches composées d'éléments susceptibles de fixer la molécule d'eau comme les schistes qui donnent des argiles, anhydrite du gypse (formule indiquée),...



**La décarbonatation** est responsable de la solubilisation des calcaires et des dolomies sous l'action du  $CO_2$  dissout dans l'eau :

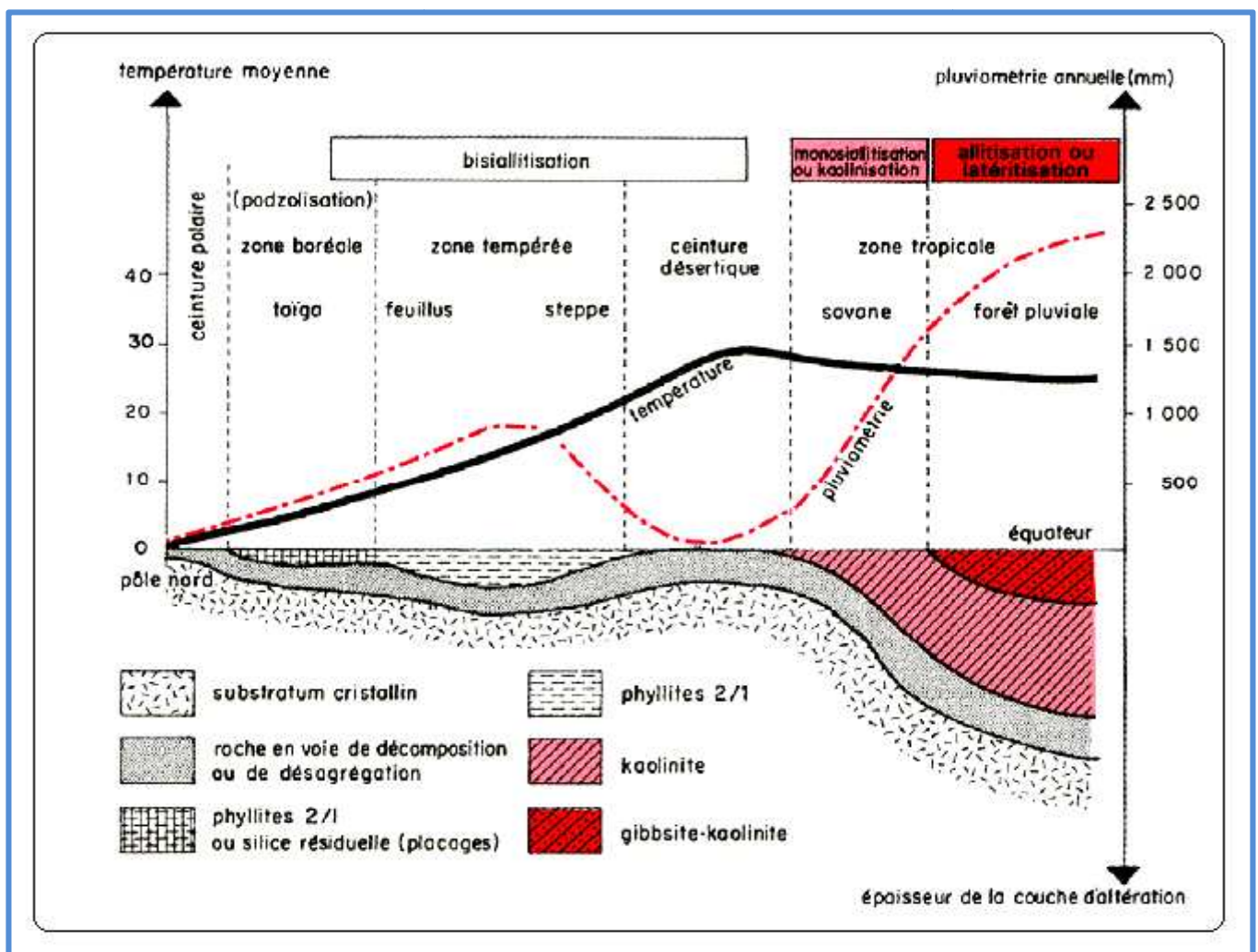


Ce mécanisme est celui de la formation de l'argile de décalcification à partir du calcaire.

**L'hydrolyse :** Destruction par les ions  $H^+$  libres de l'eau rend le milieu acide faible. Ceci contribue à transformer les roches cristallines en silicates hydratés (argiles). Les principales réactions d'altération sont :

- l'hydrolyse incomplète des milieux tempérés qui donne naissance à des argiles dites héritées. (Illite, montmorillonite, chlorite et vermiculite)
- l'hydrolyse totale des zones tropicales et équatoriales (climats chauds et humides). C'est une altération géochimique pure qui dissocie les silicates en éléments solubles qui pourront se recombinaison pour donner des argiles de néoformation (kaolinite, si fort lessivage : goethite et gibbsite). Ce mécanisme est l'origine de l'argilisation des roches cristallines.

### **Facteurs contrôlant l'altération**



**Figure 9-** Représentation schématique de l'épaisseur et de la nature minéralogique de la zone d'altération en fonction de la latitude.

**NB :** l'exposition détaillée de cette érosion et l'altération est développée en annexe 2.

#### 2.3.2.1.3. L'altération biologique

Cette altération fait appel à l'altération physique (ex. racines) et chimique (corrosion par les acides).

#### 2.3.2.1.4. L'altération liée aux activités humaines

L'altération liée aux activités humaines est la déforestation, l'activité minière, le bétail (techniques agricoles), les pluies acides (pollution atmosphérique), les loisirs ...

#### 2.3.2.2. Transport

Le transport des éléments de la roche détruite se fait par roulement, par suspension ou quelquefois par dissolution chimique. Ainsi, un cours d'eau avec une vitesse de:

- 0,3 Km/h peut transporter des argiles et de la boue
- 0,6 Km/h peut transporter des sables
- 3 Km/h peut transporter des galets de 100grs
- 15 Km/h peut transporter des blocs de 100kgrs
- 30 Km/h peut transporter des gros blocs de 100 tonnes

Ces chiffres permettent de comprendre que les variations de vitesse du courant d'un même cours d'eau donnent lieu à des dépôts très variés. A cet effet, un torrent fera descendre la pente à tous les blocs existants, nettoie et reclasse les dépôts dans son lit. Quand la vitesse diminue, il tend à abandonner sa charge solide. Les gros blocs sont les premiers à être déposés, puis les galets, etc...

La charge ne se répartit pas uniformément dans toute la section du cours d'eau. Elle se concentre au fond sur les bords. Elle progresse de deux manières différentes : en suspension et par entraînement, roulement et sauts successifs.

Ce ne sont pas les mêmes éléments qui progressent suivant deux modes différents du transport. La suspension n'intéresse que les particules fines et l'entraînement charrie les gros blocs ou galets.

Le transport est fonction d'une part de la nature du bedrock (lit large ou étroit, fond uni ou inégal et rugueux), d'autre part de la nature des minéraux transportés. Ces derniers sont les poids spécifiques: équivalence gravimétrique de chaque minéral, dureté minéralogique:

arrondissement des minéraux, clivage: certains minéraux ont tendance à se débiter suivant le plan de clivage, et flottent facilement, autres propriétés physiques: mouillabilité ou non.

#### 2.3.2.3. Dépôt

Le dépôt se fait quand le transport n'est plus possible c'est-à-dire quand la vitesse chute ou s'annule. En suivant un cours d'eau, après un trajet torrentiel, le relief devient plus calme. Cette autre partie du cours correspond à la zone de rupture de pente. Dans cette zone où la vitesse diminue progressivement, les gros blocs vont s'accumuler suivis des galets de plus en plus petits puis de graviers. Cet ensemble forme ce qu'on appelle le cône de déjection.

En réalité, les choses sont plus complexes et il existe le long des cours d'eau différents obstacles provoquant des ralentissements plus ou moins importants de la vitesse et comme les barres rocheuses, les « boulders » encastrant dans le lit, les changements de directions ou méandres, les marmites de géants... Les variations des conditions thermodynamiques (acidité de l'eau ou pH, potentiel d'oxydoréduction etc...) provoquent également des perturbations dans l'ordre normal du dépôt des charges solides du cours d'eau.

Ces différentes actions le long du chenal d'écoulement du cours d'eau font que les matériaux arrachés en « amont » sont déposés en « aval » pour atteindre le profil d'équilibre du cours d'eau qui est caractérisé par le fait que l'eau ne provoque ni érosion ni dépôt tout au long de son chenal. On dit également que le cours est dans sa phase de sénilité. La rupture de ce profil due à des mouvements tectoniques essentiellement provoque la régression régressive : l'érosion reprend en remontant la pente au niveau du bassin de réception.

Par suite de phénomènes ultérieurs notamment géodynamiques, les mêmes cours d'eau peuvent avoir des profils d'équilibre différents correspondant à des temps  $T_n$  différents et qui se surimposent plus ou moins:

- la superposition de ces différents profils permet d'expliquer la classification des matériaux des alluvions dans une section donnée de la vallée.
- en regard des temps géologiques, bien que ces matériaux soient déposés à des périodes différentes, ils sont considérés comme contemporains.

#### 2.3.3. Mode de dépôt

En considérant les différentes sections des cours d'eau on note que dans:

➤ le cours torrentiel: il n'y a pas à proprement parler d'alluvions mais des dépôts dus à la diminution de la vitesse du courant. Il y a alors un mélange non classé d'éléments variés susceptibles de remaniement ultérieur, le bedrock est parfois à nu.

➤ la zone de rupture de pente: ici on observe le cône de déjection où les éléments d'une époque donnée sont classés par rapport au point de rupture de pente mais non suivant une coupe nette.

➤ le cours inférieur: dans cette section, les éléments fins se déposent de préférence.

*Coupe théorique des alluvions:* Tous les faits cités plus haut montrent que la rivière a une histoire, et que les dépôts alluvionnaires sont en relation avec les tracés hydrographiques successifs : les sables fins correspondent à des dépôts actuels ou récents, les galets et blocs fins à des dépôts plus anciens

En effectuant une coupe en amont d'une rupture de pente de courtes portions de tracé du cours peuvent présenter une zone d'équilibre du fait de l'alluvionnement. On note alors de bas en haut: le bedrock de nature variée, la couche à galets et blocs, la couche à graviers et la couche d'éléments plus fins (sable-argile-limons) sont partiellement fixés.

Les éléments sont bien classés à chaque niveau et le rapport des diamètres des éléments détritiques va de 1 à 10.

*Coupe complète d'une vallée:* En raison de la superposition des zones des profils d'équilibre on arrive à définir une disposition qui reflète les diverses étapes de la vie de cours d'eau:

➤ les plus anciens dépôts sont les alluvions piochées (avec une série complète: galets, sables, argiles) qui correspondent à une époque très ancienne où la rivière s'étendait largement. Elles sont parfois très latéritisées et reposent sur le bedrock que l'on voit sous la couche à galets. Ce sont les « terrasses » et elles ne sont plus actuellement atteintes par l'eau même en cas de crues.

➤ au-dessous: on trouve une formation similaire à la terrasse dont la couche visible n'est pas complète. C'est la banquette ou basse terrasse. Elle peut être mouillée lors des inondations. Au dessous de cette banquette, on passe à la plaine alluviale proprement dite, c'est-à-dire le lit actuel. On distingue le lit majeur ou zone inondable et le lit mineur.

Le flat est compris entre ces deux terminologies et correspond au volume de sable couvrant le lit majeur.

Le run est l'ancien lit mineur du cours d'eau. Il ne peut pas se superposer avec le lit mineur actuel.

La coupe ci-dessus est la plus simple. En fait on rencontre une série de cas assez complexes tels que les vallées enterrées anciennes ou vallées fossiles mitoyennes à une vallée dite **deep-lead**, les vallées enterrées récentes au-dessus desquelles s'ébauchent de nouvelles vallées, etc....

*Les dépôts lacustres:* ils diffèrent des dépôts fluviaux notamment par le fait qu'ils n'ont pas de couches à galets. Les éléments sont classés mais ne suivent pas la disposition fluviale car de bas en haut on a: sables fins, dépôts grossiers, petit niveau de fins.

Ceci est dû à l'avancement du comblement. On distingue des dépôts sur le lit du lac et des dépôts de terrasse sur le lac.

*Autres dépôts:* citons pour mémoire: les dépôts littoraux, éoliens, glaciaires

#### *Processus de dépôt des éléments*

Le dépôt se fait dans une section donnée, lorsque la force du courant diminue et ce, en fonction du poids, de la forme et du volume des matériaux solides charriés. Il importe de considérer la notion d'équivalence gravimétrique (densité-grosueur) car un gros galet de faible densité (quartz) sera déposé en même temps qu'un galet plus petit, mais plus dense (basalte). L'or fin en poudrette sera déposé plus rapidement que le quartz. Cette loi d'équivalence est parfois mise en défaut par d'autres paramètres notamment la forme (or en paillettes).

La concentration des minéraux lourds dans les alluvions est favorisée par le pistonage naturel que réalise l'alternance saisonnière des crues et des décrues du cours d'eau.

En tenant compte de la loi d'équivalence, il faut considérer les tranches granulométriques lors de la prospection des substances minérales car les minéraux très lourds rejoindront le fond au niveau des gros galets. La localisation des minéraux utiles se feront alors de façon dégressive vers le sommet de la pile alluviale en fonction du rapport densité-diamètre. L'enfouissement par pistonage n'est pas parfait pour tous les minéraux.

➤ dans les zones torrentielles: on grappille entre les gros blocs et parfois une certaine épaisseur du bedrock fait partie du prélèvement.

- dans les barres rocheuses: on fait le prélèvement en amont de la barre en allant jusqu'au bedrock. Si le prélèvement est ici impossible, on se reporte à la zone aval c'est-à-dire au cône formé à la sortie des petites chutes.
- dans les marmites de géants: il faut toujours les vider et bien nettoyer les parois et le fond. Les meilleures sont celles qui ont un axe plongeant incliné vers l'amont.
- aux racines des arbres: on grappille entre les racines ou entre les souches
- dans les rifles du bedrock: on prélève en amont de chaque rifle
- dans les zones basses, il faut aussi prendre son matériau au contact du bedrock de la terrasse, à défaut de terrasses on s'adresse aux banquettes ou flats.
- dans les zones basses ou dans la plaine alluviale, les prélèvements se font surtout dans la couche à galets de la rive concave des méandres
- des zones de confluence

Si on est largement outillé, on peut faire une série de sondage ou de puits jusqu'au bedrock. Les dimensions seront 0,80 x 0,50m tant que la profondeur ne dépassera pas 0,60m. Au delà, les dimensions sont portées à 1,50 x 0,70m pour permettre un espace de travail au fond du puits. Il doit être boisé.

Dans les terrains peu consistants et dans les lits des rivières, on a recours à la forme circulaire car cette section est celle qui est le mieux disposé au boisage. Lors du fonçage, le rejet du stérile se fait d'un côté du puits et le gravier d'un autre en évitant soigneusement de les mélanger.

Pour un échantillon moyen, on effectue une rainure dans le gravier le long de deux parois du puits, l'une correspondant à l'amont, l'autre à l'aval du cours d'eau. Les rainures doivent être identiques. Le produit du rainurage est mélangé, quarté, puis lavé.

Si le gravier est stratifié, dans des cas bien déterminés, on a intérêt à effectuer autant de prélèvements qu'il y a de catégories différentes de gravier.

#### 2.3.4. Types de minéraux rencontrés dans les alluvions

Les minéraux susceptibles d'être concentrés dans les gisements alluvionnaires doivent à priori présenter un certain nombre de propriétés : résistance ou inertie chimique, résistance physique et mécanique, caractère minéralogique permettant la concentration sélective (densité)

Les espèces réunissant ces propriétés sont:

*Métaux natifs*: or, métaux de la série du platine (iridium, osmium, platine,...), parfois cuivre ou argent natif dans l'or (or gris de Madagascar)

*Oxydes*: cassitérite, magnétite, rutile, ilménite, chromite, colombo-tantalites, niobotantaloïtes, titanates de terres rares et d'uranium, monazite, zircon, thorianite, wolfram, spinelle, etc...

*Pierres précieuses et fines*: diamant, corindon, zircon, quartz, grenat, rubis, saphir, émeraude, béryl, tourmaline et minerais de lithium

*Autres produits*: les alluvions peuvent contenir des minéraux de plomb, cuivre, zinc... en provenance de véritables gisements voisins.

### 2.3.5. Règles de prélèvement des échantillons

Le premier travail consiste à établir la carte prévisionnelle de prélèvement. Cette carte déterminera les itinéraires que doit prendre chaque opérateur. On relève les éléments remarquables du réseau hydrographique. En pratique, la prospection des rivières se fait d'ordinaire d'aval en amont.

Le nombre total des prélèvements est déterminé par la densité de prélèvement qui est le nombre des points d'échantillonnage au kilomètre carré. La densité est fonction du niveau de connaissance de la région et de l'étape de la prospection. Le volume de matériaux à laver est également prédéfini et est le même pour une même campagne. Un opérateur doit tenir pendant l'exécution de son itinéraire : un carnet personnel pour consigner toutes les observations, des fiches de prospection et une carte des prélèvements qui est la carte prévisionnelle de prélèvement corrigée ou confirmée par la localisation exacte des prélèvements effectivement réalisés.

Quant aux prélèvements proprement dits, quel que soit le site il faut toujours aller jusqu'au niveau de l'horizon ou du niveau qui concentrerait au mieux les minéraux prospectés. Il est important de bien nettoyer sa surface avant le prélèvement et ce, dans la mesure du possible.



Lors de l'exécution du puits, on peut rencontrer parfois plusieurs couches de graviers superposées à des solides couches d'argile que l'on appelle « faux bedrock ». On peut s'y laisser prendre et arrêter les travaux à l'apparition de celui-ci. Une telle erreur peut être évitée en prenant soin de sonder à la barre à mine tous les fonds des trous pour s'assurer qu'on est ou non sur la roche en place.

#### 2.3.6. Remarques sur la pratique de la prospection alluviale

##### *Prospection générale*

Lors des grandes reconnaissances stratégiques, on admet en général une densité de prélèvement de 0.01.

##### *Prospection détaillée*

Il faut tenir compte d'une certaine précision et apprécier la valeur de l'indice en mettant en recoupement toutes les informations y afférent dont notamment les valeurs analytiques et les observations des minéraux lourds. On reporte toutes les informations recueillies sur une même carte où sont également localisés les indices en place découverts par les programmes antérieurs.

Ces travaux visent à définir les « bassins » susceptibles de receler des indices valorisables. Ils ont pour but d'évaluer le tonnage du minerai. Chaque indice de ressource minérale est à apprécier en fonction d'une teneur dite limite et une quantité limite au-dessous desquelles, l'opération d'exploitation n'est plus rémunératrice. A une étape stratégique, cette teneur est dite « teneur sub-économique ».

##### *Prospection systématique*

On demande beaucoup plus de précision à cette étape et ceci, afin de prévoir si le gîte justifie ou non son exploitation à profit.

#### 2.4. Les données géochimiques

Les sédiments alluviaux des lits vifs (Stream sédiments) ont été collectés dans les chenaux de drainage actifs des petits cours d'eau. Chaque échantillon est un composite de sous-échantillons distants entre eux d'au moins 5 mètres. Les coordonnées des sites d'échantillonnage sont déterminées à l'aide de GPS (Laborde à grille de 1m). Ces dernières sont enregistrées avec d'autres données codées du site sur une fiche de terrain et ensuite

saisies dans la base de données du projet. Chaque échantillon est tamisé sur place à l'aide d'un tamis nylon de maille de 1mm pour donner un sédiment tamisé d'environ 1 à 2 kg. Un doublon (duplicata) est collecté aux termes de cent prélèvements.

Après séchage en plein air, les échantillons sont ensuite tamisés à travers un tamis de 150 µm. Les échantillons que nous avons par la suite utilisés ont été envoyés pour analyse chimique aux laboratoires 'ACME' à Vancouver, Canada. Les échantillons répliques et le matériel de contrôle et de référence sont inclus dans les lots analytiques avant l'envoi. Les échantillons sont analysés pour 53 éléments chimiques par 'ICP-MS' et 'ICP-AES'. 1g de solution a été extrait de chacun des échantillons pour une attaque tri-acide de 6 ml de réactif acide (2 : 2 : 2, HCl-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) à une température de 97°C pendant une heure avant d'être dilué à 20 ml. Les données de terrains et analytiques sont saisies dans une base de données relationnelle MSACCESS. Les résultats sont ensuite exportés pour analyse statistique et traitement au SIG.

**PARTIE III : LES DIFFERENTES CARTES, LA  
ZONE D'ETUDE DANS SON CONTEXTE  
NATIONAL ET TRAITEMENT D'IMAGE  
SATELLITALE**

### CHAPITRE III: DESCRIPTION DU LOGICIEL

#### 3.1. Description du logiciel de modélisation

Le logiciel utilisé a été élaboré par Matlab (MATrix LABoratory) qui est un logiciel de programmation scientifique. Il fut initialement conçu, au début des années 1980, pour manipuler aisément des matrices à l'aide de fonctions pré-programmées en s'affranchissant des contraintes des langages de programmation classique :

- plus de déclaration de variables
- plus de phase d'édition-compilation-exécution.

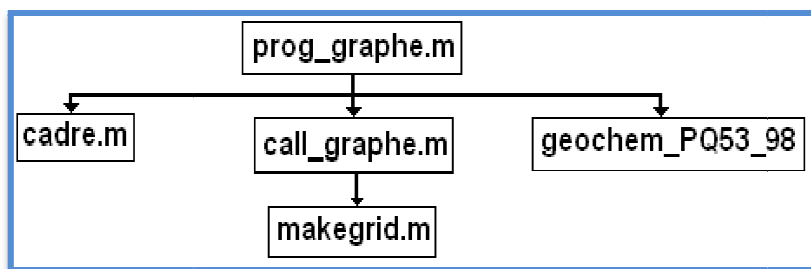
Cette orientation matricielle a évolué depuis vers un outil pouvant être vu comme une super-calculatrice graphique et regroupant dans la version de base la quasi-majorité des problèmes numériques. Au début, il était écrit en Fortran par C. Moler et destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle, écrite en C par The MATHWorks INC, existe en version professionnelle et en version étudiante. Matlab est disponible sur différentes plateformes (unix, pc, mac, etc...).

L'approche matricielle de Matlab permet de traiter des données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques de façon fiable et rapide. Grâce à ses fonctions graphiques, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon les besoins.

La particularité de Matlab est qu'il permet de travailler interactivement soit en mode commande, soit en mode programmation tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques (Part-Enander et al, 1996). Des programmes complexes ne nécessitant pas la reprogrammation de routines ou fonctions classiques ont pu être réalisés car il comprend déjà une grande variété d'algorithmes scientifiques ainsi que de fonctions prédéfinies indispensables pour atteindre des objectifs spécifiques. Les fichiers de programmes écrits en Matlab portent l'extension '.m'. La version 7.3.0 de Matlab (septembre 2006) est complètement satisfaisante sachant qu'elle inclut déjà toutes les fonctions de base utile. Enfin, les possibilités de représentations graphiques offertes par Matlab permettent de modéliser dans un domaine rectangulaire et de créer ainsi une interface graphique qui sera décrite par la suite.

Le programme principal s'appelle 'prog\_graphe.m' et effectue l'affichage de la fenêtre principale représentée par la **figure 9**. Il est relié aux fichiers et sous-programmes suivants (**figure 9**) :

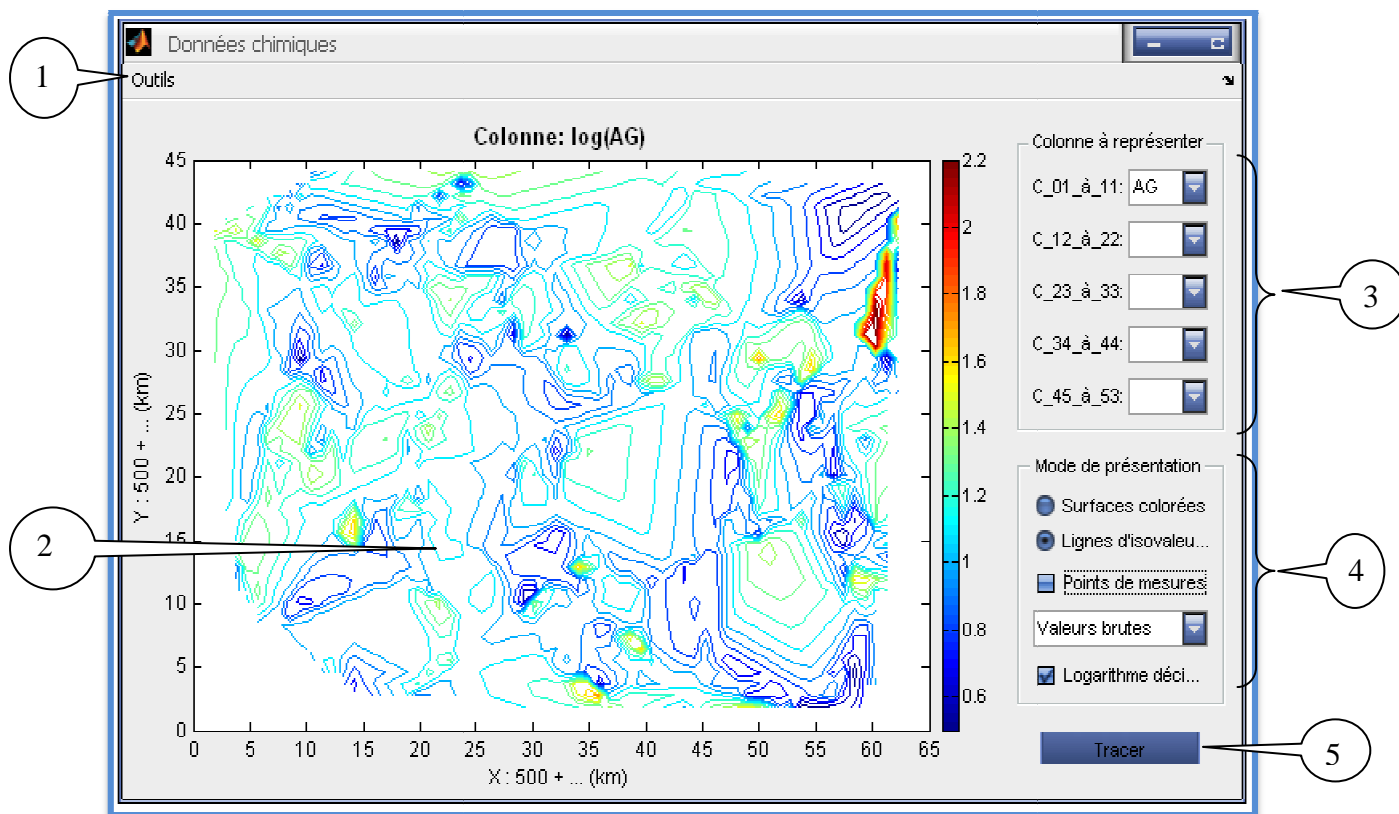
- cadre.m : création d'un cadre pour bien séparer les différentes parties de la fenêtre principale.
- geochem\_PQ53\_98.xls : fichier de données contenant les données géochimies à traitées
- call\_graphe.m : définition des actions à exécuter en cliquant sur chaque objet de la fenêtre principale. Cette fonction est reliée au sous-programme suivant :
- makegrid.m : fonction de représentation graphique destinée à afficher des quadrillages selon les graduations des axes.



**Figure 10-** Liaison entre le programme principal et les différents fichiers et sous-programmes nécessaires.

Ce logiciel de modélisation répond aux besoins suivants :

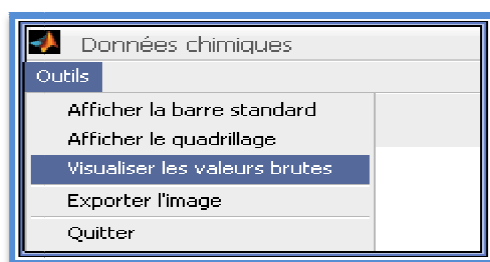
- Représentation graphique des courbes des points de mesures (Valeurs brutes)
- Représentation graphique (surfaces colorées, lignes d'isovaleurs) des composantes X, Y (coordonnées Laborde) et Z (données géochimiques),
- Représentation des points de mesures sur la carte visualisée précédemment



**Figure 11-** Fenêtre principale du logiciel de modélisation (exemple présentation de  $\log(\text{Argent})$ ).

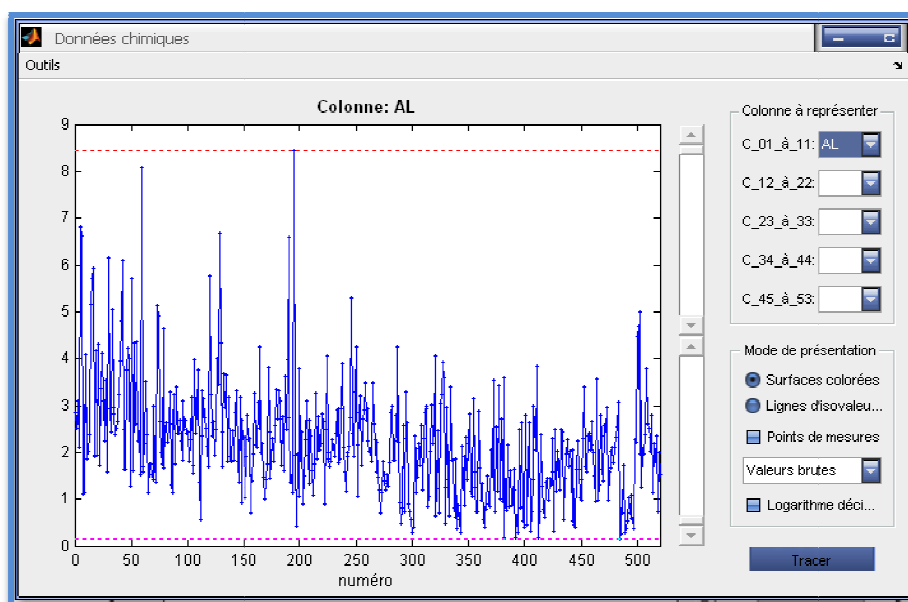
En lançant le programme principal 'prog-graphe.m', la fenêtre principale représentée sur la **figure 10** est affichée. Certains boutons sont initialement désactivés et le logiciel a été réadapté de façon à ce qu'ils ne seront activés qu'en cas de besoin. Ils seront automatiquement désactivés après usage. La fenêtre principale comprend cinq zones :

① - Une zone composée d'un menu (**figure 11**) : le menu 'Outils' permet d'afficher la barre standard, d'afficher le quadrillage, de visualiser les valeurs brutes, d'imprimer l'image représentée sur la zone ② dans un fichier de format \*.tif ou \*.jpg ou \*.bmp, et de quitter la fenêtre principale.



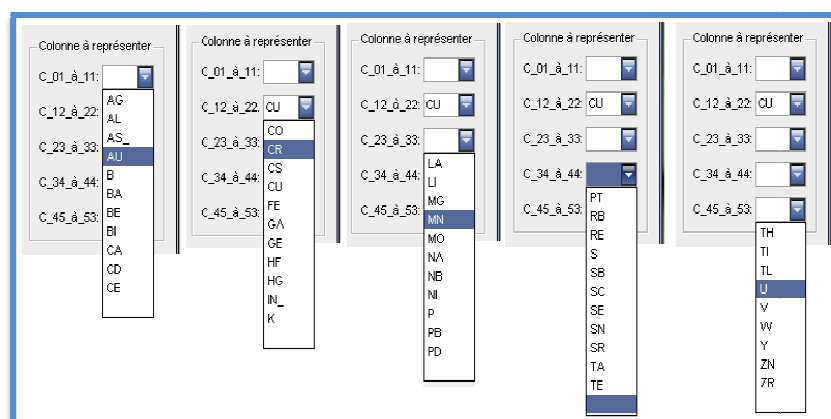
**Figure 12-** Détails des menus de la zone ① de la figure 16.

② - Une zone graphique dont les données à traiter sont selon l'option choisie dans la zone ① (outils : visualiser les valeurs brutes) (**figure 12**) et dans la zone ④. Elle sert également à afficher les points de mesures selon l'option choisie dans la zone ④.



**Figure 13-** Fenêtre pour visualiser la courbe des valeurs brutes (exemple ici Al : Aluminium).

③- Une zone pour visualiser les données à traiter.



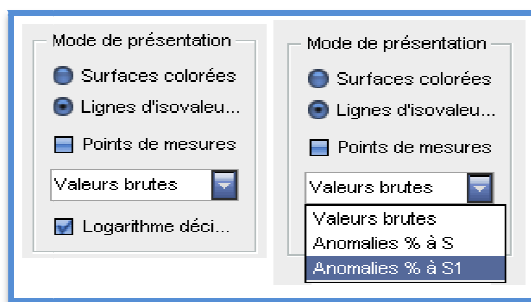
**Figure 14-** Visualisation des valeurs à traiter.

④- Une zone pour l'étude du modèle proprement dite. Elle permet de présenter graphiquement selon notre choix. L'étude peut se faire soit (**figure 14**) :

Sur les valeurs brutes : les données sont réelles (**R**), mais les valeurs à traiter sont des éléments positifs ou nuls. Parmi les données il y a des valeurs très grandes. Afin de pouvoir les représenter graphiquement, on utilise les valeurs de leurs logarithmes à base 10 en ignorant les valeurs nulles.

L'anomalie à S1 : Pour avoir les cartes d'anomalie géochimique, cette option est utile pour avoir précisément le point à forte anomalie en utilisant la formule  $A_{S1} = V_b - S_a$  où  $V_b$  : Valeurs

brutes et  $S_a$  : Seuil d'anomalie qui est égal à avec : moyenne et  $\sigma$  : l'écart type (voir Rappel de quelques notions de statistiques)



**Figure 15-** Détails des options de la zone ④.

⑤-Une zone pour tracer le graphe choisi dans la zone ④

Nous allons par la suite décrire un exemple concret afin de bien illustrer le fonctionnement du logiciel de modélisation

### 3.2. Illustration du fonctionnement du logiciel de modélisation

Toutes les figures explicitant les résultats qui seront présentés au paragraphe ci-dessous ont été obtenues à l'aide du logiciel ci-dessus décrit. Or, il y a des détails importants qui n'ont pas pu être décrits précédemment. Un exemple concret est donné ci-après pour mieux montrer les différentes possibilités offertes par le logiciel de modélisation et les résultats correspondants.

Pour montrer que le modèle peut effectivement représenter les cartes d'anomalies géochimiques, prenons l'exemple de l'élément chimique Cr (Chrome).

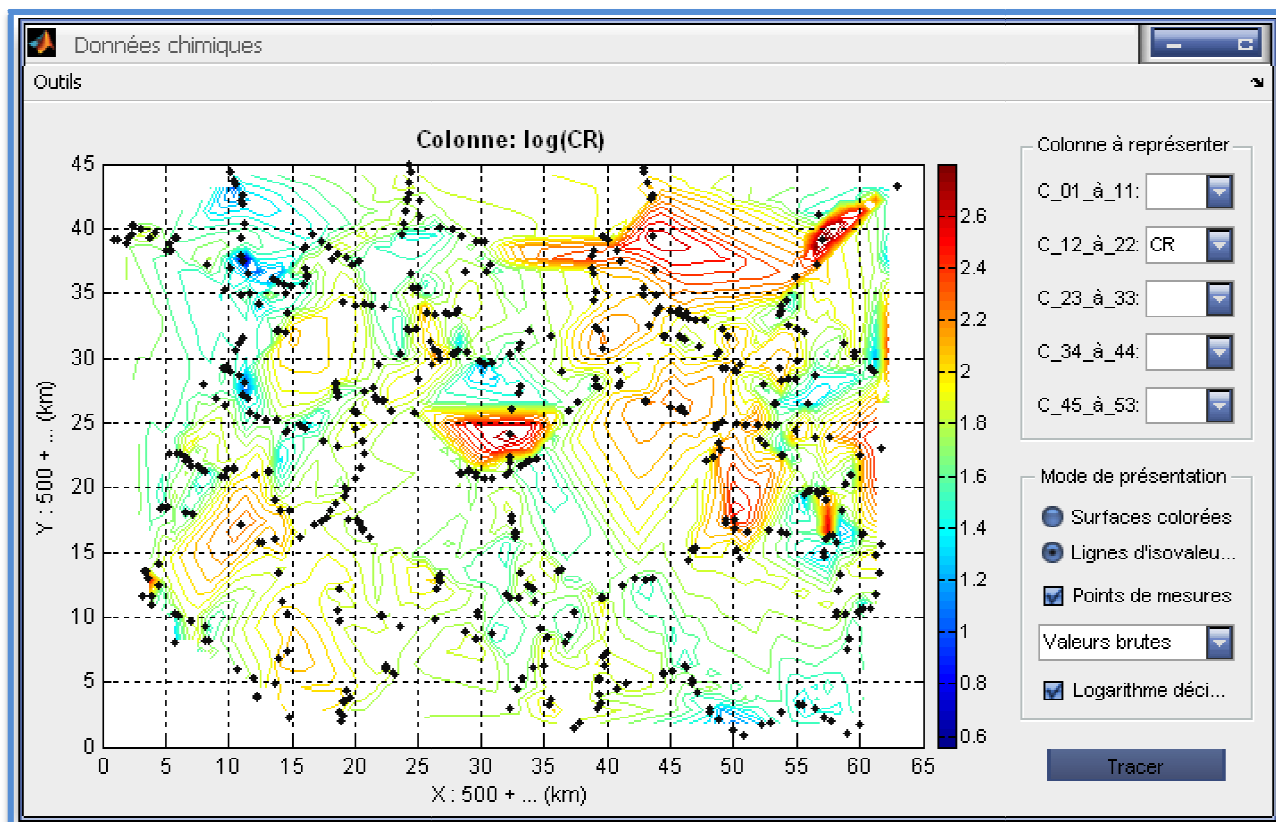
#### 3.2.1. Les données à traiter

Le traitement des informations commence par la lecture des données en cliquant sur la colonne à représenter dans la zone③. Sur le menu outils, choisir « visualiser les valeurs brutes » (voir **Figure 12**) et la courbe des valeurs brutes est affichée.

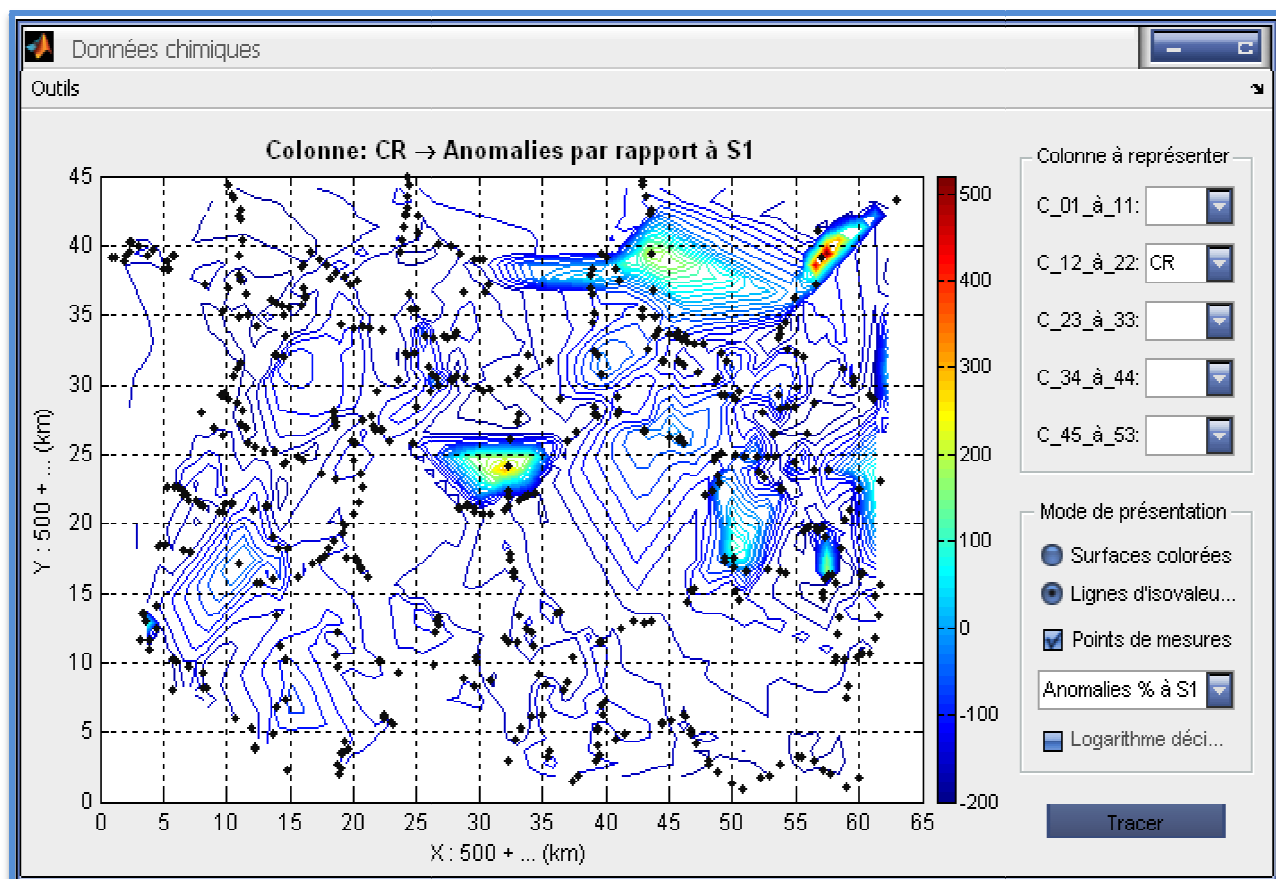
#### 3.2.2. Visualisation graphique des données à traiter

L'étape suivante consiste à visualiser graphiquement les données à traiter en choisissant sur l'option « mode de présentation de la zone④ ». Cette étape est surtout indispensable pour connaître les surfaces colorées et pour visualiser les courbes d'isovaleurs (**figure 15 et 16**). Les courbes des lignes des isovaleurs sont ici représentées.





**Figure 16-** visualisation graphique en choisissant les lignes d'isovaleurs



**Figure 17-** visualisation graphique d'anomalie en choisissant Anomalie à S1

Pour marquer les points de mesures, il suffit de cocher l'option 'Points de mesures'.

La figure 15 montre la représentation graphique des données géochimiques en Cr dans le système de projection Laborde. Les lignes des isovaleurs sont clairement exprimées. De même pour la carte des anomalies (**figure 16**).

### 3.2.3. Résultats et discussions

Comme il a déjà été précédemment montré en détail, le fonctionnement du logiciel de modélisation aide beaucoup à l'interprétation. Pour la suite, il ne sera tenu compte que des figures affichées sur la zone ② pour présenter les résultats des études. Il est à rappeler que les images au format '.tif' ou '.jpg' peuvent être obtenues en imprimant les figures de cette zone ② à l'aide du sous-menu correspondant dans le menu 'Outils'. Par ailleurs, ceci permet d'avoir une bonne présentation des résultats.

#### CHAPITRE IV: LA ZONE D'ETUDE DANS SON CONTEXTE NATIONAL

Le socle précambrien de Madagascar occupe les deux-tiers orientaux de l'île. C'est un ensemble de schistes cristallins de métamorphisme profond (faciès amphibolite et granulite prédominants) où toute approche lithostratigraphique est difficile.

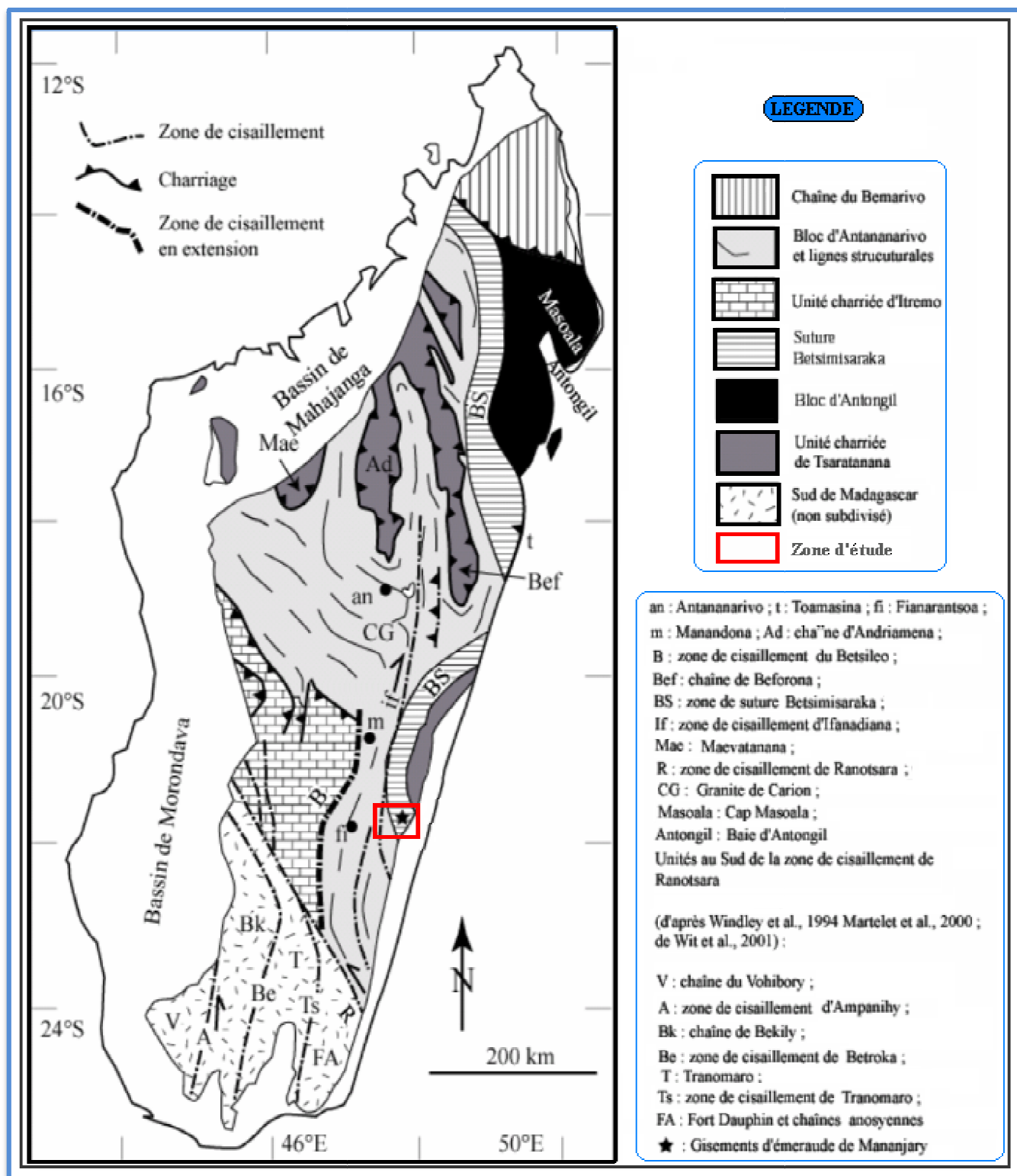
La couverture de cartographie géologique au 1/100.000 établie par le Service Géologique et le BRGM, jusqu'en 1975, constitue un ensemble de bonnes cartes lithologiques. Les essais de reconstitution d'une échelle lithostratigraphique qui apparaissent dans les synthèses au 1/1.000.000 et 1/500.000 de H. Besairie (1964 et 1969-71) et au 1/2.000.000 de G. Hottin (1976) sont aujourd'hui presque entièrement abandonnés.

Depuis une vingtaine d'années, différents travaux universitaires dans les domaines de la géologie structurale, de la géochronologie, de la pétrographie et de la métallogénie ont permis de renouveler les idées sur l'histoire géologique du Précambrien Malgache mais il reste encore trop localisés pour permettre une synthèse solide à l'échelle de l'ensemble de l'île.

S'appuyant sur ces études Collins et al. (2002) ont présenté une approche intéressante de l'architecture du Précambrien. Ils ont proposé une subdivision de ce socle en sept grandes unités tectono-métamorphiques par (**figure 17**). Les formations qui constituent le centre et l'Est de l'île sont archéennes : unité d'Antongil et d'Antananarivo séparées par ce que les auteurs appellent la “ suture Betsimisaraka ”. Les formations du Sud et du Centre-Ouest (unité d'Itremo) et probablement celles du Nord (unité de Bemarivo) sont du Protérozoïque.

Toute l'île à l'exception de l'Unité d'Antongil, a été structurée par l'orogénèse panafricaine à 500-550 Ma.

La zone d'étude se trouve sur les feuilles PQ53, près de l'extrémité Sud de la “ suture Betsimisaraka ”. Cette unité est ainsi dénommée parce que les auteurs considèrent qu'il doit s'agir d'un témoin de la croûte de l'océan qui séparait l'Inde de l'Afrique, avant la formation du continent du Gondwana. L'Antongil (daté à 3200 Ma) et son équivalent Sud de la Masora seraient rapportés au craton du Dharwar (en Inde). La “ suture Betsimisaraka ” marquerait la zone de subduction ayant conduit à la collision Inde-Afrique de l'Est. Cette hypothèse demande évidemment à être vérifiée par des arguments structuraux, lithologiques et pétrographiques (métamorphisme de haute pression). Les études structurales récentes (Martelat et al. 2000) ont mis en évidence une grande zone de cisaillement verticale qui se prolonge vers le Nord jusqu'à l'Angavo (Est d'Antananarivo) et s'étend probablement jusqu'à la limite Nord-Ouest du Précambrien à la latitude de Majunga.



**Figure 18-** Unités tectoniques de Madagascar selon Collins et Windley (2002).

## CHAPITRE V: LES DIFFERENTES CARTES OBTENUES

### 5.1. Comment obtenir les différentes cartes de géochimie

Puisque les données géochimiques disponibles portent sur 53 éléments chimiques et à l'instar de l'exemple précédent avec l'élément chimique Cr, il est possible d'obtenir les différentes cartes de géochimie des différents éléments chimiques dosés.

### 5.2. Méthode d'élaboration de cartes géochimiques d'interprétation

Les études se focalisent sur l'étude de la possibilité en minéralisation en dégageant le potentiel minéral et à partir de ce potentiel minéral, on pense aux métallotectes associés à chaque substance au groupe de substances pour essayer de proposer des modèles métallogéniques envisageables. Plusieurs techniques de traitement sont faites pour pouvoir dégager les modèles. Les éléments chimiques qui contribuent à la formation des minéraux ou tout simplement qui sont incorporés dans les minéraux respectant la règle de l'affinité géochimiques qui est résumée comme suit :

- les éléments chimiques de transition, suivant la valeur de leur OSPE (Octahedric System Potential Energy), ont une affinité aux liquides magmatiques formés lors des événements de fusion partielle. Les éléments à faible valeur de l'OSPE sont préférentiellement transférés dans les premières phases des liquides formés ;
- en partie de la même propriété d'affinité ci-dessus, les éléments chimiques de transition à forte valeur de leur OSPE sont préférentiellement transférés vers les premières phases solides formés ;
- les éléments chimiques résiduels vont incorporer les phases solides issues des liquides magmatiques évolués ;
- les éléments chimiques hygromagmatophiles constituent des complexes stables avec le liquide magmatique et ne peuvent être transférés dans les solides et ce, à n'importe quelle phase de la différenciation du magma ;
- les éléments chimiques évoluent d'une manière harmonisée en fonction de leurs affinités respectives et connues soit à l'oxygène tout en observant des liaisons ioniques soit au soufre avec des liaisons covalentes et des aptitudes à se mettre en métal natif et aux alliages métalliques naturelles.

Parmi ces 53 éléments, plusieurs sont regroupés par affinité géochimique. Les regroupements suivants ont alors été retenus :

- affiliation au magmatisme ultrabasique : Ag, Au, Cr, Cu, Ni, Pt, Re, Fe.
- affiliation non rigoureuse : Th, Cs, U, Zn, Zr, Li, Pb, Sb.
- métaux rares: Be, Cd, Co, Mo, V, W.
- terres rares: Ce, La, Nb, Y.
- éléments majeurs et mineurs : Al, Ca, K, Mg, Mn, Na, P, Ti.
- éléments rares: Ga, Ge, In, Rb, Sc, Sn, Tl.
- Complexants et coordinnats: As, Ba, Bi, Hf, Hg, S, Se, Sr.

Il est proposé sept cartes de géochimie à comprendre (voir la partie ci-dessous). Plusieurs techniques sont utilisées pour avoir ces cartes en utilisant le logiciel Georegarcview, Arcview (3.3 ou ArcGis 9.3). Voici les manières de procéder pour avoir ces cartes :

- on exporte l'image depuis le logiciel de modélisation. Le format de l'image est à choisir entre .tif, .bmp, .jpg.
- ensuite, on fait un calage sur Georegarcview ou sur Arcview à condition que l'extension « register and transform tool » est installée.
- Après, on exporte l'image sur ArcGis pour la numérisation des zones à fortes anomalies et on regroupe les éléments en conformité aux regroupements ci-dessus.
- Ces cartes sont combinées avec la carte transparente de géologie, de tectonique, d'altimétrie pour avoir une bonne interprétation

En fin, les nouvelles cartes obtenues sont à nouveau exportées au format du choix (voir les figures au chapitre suivant) avec ses légendes.

## CHAPITRE VI: TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITALE

Le traitement des images satellitales a été utilisé pour les besoins de la lithologie, de la géologie structurale. Les images utilisées sont celles dites SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de l'U.S Geological Survey (NASA). En effet, ces dernières sont relativement simples à acquérir et à traiter et demeurent également les plus utilisées.

Les images SRTM fournissent des Modèles Numérique de Terrain (MNT) gratuits et accessibles depuis Internet. Ceci représente, un atout non négligeable du fait que les MNT jouent un rôle important analyse spatiale sur beaucoup de domaines dont géologie structurale, environnemet, analyse paysagère, compréhension de risques naturels....

Les données SRTM sont disponibles dans six formats différents, résultant des divers traitements réalisés sur les données brutes.

Résolution	Projection	Couverture
1 arc-seconde (30mètres)	Géographique	Format natif USGS (degré)
	UTM	WRS-2 Path/Row
3 arcs-seconde (90 mètres)	Géographique	Format natif USGS (degré)
	UTM	WRS-2 Path/Row
30 arcs-seconde (1 kilomètre)	Géographique	Format natif USGS (degré)
	Géographique	Global ('mosaic')

**Tableau 4-** Edition des données SRTM du GLCF.

Toutefois, seules les cartes à 90 m de résolution sont disponibles pour le public. Les cartes de plus fortes résolutions requièrent une autorisation préalable à leur utilisation.

Les précisions de ces données fournies dans le système de coordonnées WGS84 (géoïde EGM96), sont détaillées ci-dessous :

Précision (en mètre)	Verticales	Planimétriques
----------------------	------------	----------------

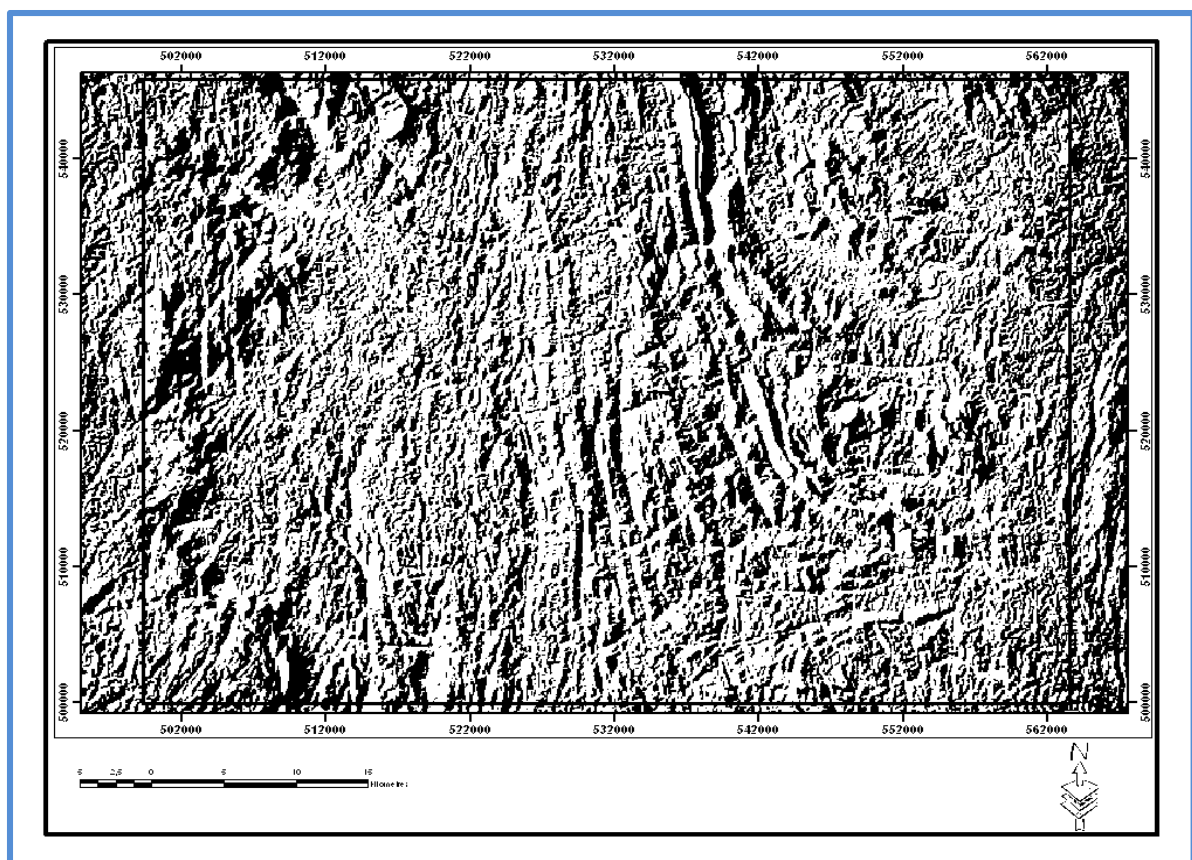
Absolues	16	60
Relatives	10	45

**Tableau 5-** Précisions relatives à l'acquisition des données SRTM.

La méthodologie de traitements des données SRTM, fait intervenir trois utilitaires différents à savoir Internet, Erdas Imagine et Arcview (3.3 ou ArcGis 9.3).

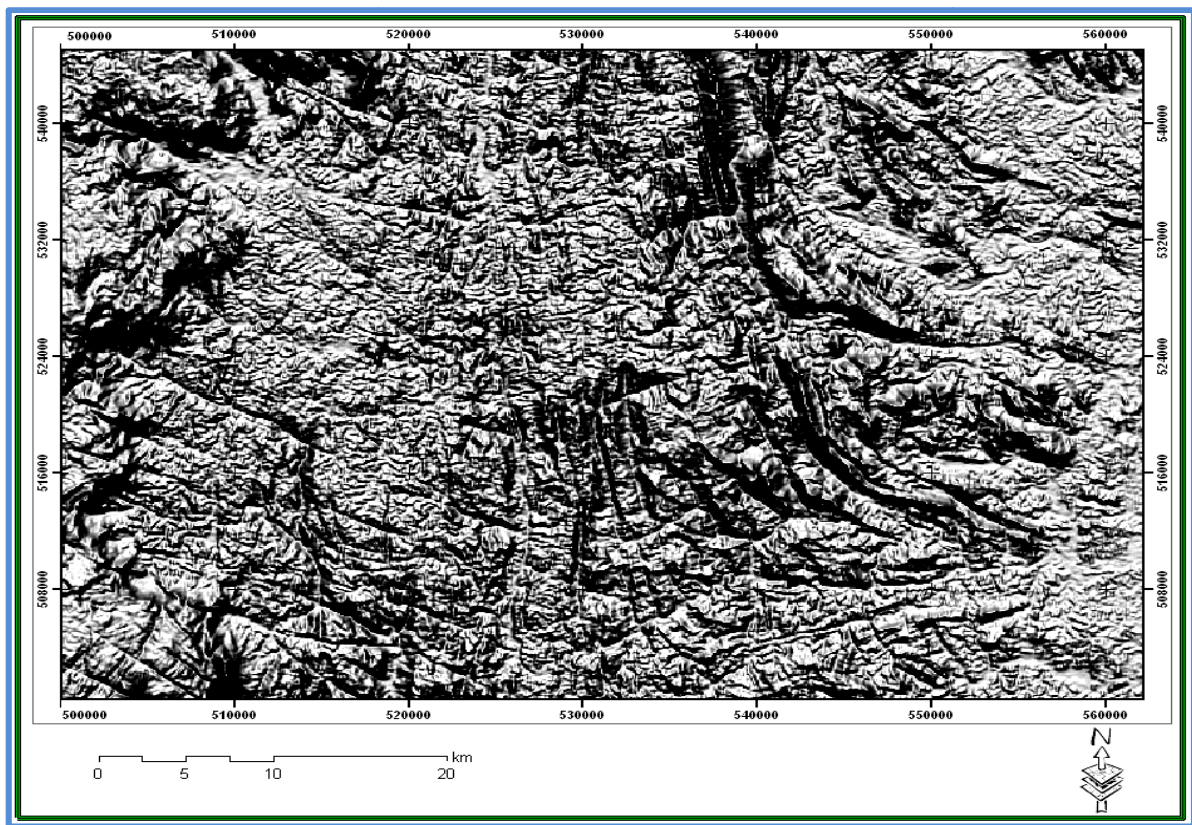
Les données SRTM présentent souvent des carences (manquement à remplir) d'information à remplir. Afin de pouvoir exploiter ces données, il est nécessaire de procéder à un comblement de ces trous d'information.

Plusieurs techniques ont été utilisées pour rehausser l'information topographique. L'utilisation de l'extension « 3D Analyst » et « Spatial Analyst » de ArcView, le modèle de terrain est artificiellement allumé pour créer une image « shaded relief ». Cet effet de l'éclairage artificiel donne l'apparence de lumière du soleil qui éclaire le modèle, en créant des ombres et des reliefs (**Figure 18**). L'image a été produite par la modification de l'azimut du soleil en mettant en évidence l'élévation et le niveau d'exagération de la nuance (**Figure 19**).



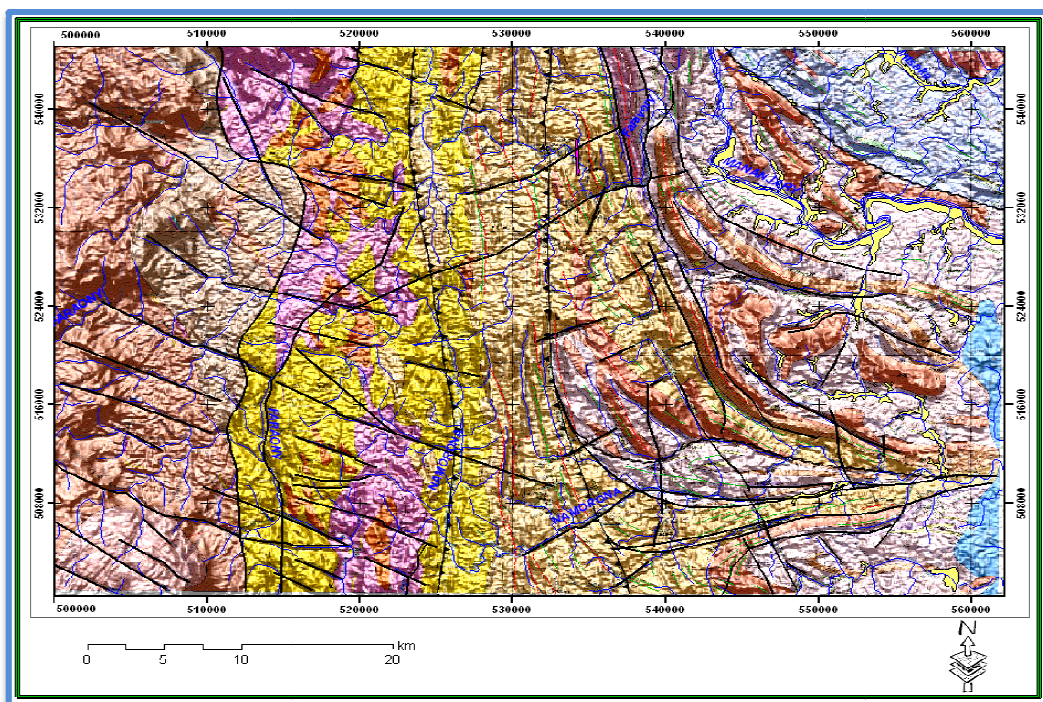
**Figure 19-** Exemple d'une carte d'ombrage.





**Figure 20-** Modèle Numérique du Terrain de la zone d'étude (Dérivée du MNT).

Plusieurs techniques de traitement ont été appliquées aux images SRTM pour rehausser l'aptitude géologique et la disponibilité de l'information géomorphologique à une échelle locale. Pour aller plus loin dans l'interprétation, les cartes géologiques ont été rendues semi transparentes et combinées avec l'image SRTM qui utilisent ArcMap pour produire une image 3-D (Figure 20).



**Figure 21-** MNT avec géologie semi-transparente.

## **PARTIE IV : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE**

## CHAPITRE VII : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude se trouve sur le socle cristallin d'âge précambrien de Madagascar. C'est un ensemble de schistes cristallins de métamorphisme profond (faciès amphibolite et granulite prédominants) où toute approche lithostratigraphique est difficile. Elle divise en quatre grandes parties bien distinctes (voir figure 23 chap IX : métamorphisme) : le Domaine d'Antananarivo, zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana, ceinture d'Anaboriana-Manampotsy et le Domaine de Masora.

### 7.1. Les roches parasédimentaires et métavolcaniques (et les équivalents métamorphiques)

#### 7.1.1. Complexe du Mangoro

##### 7.1.1.1. Groupe de Vondrozo

Le groupe de Vondrozo est composé d'une séquence metasédimentaire (stabilisé dans le faciès amphibolite, caractérisé par des associations minérales à sillimanite). Les roches sont altérées en même temps qu'elles affleurent mal. La lithologie dominante est du gneiss à biotite (pélite riche en aluminium initiale) avec nombreuses petites veines interstratifiées et parallèles de quartz. Il y a aussi des intercalations de quartzite en lentilles et bandes plus continues. Le Quartzite ferrugineux à magnétite est localement développé sur la feuille Q51, ce quartzite ferrugineux pourrait être investi pour leur possible intérêt minier. Les gneiss pélitiques sont localement à graphite. Sur le talus de la route tracée en contrebas de l'escarpement d'Angavo et liant Anjozorobe à Bejofo affleurent de nombreux paragneiss riches en sillimanite. Ces métapélites varient de quelques mètres à quelques centaines de mètres de puissance et elles sont séparées par le massif orthogneissique d'Angavo. Les lentilles ou enclaves de gneiss à biotite et grenat, les quartzites à pyroxènes au sein de ces gneiss tonalitiques du Néoprotérozoïque peuvent être des métasédiments relictuels de Vondrozo.

*Structure:* Les mauvaises conditions d'affleurement empêchent des bonnes mesures et observations tectoniques. Les plis intrafoliaux isoclinaux sont conservés par les quartzites affleurant dans la rivière Mangoro et qui indiquent une histoire tectonique polyphasée.

*Pétrographie:* Les principaux minéraux identifiés des formations géologiques sont quartz, plagioclase, feldspath potassique, biotite, amphibole et plus rarement grenat. Pyroxène n'est observé que dans les plans frustrés de foliation et au sein des petites lentilles de charnockite. Les minéraux isolés de pyrite sont observés parmi les minéraux accessoires. Les poches de magnétite sont communes dans les pegmatites tardives.

## 7.1.2. Complexe du Masora

### 7.1.2.1. Groupe de Vohilava

Ce groupe est lithologiquement varié. Deux familles lithologiques qui diffèrent par la nature de leurs protolithes respectifs sont connues. Une famille est d'origine sédimentaire tandis que l'autre famille est d'origine éruptive. La nature des protolithes est attestée par les variations dans les assemblages minéraux métamorphiques et les structures de déformation observées sur plusieurs roches. Les gneiss quartzo-feldspathiques à biotite sont des paragneiss avec des amas interfoliés de roches mafiques et ultramafiques, micaschistes et quartzites minces. Les schistes à graphite sont rares. Les minéraux de muscovite, épidote, hornblende, graphite, sillimanite, disthène et grenat poecitique sont localement présents dans les gneiss généralement en feuilles et migmatisés à divers degrés. Le plagioclase a une composition avoisinant celle de l'andésine et la microcline est rare (Rantoanina, 1958). Les quartzites sont minces et diffèrent de par les minéraux accessoires. Certains sont dépourvus de minéraux accessoires visibles tandis que d'autres sont à sillimanite ou magnétite ou à assemblage de disthène-sillimanite-muscovite-fuschite (Rantoanina, 1958).

Les unités amphibolitiques sont sombres et de couleur verdâtre et sont communément grenatifères et boudinées. Les amphibolites sont également en dykes. Les minéraux majeurs sont amphibole, plagioclase, quartz et clinopyroxène tandis que les minéraux du talc, de l'épidote, du sphène, de la pyrite et de la zoisite ont observés en accessoires. Les amphibolites sont à grain moyen. Les amas de roches ultramafiques et de serpentines peuvent se trouver le long de petites zones de cisaillement. Les plus grandes lames ultramafiques ont des bordures amphibolitiques. Il y a aussi des bandes moins communes de schistes à trémolite et de rares amas de métagabbro dans les gneiss. De petites pegmatites et des filons d'aplite sont présents dans la plupart des grands affleurements des roches.

Sur le domaine avoisinant la jointure au Sud-Est des feuilles Q52 et R52, le gneiss folié de niveau métamorphique apparemment inférieur inclut des schistes amphibolitiques talqueux et des metabasaltes. Dans la même région, il y a des micaschistes foliés avec quartzites subordonnés, psammites et gneiss quartzo-feldspathiques.

Les roches sont principalement de texture granoblastique bien que les grains de quartz sont localement allongés pour définir une linéation de forte extension. La structure gneissique varie d'une structure planaire matérialisée par la biotite folié à lenticulaire, structure presque râpée définie par les lentilles du quartzo-feldspathique. Cependant, les affleurements révèlent

un niveau de métamorphisme très bas et les roches dans ces régions ont préservé les structures sédimentaires.

Les conditions et la qualité d’affleurement des roches d’un lieu à un autre diffèrent en fonction de l’intensité de l’érosion et le développement des parties épaissies et altérées. Le groupe affleure mal sur les feuilles Q52 et R52 et affleurent mieux dans la région Ambatoharanana sur la feuille R53.

### 7.1.3. Groupe d’Ambatolampy

Le groupe d’Ambatolampy est localisé à l’ouest du Manampotsy et du groupe de Vondrozo, et à l’ouest de la zone de cisaillement d’Angavo-Ifanadiana (**Figure 13.**).

Il comprend une séquence metasédimentaire plissée caractérisée par des micaschistes à sillimanite, graphite  $\pm$  grenat et des paragneiss individualisant du quartzite en abondance.

Néanmoins, les paragneiss à biotite, schisteux et légèrement migmatitiques interfoliés et du quartzite à biotite affleurent bien.

Le groupe d’Ambatolampy affleure exclusivement sur les plateaux disséqués à l’Ouest de la zone de cisaillement d’Angavo-Ifanadiana et la dépression tectonique d’Ankay-Alaotra. Ce terrain est surtout caractérisé par les collines espacées par de grandes vallées qui sont largement utilisées pour la culture du riz. Les affleurements des roches sont très clairsemés et les schistes légèrement latéritisés affleurent rarement exposés sauf le long des tranchées des routes ou des thalwegs enraillant plus profondément.

Les affleurements du groupe d’Ambatolampy sont parfois difficiles à distinguer des paragneiss de Perinet du complexe de Manampotsy qui présentent une association lithologique semblable. Les anciens géologues ont principalement fait cette distinction sur la base de l’intensité de la migmatisation. Cela a mené à différentes interprétations de la nature du groupe d’Ambatolampy.

#### ***Lithologies:***

L’ensemble du groupe est caractérisé par l’abondance des micaschistes qui donnent beaucoup de gneiss et de roches migmatitiques à l’Est. Les schistes sont composés de biotite, sillimanite, grenat  $\pm$  corindon et graphite. Les paragneiss sont riches en biotite, généralement à sillimanite et grenat. Les petits corps mètriques et décamètriques de pyroxénite, d’amphibolite à pyroxène, amphibolite  $\pm$  à grenat, gneiss à pyroxène et garniérite et les

schistes à graphites sont rapportés dans cette unité. Des métacarbonates minces et des unités de calc-silicate sont intercalés dans les micaschistes et sont généralement associées aux zones graphitiques et aux skarns.

Il y a en général une alternance à l'échelle de plusieurs mètres des schistes et des quartzites. Les micaschistes sont localement migmatisés à divers degrés et peuvent renfermer des passages quartzo-feldspathiques, des pegmatites à veine de quartz à tourmaline (par exemple Belanitra-Miarinavaratra). Les schistes à biotite sont prédominants et ils passent localement en de véritables biotitites. Les affleurements sont altérés et reconnaissables par leur couleur marron ou rouge brune. Les schistes à biotite sont en général à sillimanite qui se localise en des passées fibreuses dans le plan de la schistosité. Les grenats du groupe almandin-pyrope peuvent atteindre jusqu'à 1cm de diamètre (flanc Nord de Bevahona). Les corindons roses ou pourpres peuvent être présents dans les prismes hexagonaux centimétriques. Le disthène est rare.

Les schistes pélitiques alternent tout en évoluant progressivement vers des paragneiss schisteux faiblement pélitiques qui sont pratiquement indiscernables au niveau des affleurements très altérés. Ces différentes couleurs du rubanement des gneiss à biotite  $\pm$  muscovite contiennent parfois de la sillimanite avec ou sans grenat. Ils passent localement à un faciès sporadiquement à l'œil de microcline ou de feldspath potassique.

### ***Géochronologie :***

L'âge de dépôt du groupe d'Ambatolampy déterminé par la méthode U-Pb sur les zircons détritiques est inférieur ou égal à 1056 Ma. Les âges détritiques qui vont de 2740 à 1056 Ma consistent avec la dérivation du sous-sol d'Antananarivo.

#### **7.1.4. Complexe de Manampotsy**

##### **7.1.4.1. Formation d'Andasibe**

Le paragneiss d'Andasibe correspond largement au " Manampotsy supérieur" (Rantoanina 1959).

Cette unité comprend une large variété de roches finement à moyennement grenues. Ce sont des métasédiments équigranulaires dont les gneiss à biotite avec ou sans lit d'hornblende, débitent en lames, les gneiss migmatitiques à quartz et feldspath, les gneiss à sillimanite, les gneiss à grenat, les gneiss ou schistes à graphite, les quartzites, les gneiss psammitiques à

grenat, les couches minces de gneiss calcaireux, les gneiss à muscovite et les marbres. Les intrusions mineures incluent les veines de quartz, les pegmatites et les granites mis en place principalement postérieurement aux structures métamorphiques de leurs encaissantes. Il peut y avoir aussi des niveaux d'orthogneiss composés de gneiss et de granite à porphyres de feldspath. La déformation des lentilles des ultramafites au niveau des plus grands affleurements des gneiss est antérieure aux structures métamorphiques.

Dans les zones centrales des domaines d'affleurement du paragneiss d'Andasibe affleurent de nombreuses lentilles des roches à graphite dont les teneurs varient de 5 à 15% (localement plus de 50%). Une centaine de carrières de graphite sont ouvertes dans les gneiss d'Andasibe de 1904 à 2009, la production du graphite était 16000 tonnes par année. Le graphite est un des minerais industriels traditionnels de Madagascar. Les gneiss à graphite sont associés aux quartzites à grain fin, quartzite à graphite, et gneiss et sillimanite. Les minéraux de grenat rouge (commun aux joints de quartz des roches) aussi bien qu'aux gneiss à biotite et à sillimanite soulignent les fins rubanements des gneiss. Les quartzites à sillimanite et à biotite sont communs contrairement aux quartzites à grenat et biotite ou à muscovite. Quelques quartzites contiennent de grosses paillettes de muscovite.

#### 7.1.4.2. Groupe d'Ampasary

Le groupe de l'Ampasary est une division du Complexe du Manampotsy et est parfois appelé "la série de l'Ampasary" ainsi nommée du fait que la rivière Ampasary, un affluent majeur de la rivière Mananjary et célèbre pour ses placers de l'or le traverse. Le terme "la série d'Ampasary" a été utilisé en premier par Boulanger (1952) sur la feuille au 1/200000 d'Ampasinambo qui la décrit comme une zone des amphibolites feldspathiques, amphibolites à diopside et anthophyllites dans les migmatites à biotite et les gneiss à biotite et hornblende avec unités d'amphibolite et quartzite du groupe d'Ifanadiana.

Rantoanina (1958) lors des levers des feuilles QR53 a décrit la "série de l'Ampasary" comme étant à l'abondance des gneiss migmatitiques à biotite ou amphibole et/ou grenat avec des intercalations de quartzite, amphibolite à sillimanite et graphite. La "Série de l'Ampasary" occupe toute la zone comprise entre la Série de Vohilava (Domaine de Masora), et le groupe de Vondrozo à l'Ouest.

Chantraine (1986) dans son étude du Sud-Est central le Madagascar a divisé le groupe de l'Ampasary en deux faciès qui sont:



- Le faciès Calco-magnésien du gneiss feldspath à hornblende, des pyroxénites à amphibole et des couches de scapolite et quartzite. Le grenat et des minéraux de fer (magnétite, grunerite, diallage) y sont omniprésents. Ce faciès devient de plus en plus migmatitique vers l'Ouest.
- Le faciès alumino-silicaté avec des micaschistes et d'une manière secondaire des paragneiss micacés à sillimanite, grenat et graphite ou à sillimanite et des lentilles ultrabasique. Ce faciès est partout migmatitique.

Actuellement, le faciès calco-magnésien est dénommé Groupe de l'Ampasary tandis que le faciès alumino-silicaté à graphite est rattaché au paragneiss d'Andasibe. Les deux faciès sont tectoniquement intercalés. Les paragneiss de Sakanila sont également intercalés dans le Complexe de Manampotsy. Structuralement, les paragneiss d'Andasibe sont considéré comme faisant partie du faciès calco-magnésien et auraient les mêmes caractéristiques lithologiques que le groupe de l'Ampasary. Le groupe de l'Ampasary et les paragneiss de Sakanila ont une expression semblable sur les cartes numériques gamma-spectrométriques composites.

Le groupe de l'Ampasary se distingue des autres unités du Complexe de Manampotsy par sa position structurale tectoniquement encadrée par le domaine de Masora, l'abondance relative des roches ultramafique, et la présence de matière dérivée du domaine de Masora comme tranches tectoniques, enclaves.

Le groupe de l'Ampasary, par conséquent, est redéfini comme étant une association migmatisée à diverses intensités des paragneiss à biotite et des migmatites à biotite, et à hornblende à intercalations mafiques de gneiss à hornblende, amphibolite, quartzite, schistes pélitiques et des lentilles de roches mafiques ultramafiques. Les minéraux caractéristiques sont biotite, hornblende, grenat, clinopyroxène, anthophyllite, trémolite, sillimanite, muscovite et épidote (Rantoanina, 1958). Les roches ultramafiques sont présentes en lentilles d'harzburgite, des amas de schiste ultramafique riche en pyroxène avec une abondance de talc et/ou trémolite. Le Groupe de l'Ampasary est encaissé dans les granitoïdes du Néoprotérozoïque et par les granitoïdes de la suite d'Imorona-Itsindro, Kiangara, Ambalavao et la suite de Maevarano (~800-510Ma).

Dans les parties les plus au Sud et au Nord du Domaine de Masora où des inflexions Est-Ouest du Complexe de Manampotsy sont observées le groupe de l'Ampasary, les paragneisses d'Andasibe et de Sakanila s'imbriquent entre eux.



Dans le nord de la feuille Q53 qui jouxte le Domaine de Masora, les paragneisses sont plus mafiques et les quartzites sont moins présents tandis que l'amphibolite est plus commune ainsi que les schistes talqueux à trémolite. Les gneiss sont à biotite, hornblende ou grenat. Leur composition minérale inclut le quartz et le plagioclase (andésine-labradorite), biotite  $\pm$  hornblende (vert ou brun),  $\pm$ clinopyroxène,  $\pm$ grenat,  $\pm$ titanite et épidote. Le grenat est localement abondant et quelques roches sont décrites comme étant des grenatites (Rantoanina, 1958). Quelques faciès migmatisés sont à sphène et grenat tandis que d'autres unités à sillimanite et graphite sont observées dans la moitié Ouest de la feuille Q53. Les faciès à sillimanite sont localisés au Sud et à l'Ouest de Kianjavato. Les grenatites associés à l'amphibolite feldspathique sont associés aux récifs au NW de la feuille (Rantoanina,)

Le groupe de l'Ampasary indique un âge maximal de dépôt pour la succession à ~780 Ma (auteur, date). Le zircon détritique et le zircon des enclaves prélevés d'un affleurement de gabbro indique une prévalence d'une origine détritique entre 3.3 et 2.4 Ma avec des expressions mineures des modes au Méso et Néoprotérozoïque.

#### 7.1.5. Groupe de Mananjary

Les roches volcaniques du groupe de Sambava sont similaire à celles de Mananjary et consistent en une séquence de roches volcaniques bimodales mafique et felsique, aussi bien qu'une moindre quantité de roches sédimentaires. Dans la séquence volcanique, les roches mafiques (basalte) dominent généralement par rapport aux roches felsiques (dacite-rhyolite). Les unités felsiques forment de grands massifs, peut-être en rais de la forte viscosité des magmas.

En général les basaltes sont de nature tholeiitique suivant l'ordre décroissant de l'abondance des faciès, ce sont des tholeiites communs, tholeiite à olivine et andésite basaltique. La grande majorité des basaltes est à grain peu apparent et aphanéritique à phénocristaux de plagioclase, pyroxène, et olivine rare. Les pluparts des basaltes sont interprétés comme provenant des éruptions fissurales et gisent à des dizaines de mètre.

Les roches volcaniques felsiques sont métalumineuses et ont des compositions intermédiaires entre la dacite et la rhyolite. Elles sont des roches grises, denses avec d'abondants phénocristaux de feldspath et des quartz vitreux. Au microscope, les phénocristaux sont andésine/oligoclase et pyroxène (augite) dans une matrice oligoclase, avec ou sans quartz, apatite et magnétite (Brenon, 1957). Les roches felsiques forment des massifs, de dizaine de mètres de puissance dans lequel le dacite figure imperceptiblement dans la rhyolite. Les unités

plus puissantes ont des porphyres de feldspath qui s'altèrent facilement. Des enclaves de roches felsiques sont observées dans des roches volcaniques (à préciser) riches en magnétite. Au sein du massif de Sakanila, les unités volcaniques inférieures sont des brèches emballant des fragments (aplite et granite) et ayant été cimenté par de la calcite secondaire.

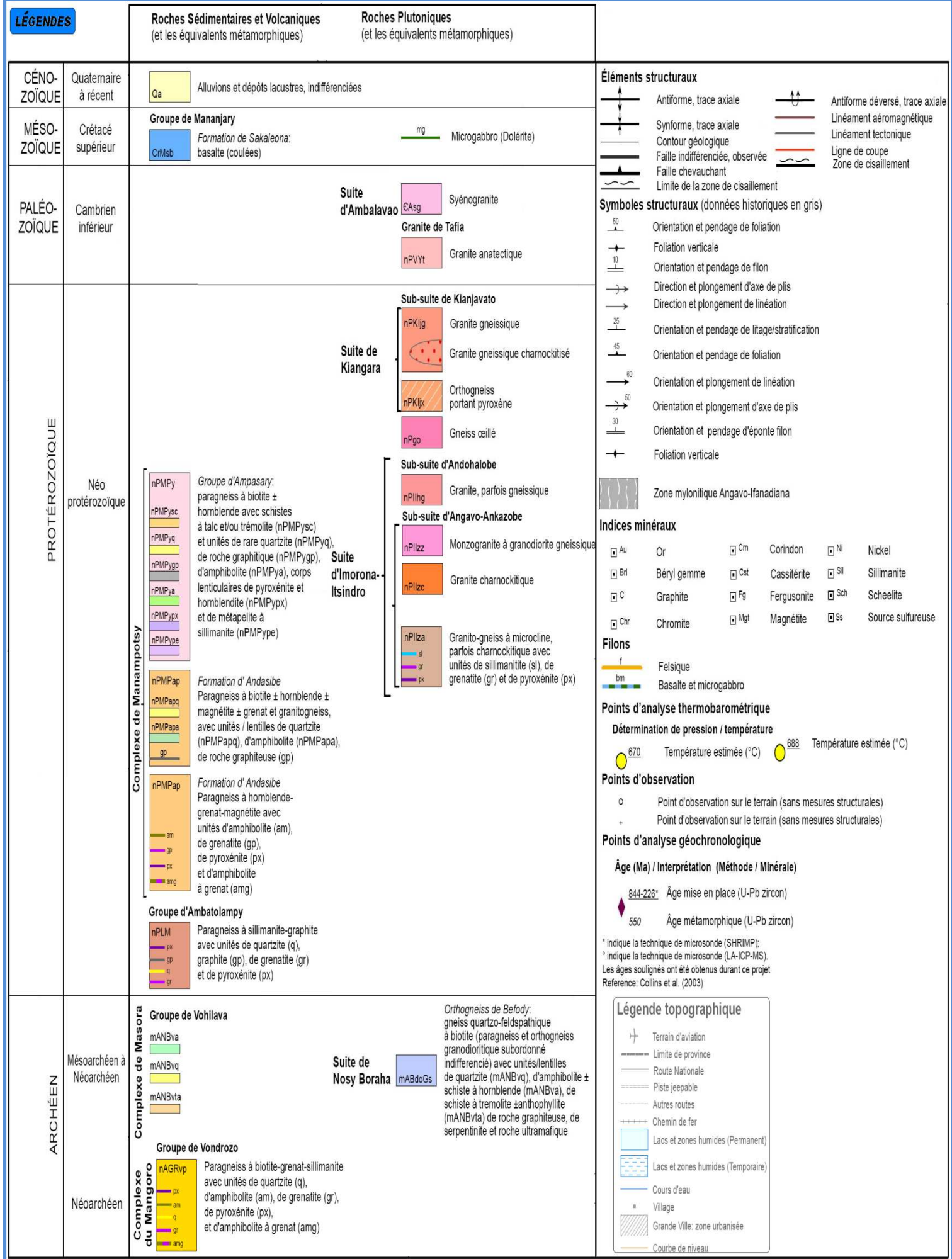
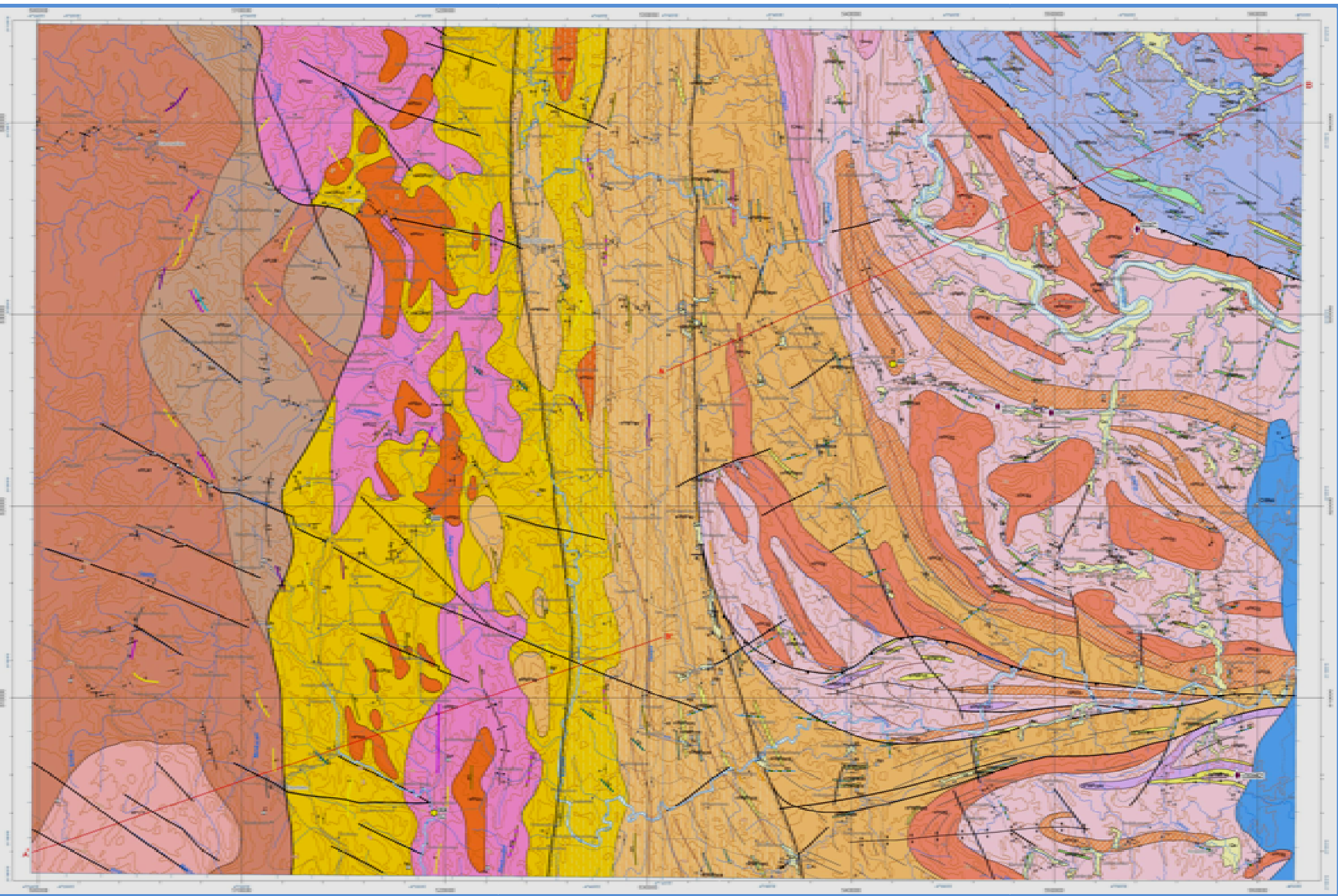


Figure 22 - Légende géologique de la zone d'étude



**Figure 23-** Géologie de la zone d'étude

## 7.2. Les roches plutoniques (et les équivalents métamorphiques)

### 7.2.1. Suite d'Imorona-Itsindro

#### 7.2.1.1. Subsuite d'Angavo-Ankazobe

Cette subsuite de granitoïdes et de granite migmatitique est localisée dans la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana et dans les pays montagneux à l'Ouest vers Ankazobe. Elle inclut également à granitoïdes, des gneiss à œil de feldspath potassique et du gneiss nebulitique à biotite ou à hornblende ainsi que des lentilles de charnockite.

#### ***L'orthogneiss d'Angavo***

L'orthogneiss d'Angavo s'allonge vers le Nord en ceinture large de 10-15 km sur la feuille P53. Les granitoïdes à gros grain ou les syenogranites ont localement associés au charnockite. Quelques-unes de ces roches paraissent transformées quoique des minéraux de clinopyroxène relique. Les composants moins communs sont la monzogranite, le granodiorite et le gabbro qui passent vers une orthoamphibolite (800-780Ma).

Le granite à microcline contient des schlieren de sillimanite-grenat-pyroxène. Le gneiss oeilé est à porphyroblastes de feldspath potassique qui seraient probablement des phénocristaux magmatiques déformés et recristallisés.

Le gneiss granodioritique gris est à quartz, plagioclase et feldspath potassique et à une texture perthitique avec quelques minéraux de la microcline secondaire. Les minéraux de biotite, amphibole, grenat (rares) et des minéraux opaques sont également présents.

### 7.2.2. Suite de Kiangara

#### 7.2.2.1. Subsuite de Kianjavato

La subsuite de Kianjavato est constituée des métatonalites des granitoïdes. Les gneiss migmatitiques à pyroxène et hornblende occupent généralement les régions en altitude (environnant Vatovavy et Siranana). Ils incluent plusieurs zones à épidote, sphène, calcite et wernérite (Rantoanina, 1958). La subsuite inclut des granites lités à amphibole et biotite et des granitoïdes à clinopyroxène qui passent en une tonalite.

Le granite en bordure du Domaine de Masora est le faciès communs des granites lités à gros grain à amphibole et biotite dans une moule en relief de quartzo-feldspathique. De la pegmatite à phénocristaux de feldspath alcalin est localement observée. Elle est parfois déformée. L'âge de  $631 \pm$  Ma du granite a été déterminé par la méthode U/Pb à partir d'un échantillon de monzogranite.

### 7.2.3. Suite d'Ambalavao

Cette suite contient d'une manière prédominante un grand complexe de granitoïde plutonique ainsi que quelques plus petits corps granitiques indifférenciés. Plusieurs corps des porphyres de feldspath potassique et quelques-uns sont gneissiques ou pegmatitiques. La nature des composantes pétrographiques de la suite est extrêmement variée : composition syénitique, granodioritique, anorthositique à gabbroïque avec quelque orthopyroxénite. La charnockisation locale est aussi observée.

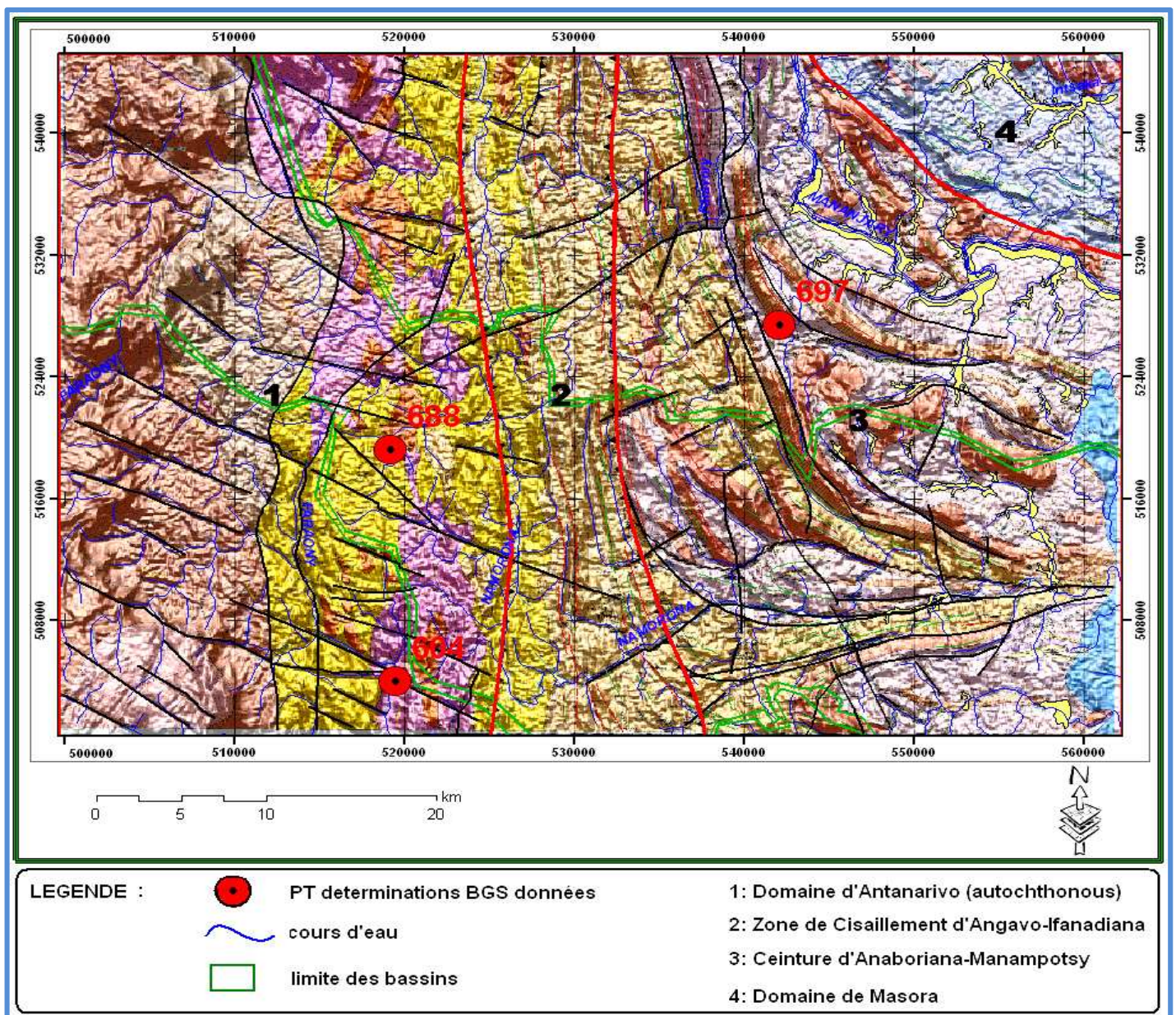
Les roches magmatiques de la suite Ambalavao ont un âge de 570 à 520 Ma (Paquette et al., 1998, Kroner et al., 1999, 2000 et Tucker et al., 1999, Meert et al., 2001).



## CHAPITRE VIII : METAMORPHISME

Les connaissances sur le métamorphisme ont été obtenues des analyses pétrographiques d'abord pour la définition des assemblages minéraux en vue de conclure sur les niveaux du métamorphisme des roches et ensuite pour identifier les divers événements et ce, sur la base des textures.

Les études pétrographiques standards ont également permis de déterminations thermobarométriques. Les calculs de la température et de la pression sont basés sur la composition de cristaux adjacents pour dégager leur caractère à l'équilibre.



**Figure 24-** localisations des échantillons avec estimation des PT.

Les températures ont été calculées au moyen des géothermomètres grenat-biotite (Gt-Bi) ou hornblende-plagioclase (Hbl-Plag). Les pressions ont été estimées en grande partie par des géobaromètres grenat alumineux-Plagioclase (GASP) ou grenat-hornblende (Gt-Hbl). La pression relative de formations géologiques a été calculée au moyen du géobaromètre grenat-biotite-plagioclase-muscovite (GBPMQ). La localisation des échantillons qui ont été utilisés pour les calculs des valeurs de P et T sont donnés par la **figure 23** tandis que les résultats sont donnés par le **Tableau 6**.

Sample_No	Zone	Sheet	x	y	Minerals-T	T	Minerals_P	P	Rock_Name
BDW-143	B	P53	519453	504020	Gt-Bt	604	GBMPQ	8.3	Garnet-biotite gneiss
BDW-152	B	P53	519139	519236	Gt-Bt	688	Nd	nd	Charnockitic orthopyroxène-bearing, biotite-clinopyroxène-amphibole gneiss
RS266	B	Q53	542051	527406	Hb-Pl	670	Nd	nd	Biotite-amphibole microgranite

**Tableau 6** - Résumé de la détermination de la pression et température.

### 8.1. Métamorphisme rétrograde

Les roches de la région ne témoignent pas trop d'un événement métamorphisme rétrograde et ce contrairement à d'autres régions de la côte Est : Domaine d'Antongil, Domaine de Masora, Domaine de Bemarivo et Complexe de Manampotsy. Le faciès schiste vert est souvent juxtaposé aux faciès antérieurs du métamorphisme. Ce faciès a repris toutes les formations géologiques et ce, quelque soit leurs âges. Le faciès schiste vert exprimé par la sericitisation et saussuritisation des feldspaths, la chloritisation des minéraux mafiques, la formation de l'épidote et une faible silicification.

### 8.2. Résumé du métamorphisme.

Les principaux traits métamorphiques de chacun des domaines et groupes font ressortir les différences entre les groupes. La plupart des groupes montrent le métamorphisme des faciès



de l'amphibolite et dans la plupart des cas l'analyse texturale montre que les premiers événements métamorphiques et structuraux ont été largement repris par un événement tardif qui a stabilisé la sillimanite dans les roches pélitiques. Cela implique que la plupart de la mise en place des formations géologiques est associée à l'événement Panafricain qui aurait oblitéré les structures antérieures et seulement des reliques rares de premiers événements sont enregistrées.

Le Domaine de Masora est à des températures de 650-700°C et à des pressions de 6-7 kbar. A l'Ouest du Domaine d'Antananarivo, les températures sont de 650-750°C tandis que les pressions sont relativement basses et à 4-6 kbar. Le Complexe de Mangoro montre des températures semblables et des pressions de 5.5-6 kbar vers le Sud tandis que vers le Nord les pressions augmentent et sont à 7-8 kbar. Le Complexe de Manampotsy dans sa partie Ouest sont à des températures semblables à celles des formations du Mangoro avec 700-750°C et à des pressions de 7.5-10 kbar tandis que à l'Est les températures sont légèrement en baisses (600-650°C) tandis que les pressions sont plus élevées et à 10-12 kb.

## **PARTIE V : INTERPRETATION DES DIFFERENTES CARTES**

## CHAPITRE IX : INTERPRETATION DES CARTES ET RESULTATS

### 9.1. Les modèles métallogéniques

#### 9.1.1. L'affiliation au magmatisme ultrabasique

Les éléments chimiques Ag, Au, Cu, Cr, Fe, Ni, Pt, Re, Te sont réputés être affiliés au magmatisme ultrabasique (**Figure 25**). On les représente par différentes couleurs. On trouve sur la carte une forte intensité de cette AUB sur la partie à l'Est de la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana qui suit la zone oblique.

L'objectif est de dégager la relation entre la lithologie en amont et les résultats géochimiques en aval. Sur la carte, on distingue bien les bassins de Mananjary, Namorona et Faraony (Voir section Hydrographie). On trouve les anomalies en Ag, Cr, Cu, Fe, Ni, Au, Pt et Te dans le bassin de Mananjary. Les lithologies qui seraient à l'origine de ces anomalies sont probablement les formations du Complexe de Manampotsy (Groupe d'Ampasary et formation d'Andasibe), suite d'Imorona Itsindro (subsuite d'Angavo-Ankazobe), groupe de Vohilava, Groupe de Vondrozo, Suite d'Ambalavao et suite de Kiangara (subsuite de Kianjavato).

**Lithologie :** L'Or est un élément rare dans la croûte terrestre (clarke : 0.05g/t ou 50 ppb). Cependant, il est largement répandu à la surface de la Terre. On le rencontre dans les veines de quartz (lentilles de quartz nPMPapq, mANBvq et q), et à l'état natif ou combiné dans les sédiments alluvionnaires secondaires (Qa). Il est presque toujours associé à l'Argent dans des proportions variables. On trouve l'Or sous forme combinée avec le tellure : calavérite ( $\text{AuTe}_2$ ) et sylvanite ( $\text{AgAuTe}_4$ ).

Le platine se combine de manière complexe avec divers éléments chimiques dont le palladium, le cuivre, le nickel et le fer. Dans la région, le platine aurait pu être libéré de l'amphibolite (nPMPya, nPMPapa, mANBva et am), des corps lenticulaires de pyroxénite d'hornblendite (nPMPypx, px) si les indices sont localisés sur le Complexe de Manampotsy, sur les formations de la Nosy Boraha : schiste à tremolite  $\pm$  anthophyllite (mANBvta) de roche graphiteuse, de serpentine et roche ultramafique.

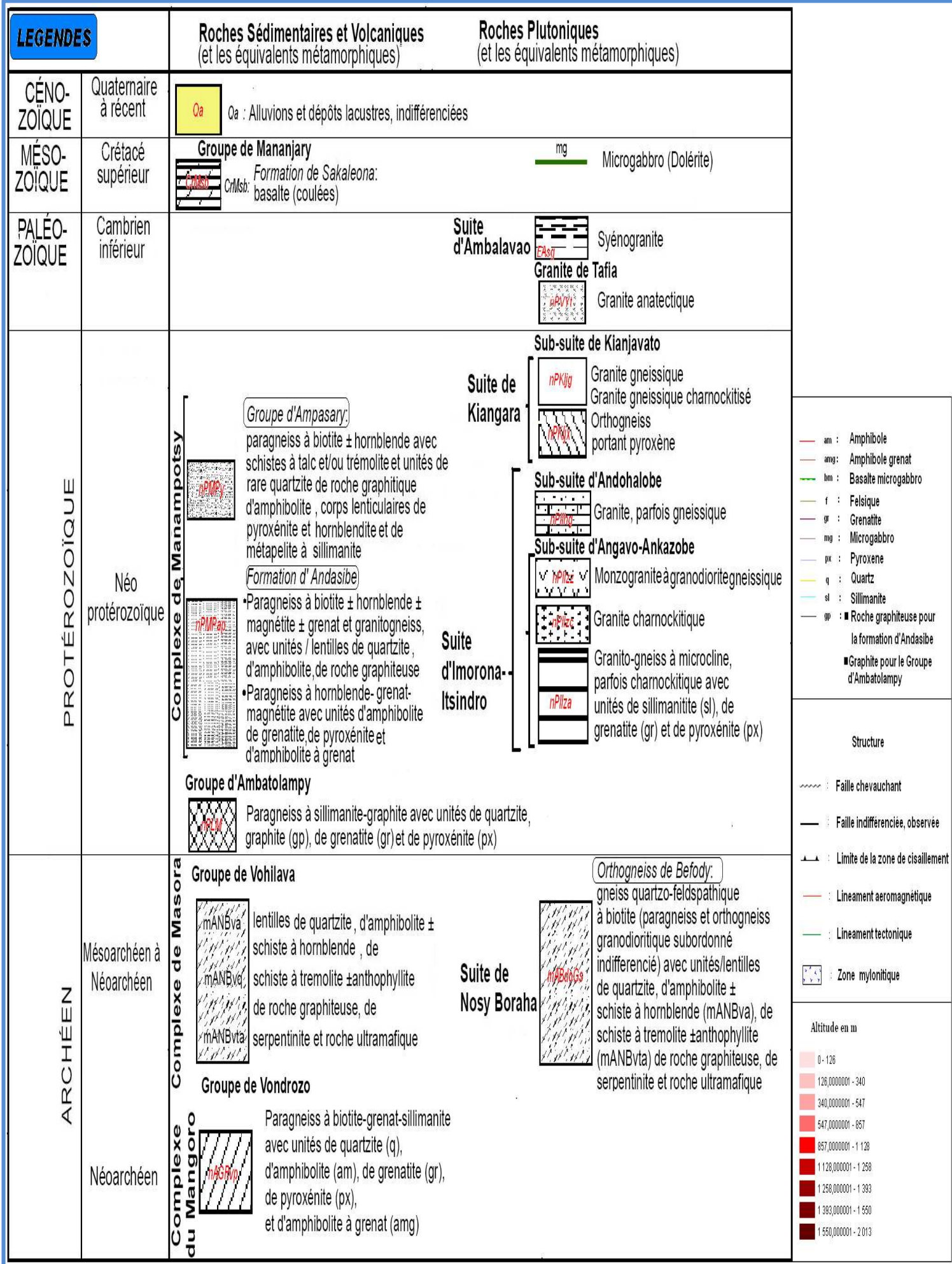
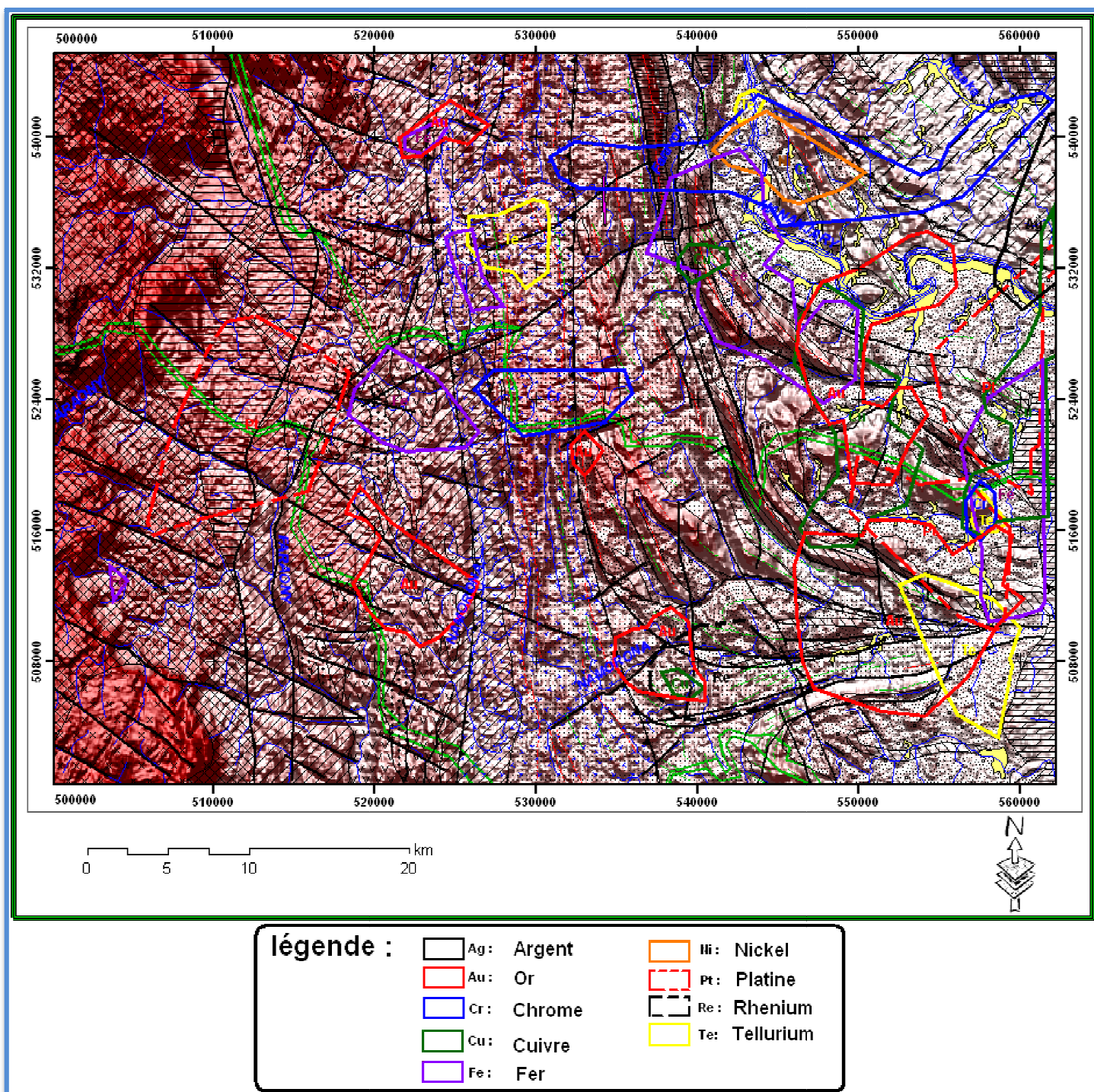


Figure 25 - Légende des cartes des modèles métallogéniques.



**Figure 26-** Affiliation au magmatisme ultrabasique sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

Le Chrome se trouve dans les roches basiques ultrabasiques (le basalte et le microgabbro).

Le bassin de Faraony ne recèle pas beaucoup d'indice contrairement au bassin de Namorona où les indices alluviaux de l'Or, Cuivre et Rhénium sont disposés conformément à une structure oblique ; les conditions lithologiques étant les mêmes. L'affiliation de Platine et de Fer à l'Ouest de la Zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana qui est coupée par une faille de direction NW-SE.



Quelques anomalies en Fe, Te et Cr sont spatialement associées à la zone de cisaillement d’Ifanadiana.

Sur le plan tectonique les anomalies recoupent des failles. On relève des exceptionnelles concentrations des minéralisations liées aux structures cassantes qui elles-mêmes ont sécantes aux axes antiformes et synformes.

Dans toute la partie Est et Nord-Est de la zone d’étude, il y a une forte intensité de minéralisations affiliées au magmatisme ultrabasique.

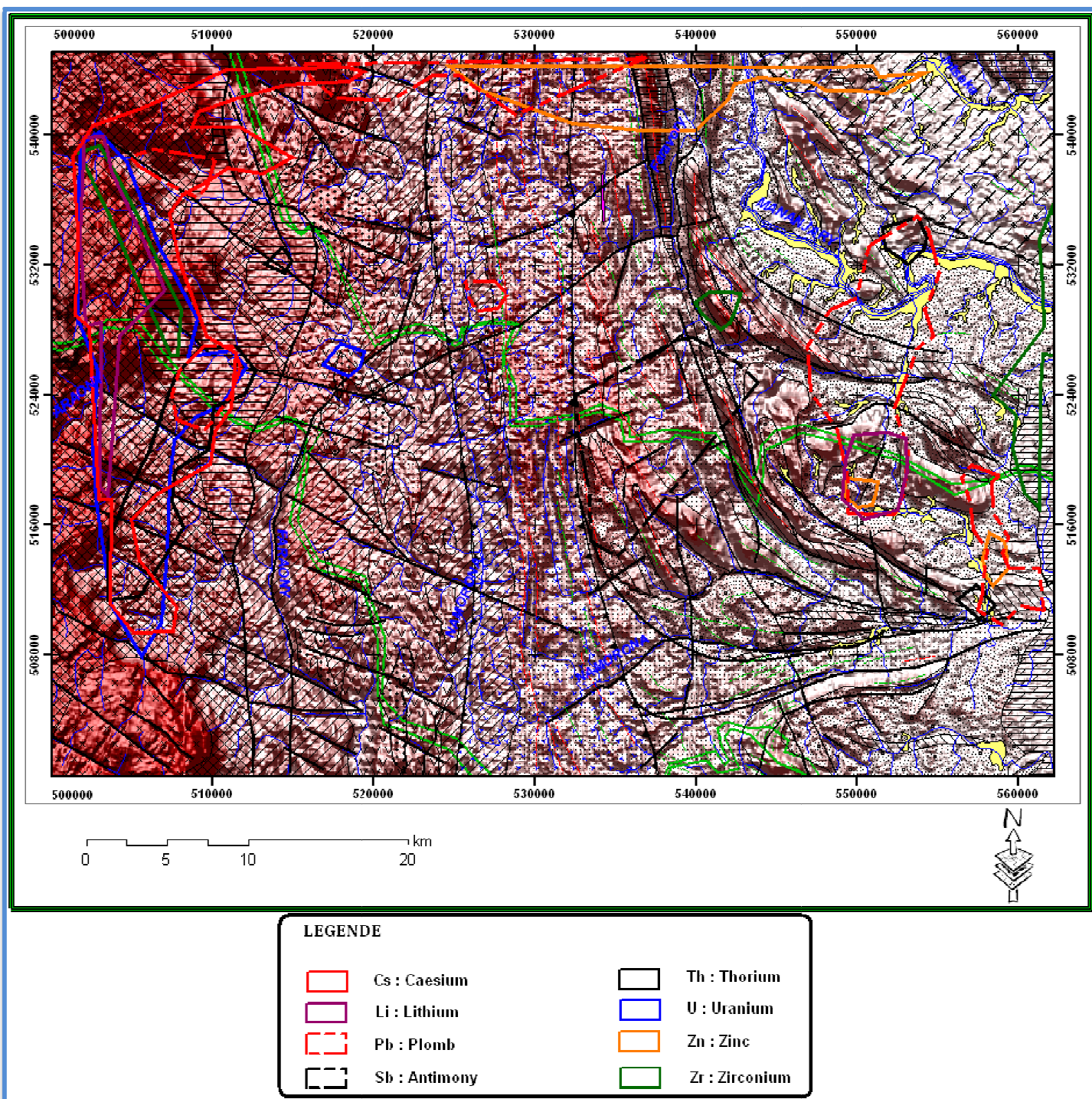
***NB : Sur les cartes qui suivent, les légendes géologiques, tectoniques, altimétriques sont les mêmes que pour la carte d’affiliation au magmatisme ultrabasique ci-dessus.***

#### 9.1.2. L’affiliation Non Rigoureuse

Les anomalies en Cs, Li, Pb, U, Th, Zr) sont localisées dans la partie Ouest de la zone d’étude (**Figure 26**). Elles se trouvent en aval des formations du groupe d’Ambatolampy (nPLM) et de la subsuite d’Angavo-Ankazobe (nPIIza) dans les Bassins versants de Namorona et Faraony. Lithologiquement, le groupe d’Ambatolampy est formé de paragneiss à sillimanite-graphite à niveau secondaires intercalés de quartzites (q), faciès à graphite (gp), de grenatite (gr) et de pyroxénite (px). La subsuite d’Angavo-Ankazobe est essentiellement constitué de granito-gneiss à microcline parfois charnockitique avec unités secondaires intercalées de sillimanite (sl), de grenatite (gr) et de pyroxénite (px). La plus part des anomalies sont traversées par des failles de direction NW-SE.

Dans la partie orientale de la zone de cisaillement. Les anomalies en Th, Li, Pb, Zn sont localisées. Des failles en disposition antithétique à la zone de cisaillement sont notées dans les environs de Kianjavato. Une anomalie en zirconium est répertoriée plus à l’Est de la zone d’étude dans le groupe d’Ampasary, subsuite de Kianjavato (nPKIjx) qui sont respectivement à paragneiss à biotite ± hornblende avec intercalations de schistes à talc et/ou trémolite (nPMPyse) et des unités rares de quartzite (nPMPyq), de roche graphitique (nPMPygp), d’amphibole (nPMPya), de corps lenticulaires de pyroxénite et d’hornblendite (nPMPypx), de métapelite à sillimanite (nPMPyse) et d’orthogneiss à pyroxène.

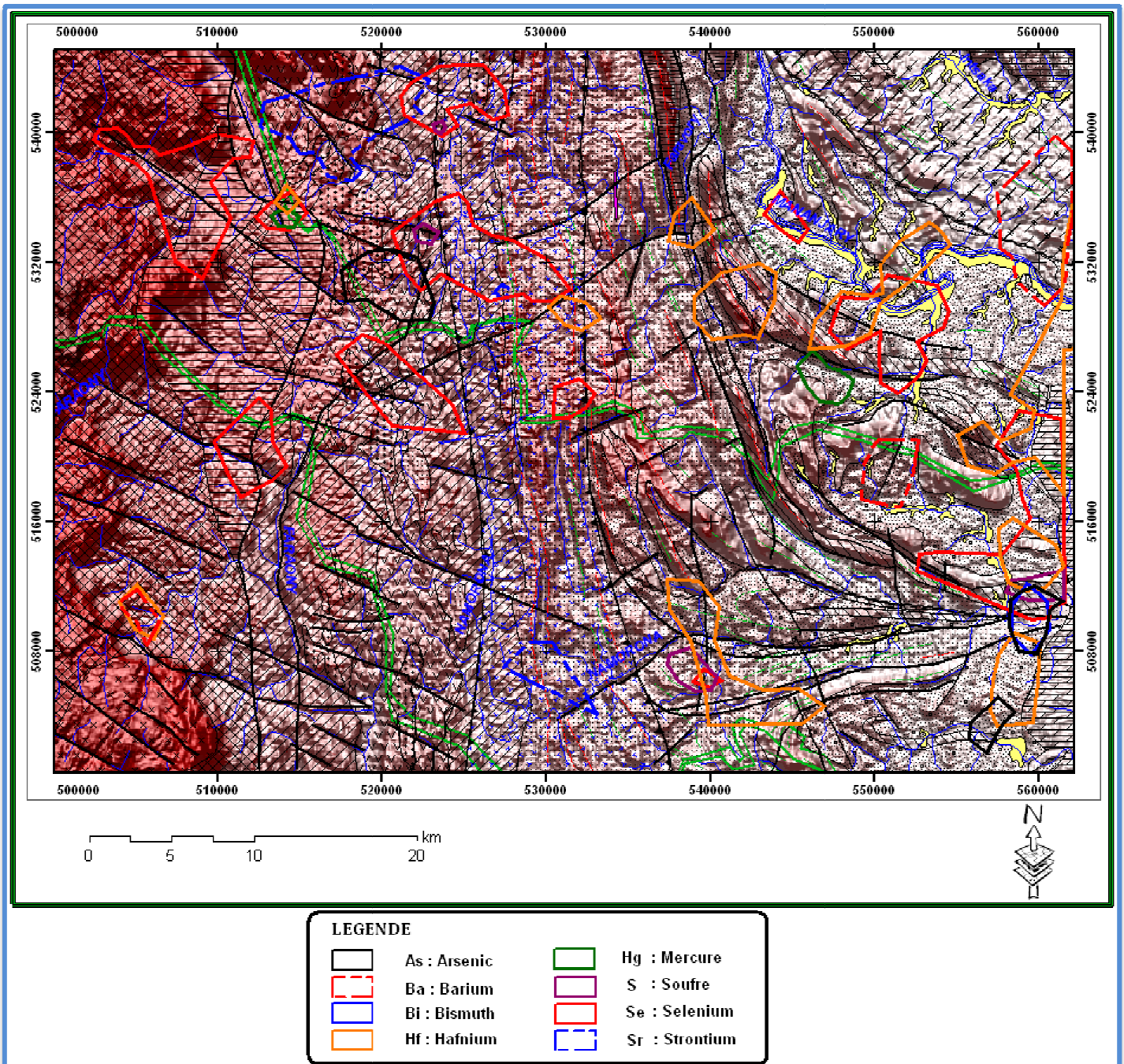
Une petite zone à Pb, Zn, Th est répertoriée sur la pointe de la zone de queue de la virgation. Quoique les sources des minéralisations seraient très probablement différentes, des anomalies en Th, Li, Pb et Zn sont supportées par la même lithologie que les anomalies à Pb, Zn et Th.



**Figure 27-** Les éléments chimiques de filiation non rigoureuse sur fonds de l'altimétrie et de la géologie transparente.

La partie Nord-Ouest de la zone de cisaillement recèle des indications de minéralisation en affiliation non rigoureuse que l'on retrouve également dans la partie orientale de la zone de cisaillement.

### 9.1.3. Complexants et indicateurs de la température.



**Figure 28-** Coordinnants et complexants sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

La première observation des distributions des anomalies montre que l'essentiel est localisé dans la partie Orientale, Nord-Ouest de la zone d'étude; très peu d'anomalies ayant été répertoriées sur la zone mylonitique (**Figure 27**)

Dans la partie orientale de la zone d'étude, on note une présence significative de As, Hf, Bi, Se, Ba, S qui est spatialement associée à d'importantes minéralisation. La présence de ces complexants est notée aux limites Est de la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana. Sur le plan de la tectonique, ces anomalies convergent vers la pointe de la zone de queue de la virgation qui est traversée par des failles. Les anomalies sur la foliation et la virgation de



Kianjavato précisent une zone à forte concentration de complexants sur la partie Nord (groupe de Vohilava, Suite de Nosy Boraha) et dans la zone mylonitique de la zone d'étude. On peut dire que la source des minéralisations couvre toute la partie orientale et la zone de cisaillement c'est à dire le groupe d'Ampasary : amphibole, corps lenticulaires de pyroxénites et de hornblendites ; la formation d'Andasibe (Complexe de Manampotsy) : paragneiss à hornblende-grenat-magnétite avec unité d'amphibole, de grenatite, de pyroxénite, d'amphibolite à grenat, subsuite d'Andohalobe (nPIIhg : granite parfois gneissique) ; Subsuite de Kianjavato : nPKLjg (granite gneissique), nPKLjg (orthogneiss portant pyroxène) ; suite d'Ambalavao (syénogranite) ; suite de Nosy Boraha (orthogneiss de Befody, mANBva : amphibolite ± schiste à hornblende, mANBvq : unités/lentilles de quartz, mANBvta : schiste à trémolite ± anthophyllite.

Dans la partie Nord-Ouest, des anomalies géochimiques en As, Se, Sr, Hg, S, Hf et Ba sont retrouvées associées aux failles. Elles proviennent probablement du groupe d'Ambatolampy (unité de quartzite (q), de pyroxénite (px)), subsuite d'Angavo-Ankazobe (nPIIza, nPIIzc, nPIIzz), groupe de Vondrozo (nAGRvp).

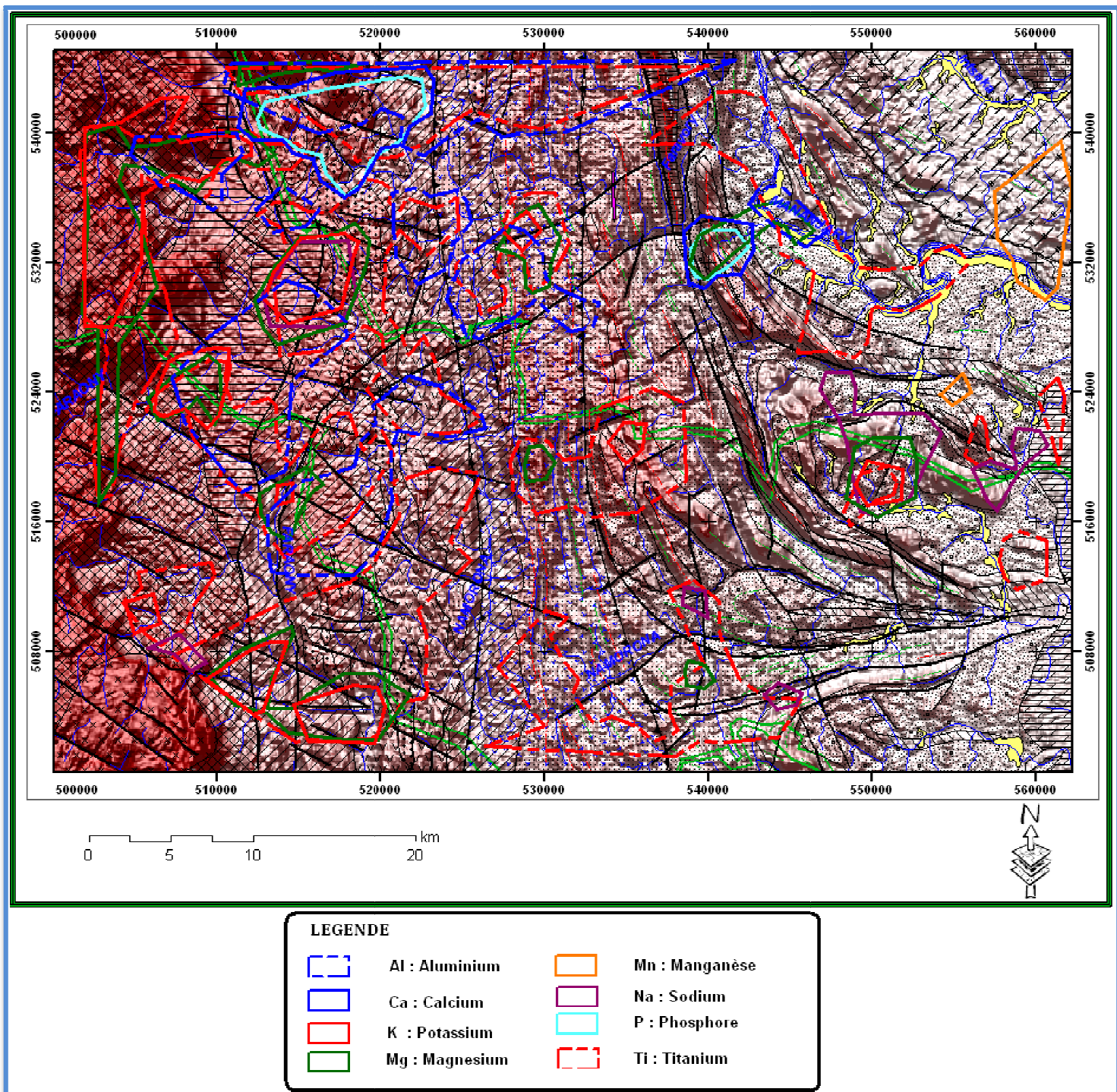
Dans la zone mylonitique, on ne trouve que le Sr, Se, Hf qui confirme l'importance des complexants dans la zone d'étude.

#### 9.1.4. Eléments Majeurs, Mineurs

Les EMm considérés sont Al, Ca, K, Mg, Mn, Na, P et Ti. Quoiqu'ils sont retrouvés partout sur la zone d'étude (**Figure 28**), on peut identifier 3 parties:

Un chapelet d'anomalie géochimique sur toute la partie occidentale de la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana. On y trouve toutes les anomalies identifiées sauf en Mn. Une petite expression d'Al, Mg, Ti, K se trouve sur la partie plus à l'Ouest. Toutes ces anomalies sont traversées par des failles.

Sur la zone mylonitique, un secteur à anomalies d'Al, Ti, K et Mg (**Figure 28**). Ces anomalies géochimiques proviennent probablement du groupe de Vondrozo et des formations d'Andasibe. Lithologiquement, le groupe de Vondrozo comprend les paragneiss à biotite-grenat-sillimanite avec des unités de quartzite (q), d'amphibole (am), de grenatite (gr), de pyroxène (px) et d'amphibole à grenat (amg). Les formations d'Andasibe sont à paragneiss à hornblende-grenat-magnétite avec unités d'amphibole (am), de grenatite (gp), de pyroxène (px) et d'amphibolite à grenat (amg).



**Figure 29-** Eléments majeurs et mineurs sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

Dans la partie Est de la zone d'étude, un chapelet d'anomalies suit la zone de virgation de Kianjavato qui se trouve au Nord-Est de la ZC d'Angavo-Ifanadiana. La lithologie en amont de cette zone (à l'Est de ZC) proviennent de la formation d'Andasibe (paragneiss à hornblende-grenat-magnétite avec unité d'amphibole, de grenatite, de pyroxénite, d'amphibolite à grenat), du groupe de Vondrozo (paragneiss à biotite-grenat-sillimanite avec unité de quartzite, d'amphibolite, de grenatite, de pyroxénite et d'amphibolite à grenat) et de la suite d'Imorona-Itsindro (monzogranite à granodiorite gneissique, granite charnockitique).

#### 9.1.5. Eléments Rares

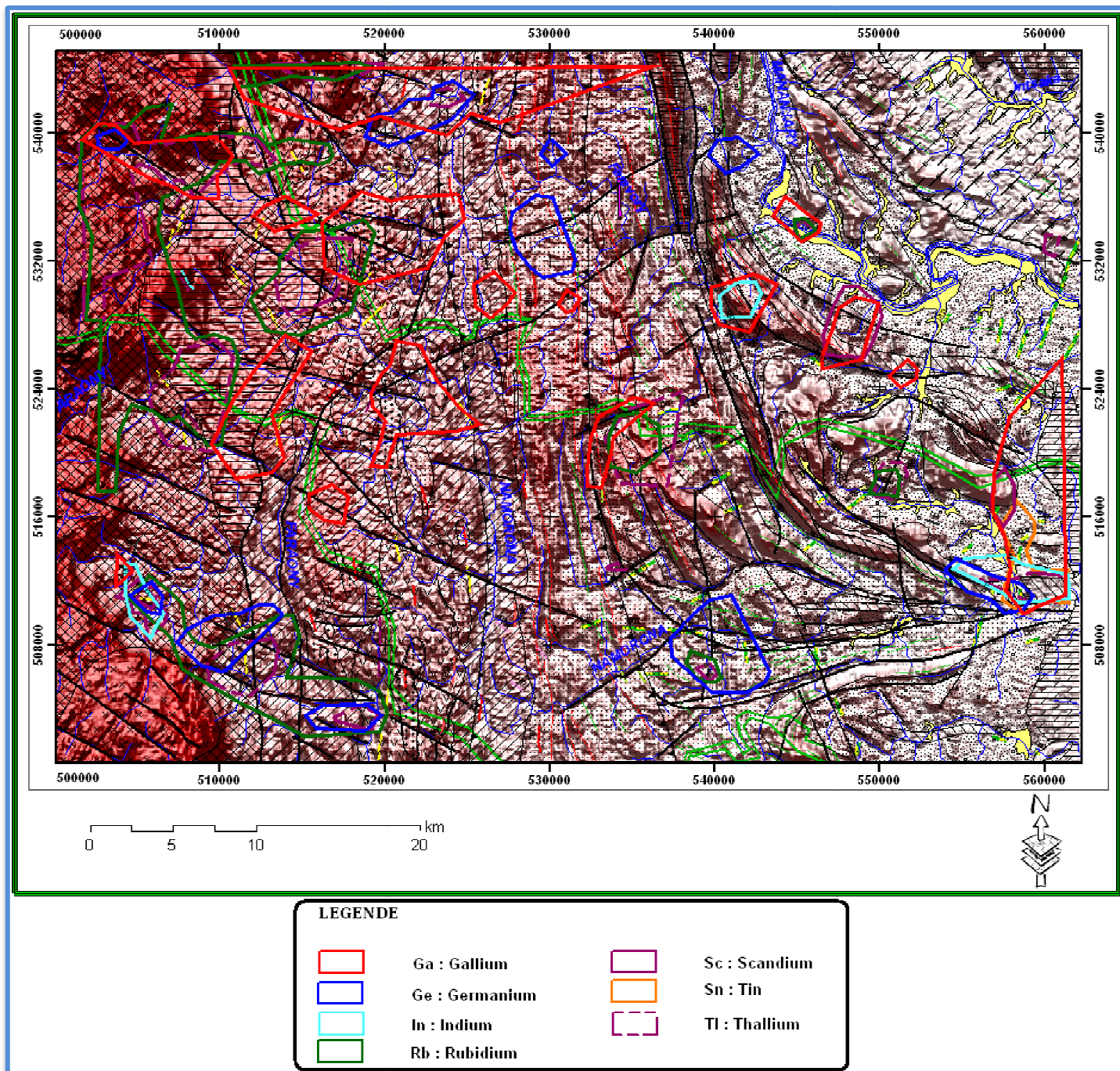
Cette carte d'ER avec le Ga, Ge, In, Rb, Sc., Sn, Tl nous montre une forte concentration des anomalies sur toute la partie Nord-Ouest de la zone d'étude (NW de ZC) et une autre concentration des anomalies en Ga, In, Sc, Ge et In est notée dans la partie Sud-Ouest de ZC (**Figure 29**)

Ces anomalies proviennent probablement des formations de l'Ampasary, Granite de Tafia (Granite anatectique). Plusieurs groupes de linéaments (failles indifférenciés) ont été observés et ont recoupé les anomalies. Les minéralisations occupent préférentiellement ce groupe de linéament.

Dans la zone mylonitique, on ne trouve que d'importantes anomalies en Ga et Ge qui sont supportées par la formation d'Andasibe et le groupe de Vondrozo.

L'observation faite sur la partie orientale de la ZC est que les anomalies constituent de petits groupes ({Ga, Rb}) ; ({Ga, In}) ; ({Ga, Sc}) ; ({Rb, Sc}) ; ({Ga, Ge, In}) ; ({Rb, Ge, Tl}). Elles suivent toujours la foliation de la zone de virgation d'Ifanadiana.

Cette carte d'ER montre donc que les grandes masses de minéralisation sont bien identifiées.

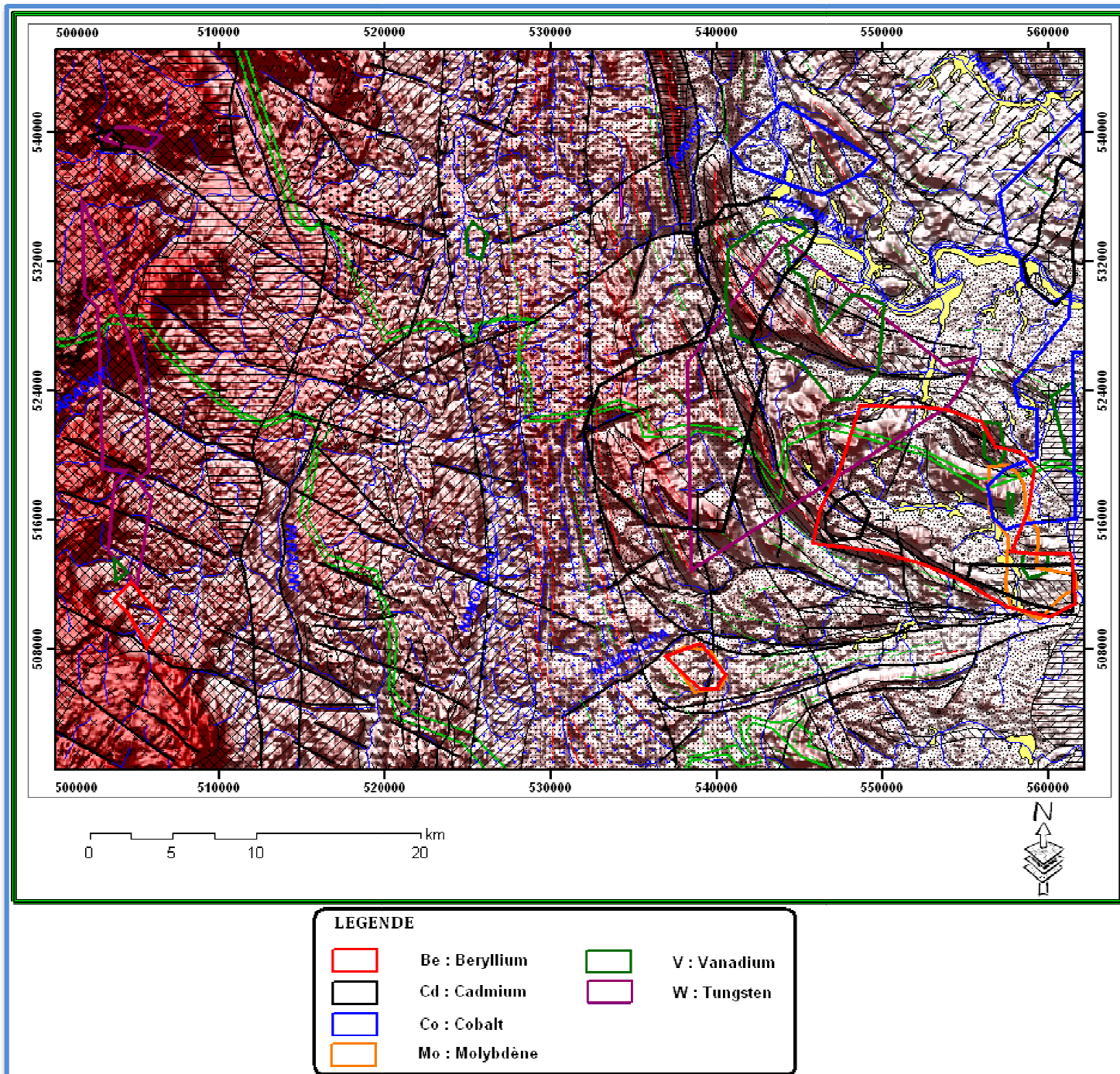


**Figure 30-** Eléments rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

#### 9.1.6. Métaux Rares

D'importantes d'anomalies en métaux rares sont localisées sur toute la partie orientale de la zone d'étude c'est-à-dire à l'Est de la ZC d'Angavo-Ifanadiana (**Figure 30**). Un grand chapelet d'anomalie géochimique en Cd, Mo, W, V, Be, Co est associé à la zone de virgation de Kianjavato. Des linéaments (faille chevauchante, faille indifférenciée) recoupent ces anomalies. Les anomalies auxquels sont de part et d'autre des bassins versants de Mananjary et de Namorona sont localisées.





**Figure 31-** Métaux rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

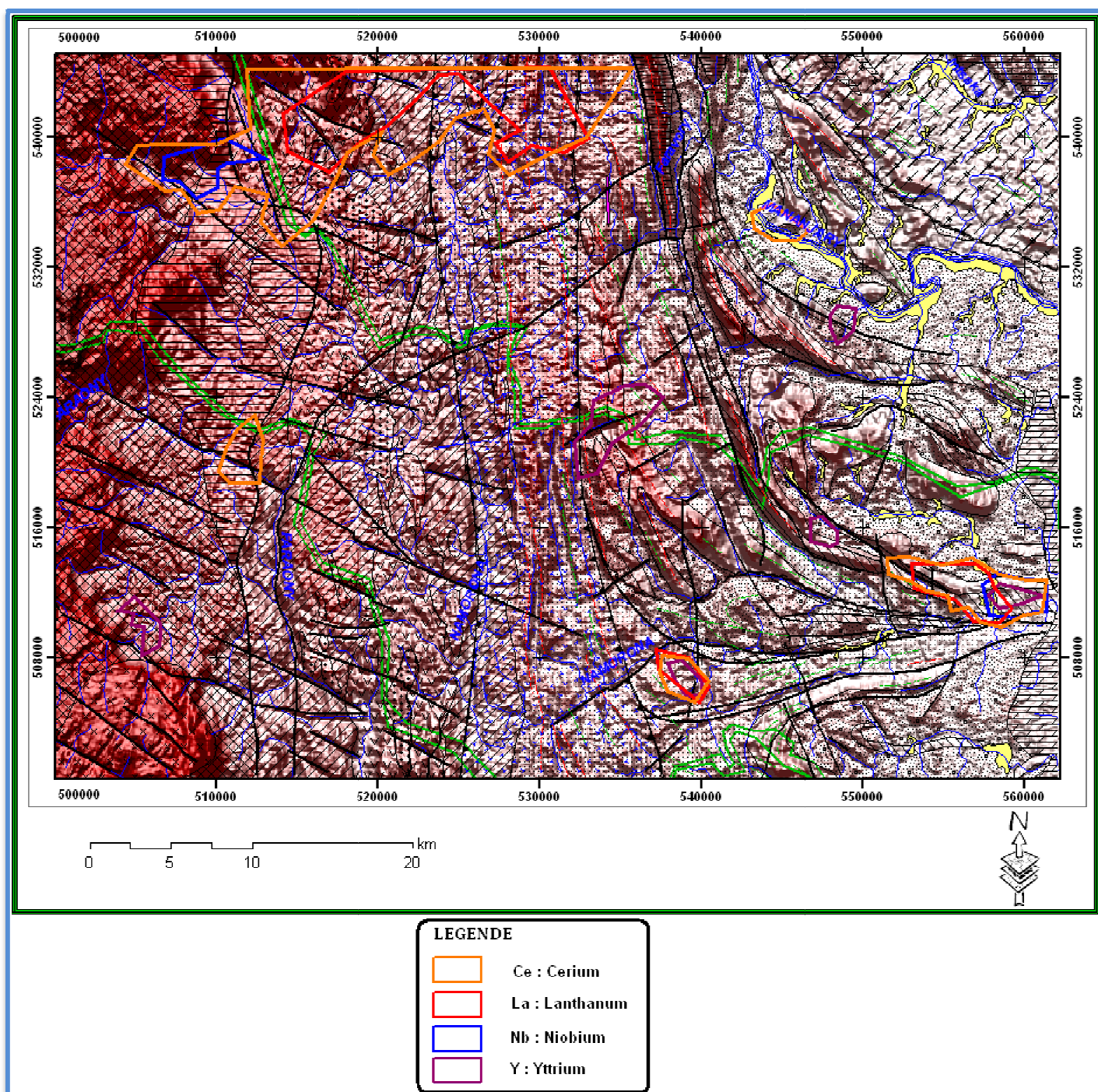
#### 9.1.7. Terres Rares

Sur les données géochimiques, les TR sont composées de Ca, La, Nb et Y (**Figure 31**). On retiendra notamment que seules deux zones d'anomalie sont observées :

Au Nord de la zone d'étude recoupant la ZC d'Angavo-Ifanadiana, une grande masse d'anomalie est localisée. Structuralement, elle est traversée par des failles qui se reposent au groupe d'Ambatolampy (nPLM), subsuite d'Angavo-Ankazobe (nPIIzz, nPIIzc et nPIIza) et la formation d'Andasibe (nPMPap).

Sur la zone oblique de Kianjavato et sur son pointu, un assemblage d'anomalie est observé qui est au dessus de la formation géologique de la formation d'Andasibe (nPM Pap), de groupe d'Ampasary (nPM Py), subsuite de Kianjavato (nPKLjx, nPKLjg).

On peut en conclure que la minéralisation se trouve pratiquement sur les failles. Cette indication structurale permet de mieux diriger qu'il y a une zone intéressé au Nord-Ouest et au zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana.



**Figure 32-** Terres rares sur fond de l'altimétrie et de la géologie transparente.

## 9.2. Cartes de synthèse

L'insuffisance des détails de la base de données hydrographiques du Foiben-Taosaritanin'i Madagascar (FTM) au 1/500 000 nous amènent à utiliser la carte d'image satellitale pour mieux comprendre la circulation d'eau dans notre zone d'étude (figure). Pour avoir une bonne visualisation de la carte on la divise en quatre grandes parties comme on le voit sur les figures ci-dessous.

### 🍏 Zone NW (figure 33)

Au point de coordonnées 502299 Est et 539536 Nord (**Figure 33-🗺** : sur le bassin versant de Namorona) présente une anomalie en uranium et en pierre. Le trajet de l'affluent qui traverse cette anomalie est sur le groupe d'Ambatolampy (paragneiss à sillimanite-graphite avec lentilles de quartzite, de graphite, de grenatite et de pyroxénite). La présence d'uranium et de la pierre en anomalie positive à ce point laisse suspecter que l'uranium serait à lier à une circulation de fluide mésothermal.

La présence des anomalies en platine qui est beaucoup plus magmatique ou au moins associé à circulation de fluide hypothermal permet toutefois de croire à au moins deux événements de circulation consécutifs et juxtaposés de fluide ou à un seul événement qui aurait travaillé durant toutes les étapes de son refroidissement. Toutefois, on peut également penser que le platine aurait tout simplement été libéré de ses encaissants ultrabasiques sans qu'il y ait en intervention de fluide.

Quatre autres anomalies en columbite, PGE/M et BMS à l'intérieur du bassin versant de Namorona témoignent du même mécanisme. Ils sont tous localisés sur des petits affluents de Namorona. Sur le plan lithologique, la pyroxénite et la monzogranite à granodiorite gneissique de SS d'Angavo-Ankazobe ou la pyroxénite du groupe d'Ambatolampy seraient à l'origine de ces diverses anomalies. Dans le bassin versant de Faraony et de Mananjary, les pierres et l'apatite proviendraient respectivement de la grenatite du groupe d'Ambatolampy et de la monzogranite à granodiorite gneissique ou du granite charnockitique de la SS d'Angavo-Ankazobe.

Proximité du point décrit en premier et plus à l'Ouest de ce dernier, deux témoins de circulation de fluide épithermal liés à l'uranium et pierre ont probablement même source géologique que les précédents, paragneiss à sillimanite-graphite avec lentilles de quartzite, de graphite, de grenatite et de pyroxénite du groupe d'Ambatolampy.



LEGENDES		Roches Sédimentaires et Volcaniques (et les équivalents métamorphiques)		Roches Plutoniques (et les équivalents métamorphiques)	
CÉNOZOÏQUE	Quaternaire à récent	<div><div>Qa</div><div>Qa : Alluvions et dépôts lacustres, indifférenciées</div></div>			
MÉSOZOÏQUE	Crétacé supérieur	<div><div>Groupe de Mananjary</div><div><div><div>CrMsb</div><div>CrMsb: Formation de Sakaleona: basalte (coulées)</div></div></div></div>		mg	Microgabbro (Dolérite)
PALÉOZOÏQUE	Cambrien inférieur			Suite d'Ambalavao	<div><div><div>EAsq</div><div>Syénogranite</div></div><div><div><div>nPY/Yf</div><div>Granite de Tafia</div></div><div><div><div>nPY/Yf</div><div>Granite anatectique</div></div></div></div></div>
PROTÉROZOÏQUE	Néo protérozoïque	<div><div>Complexe de Manampotsy</div><div><div><div>Groupe d'Ampasary:</div><div>paragneiss à biotite ± hornblende avec schistes à talc et/ou trémolite et unités de rare quartzite de roche graphitique d'amphibolite, corps lenticulaires de pyroxénite et hornblende et de métapelite à sillimanite</div><div><div><div>nPKlg</div><div></div></div></div><div><div><div>Formation d'Andasibe</div><div>•Paragneiss à biotite ± hornblende ± magnétite ± grenat et granitogneiss, avec unités / lentilles de quartzite, d'amphibolite, de roche graphiteuse</div><div>•Paragneiss à hornblende- grenat- magnétite avec unités d'amphibolite de grenatite, de pyroxénite et d'amphibolite à grenat</div></div><div><div><div>Groupe d'Ambatolampy</div><div><div><div>nPLW</div><div>Paragneiss à sillimanite-graphite avec unités de quartzite, graphite (gp), de grenatite (gr) et de pyroxénite (px)</div></div></div></div></div></div></div></div></div>		Suite de Kiangara	<div><div><div>nPKlg</div><div>Granite gneissique</div><div>Granite gneissique charnockitisé</div><div>Orthogneiss portant pyroxène</div></div><div><div><div>Sub-suite d'Andohalobe</div><div><div><div>nPKlg</div><div>Granite, parfois gneissique</div></div></div><div><div><div>Sub-suite d'Angavo-Ankazobe</div><div><div><div>nPKlg</div><div>Monzogranite à granodiorite gneissique</div></div><div><div><div>nPKlg</div><div>Granite charnockitique</div></div><div><div><div>nPLza</div><div>Granito-gneiss à microcline, parfois charnockitique avec unités de sillimanite (sl), de grenatite (gr) et de pyroxénite (px)</div></div></div></div></div></div></div></div></div></div>
		<div><div>Complexe de Masora</div><div><div><div>Groupe de Vohilava</div><div><div><div>mANBva</div><div>lentilles de quartzite, d'amphibolite ± schiste à hornblende, de schiste à tremolite ± anthophyllite de roche graphiteuse, de serpentinite et roche ultramafique</div></div><div><div><div>Groupe de Vondrozo</div><div><div><div>nAGRp</div><div>Paragneiss à biotite-grenat-sillimanite avec unités de quartzite (q), d'amphibolite (am), de grenatite (gr), de pyroxénite (px), et d'amphibolite à grenat (amg)</div></div></div></div></div></div></div></div></div>		Suite de Nosy Boraha	<div><div><div>Orthogneiss de Befody:</div><div>gneiss quartzo-feldspathique à biotite (paragneiss et orthogneiss granodioritique subordonné indifférencié) avec unités/lentilles de quartzite, d'amphibolite ± schiste à hornblende (mANBva), de schiste à tremolite ± anthophyllite (mANBvta) de roche graphiteuse, de serpentinite et roche ultramafique</div></div></div>
ARCHÉEN	Mésarchéen à Néarchéen				
	Néarchéen	<div><div>Complexe du Mangoro</div><div><div><div>nAGRp</div><div>Paragneiss à biotite-grenat-sillimanite avec unités de quartzite (q), d'amphibolite (am), de grenatite (gr), de pyroxénite (px), et d'amphibolite à grenat (amg)</div></div></div></div>			

BMS: Bases Metal Sulfides

■ Cr : Chromite

◆ Cbt : Columbite

● C : Corindon

✕ PNF: Polymétalliques Non Ferreux

★ TR : Terres Rares

◆ Ag : Argent

U : Uranium

◆ P : Pierres

◆ MN : Métaux Nobles

● MR : Métaux Rares

◆ Sr : Strontium

◆ PGE/M: Platine Groups Elements /Minerals

■ Or : Or

◆ Ap : Apatite

◆ S : Sulfures

◆ N : Niobiotantalite

am : Amphibole

amg: Amphibole grenat

bm : Basalte microgabbro

f : Felsique

gr : Grenatite

mg : Microgabbro

px : Pyroxène

q : Quartz

sl : Sillimanite

gp : ■ Roche graphiteuse pour la formation d'Andasibe

■ Graphite pour le Groupe d'Ambatolampy

Structure

~~~~~ : Faille chevauchant

— : Faille indifférenciée, observée

▲▲ : Limite de la zone de cisaillement

— : Lineament aeromagnétique

— : Lineament tectonique

■ : Zone mylonitique

Altitude en m

0- 126

126,0000001 - 340

340,0000001 - 547

547,0000001 - 857

857,0000001 - 1 128

1 128,0000001 - 1 258

1 258,0000001 - 1 393

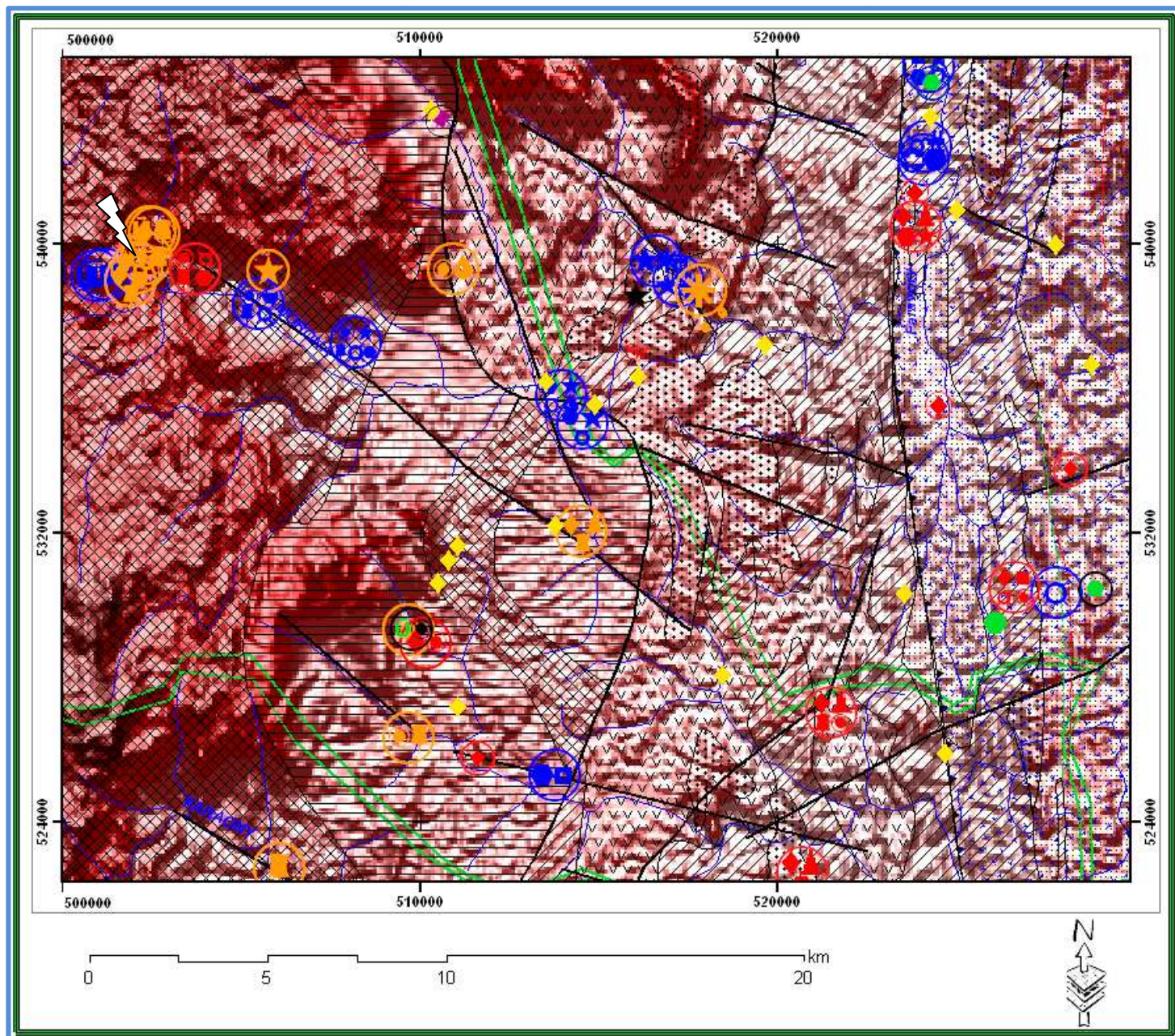
1 393,0000001 - 1 550

1 550,0000001 - 2 013

|                                                         |
|---------------------------------------------------------|
| ▲ BMS: Bases Metal Sulfides                             |
| ■ Cr : Chromite                                         |
| ◆ Cbt : Columbite                                       |
| ● C : Corindon                                          |
| ✖ PNF : Polymétalliques Non Ferreux                     |
| ★ TR : Terres Rares                                     |
| ● Ag : Argent                                           |
| ▼ U : Uranium                                           |
| ◆ P : Pierres                                           |
| ▼ MN : Métaux Nobles                                    |
| ● MR : Métaux Rares                                     |
| ★ Sr : Strontium                                        |
| ◆ PGEIM : Platine Groups Elements / Minerals            |
| ■ Or : Or                                               |
| ★ Ap : Apatite                                          |
| ● S : Sulfures                                          |
| ■ N : Niobiantantalite                                  |
| — am : Amphibole                                        |
| — amg : Amphibole grenat                                |
| — bm : Basalte microgabbro                              |
| — f : Felsique                                          |
| — gr : Grenatite                                        |
| — mg : Microgabbro                                      |
| — px : Pyroxène                                         |
| — q : Quartz                                            |
| — sl : Sillimanite                                      |
| — gp : ■ Roche graphiteuse pour la formation d'Andasibe |
| ■ Graphite pour le Groupe d'Ambatolampy                 |
| Structure                                               |
| ~~~~~ : Faille chevauchant                              |
| — : Faille indifférenciée, observée                     |
| ▲ : Limite de la zone de cisaillement                   |
| — : Lineament aeromagnétique                            |
| — : Lineament tectonique                                |
| ■ : Zone mylonitique                                    |
| Altitude en m                                           |
| 0 - 126                                                 |
| 126,0000001 - 340                                       |
| 340,0000001 - 547                                       |
| 547,0000001 - 857                                       |
| 857,0000001 - 1 128                                     |
| 1 128,0000001 - 1 258                                   |
| 1 258,0000001 - 1 393                                   |
| 1 393,0000001 - 1 550                                   |
| 1 550,0000001 - 2 013                                   |

Figure 33- Légende des toutes les cartes de synthèse ci-après.





**Figure 34-** Carte de synthèse : Nord-Ouest.

Deux résultats géochimiques sont localisés en suivant le trajet d'affluent vers l'Est à pierres, MR, TR, PNF, corindon seraient associés au même type de circulation de fluide et aux mêmes sources géologiques probables.

Le long de la Namorona, les résultats géochimiques témoignent de la circulation de fluide épithermal quoique les sources géologiques peuvent être différentes. Elles proviendraient des pyroxénites, amphibole à grenat du groupe de Vondrozo et des grenatites, des pyroxénites de la SS d'Angavo-Ankazobe. Sur les petits affluents au Sud du bassin de la Namorona, le corindon et l'or sont les principaux témoins de ce fluide et proviendraient de granito-gneiss à intercalation de formation géologique à sillimanite, de pyroxénite de la SS d'Angavo-Ankazobe.

Dans le bassin de Mananjary, on ne trouve que deux chapelets d'anomalies géochimiques qui sont respectivement à l'Ouest du bassin et sur la ZC :

❖ A l'Ouest, l'unité d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat du groupe de Vondrozo ou la monzogranite à granodiorite gneissique, le granite charnockitique et les formations à sillimanite, la pyroxénite de la SS d'Angavo-Ankazobe auraient été à l'origine de ces anomalies géochimiques à TR, apatite et or. Elles seraient associées à la même circulation de fluide.

❖ Sur la ZC, les anomalies géochimiques (niobiotantalite, sulfure, corindon, TR, or, PNF) se trouvent sur Faravory qui est un affluent du bassin de Mananjary. Elles seraient la même source lithologique que les précédents.

Plus à l'Ouest du point cité précédemment, les corindons, le PNF, la MR et les pierres témoignent de la circulation d'un fluide hypothermal provenant du démantèlement des mêmes formations géologiques. Quatre autres anomalies seraient à rapportées à ce même fluide et qui sont PGE/M, BMS, P, MR et corindon. Elles proviendraient du démantèlement des formations du groupe d'Ambatolampy et de la SS d'Angavo-Ankazobe.

Le PGE/M se trouve presque partout sur les affluents des bassins versants de Namorona et de Mananjary et il proviendrait de la pyroxénite du groupe d'Ambatolampy, de la pyroxénite (px), de l'amphibolite (am) et de l'amphibole à grenat (amg) des formations d'Andasibe et du groupe de Vondrozo, de la pyroxénite de la SS d'Angavo-Ankazobe.

Le strontium a peu d'importance parce qu'on n'a d'anomalie en Sr qu'en un point et ce, associée à quelques anomalies du corindon sur la ZC. Ceci témoigne de la circulation d'un fluide sans toutefois qu'on puisse lui attribuer une caractéristique de température. On trouve également de rares anomalies en columbite dans le bassin de Mananjary et qui seraient le produit de démantèlement des pyroxénites de la SS d'Angavo-Ankazobe.

En résumé, cette partie se trouve dans la zone à haute altitude, l'abondance des fluides épithermaux et mésothermaux dans cette partie de la zone d'étude est localisée. La plupart de ce fluide présente une anomalie en corindon qui pourrait être l'une de source de ce fluide. Le niveau quantitatif d'anomalie en PGE/M, TR, PNF, MR, Pierre est aussi important dans cette zone tandis que l'anomalie en uranium, BMS, Apatite, colombite est peu considérable.

🍏 Zone Sud-Ouest

Les anomalies en PGE/M ont été localisées dans les deux bassins (de Namorona et de Faraony) dans cette zone (**Figure 34**).

On a aussi relevé quatre témoins de circulation de fluide mésothermal au Nord et à l'Ouest du bassin de Faraony et à l'Est du Namorona. Les anomalies concernées sont à TR, MR et PGE/M et qui seraient les produits de démantèlement des pyroxénites du groupe d'Ambatolampy et de la SS d'Angavo-Ankazobe. Les anomalies sur la Namorona proviennent probablement des pyroxénites, de l'amphibolite à grenat.

La présence de l'or et des BMS dans la partie Ouest de cette zone suggère une circulation de fluide hypothermal qui aurait affecté les quartzites et les pyroxénites du groupe d'Ambatolampy.

Au Sud de la zone d'étude, la présence des anomalies géochimiques en TR, C, PNF résulterait d'une circulation épithermale et qui aurait affecté les formations de la SS d'Angavo-Ankazobe, du groupe de Vondrozo, du granite de Tafia. L'omniprésence des BMS, PGE/M et des MR sur le grand fleuve de Faraony affirme que les lentilles de quartzite, l'amphibolite, lentille de pyroxénite, amphibole à grenat, grenatite de groupe de Vondrozo ou granite charnockitique, monzogranite à granodiorite gneissique de SS d'Angavo-Ankazobe ou bien lentille de quartzite, lentille de pyroxénite, graphite, grenatite de groupe d'Ambatolampy affectent ces anomalies.

On estime aussi que la présence des corindons dans le bassin de Namorona au NO de cette zone laisse suggérer une circulation mésothermale qui aurait affecté les amphibolites, les pyroxénites et les amphiboles à grenat du groupe de Vondrozo ou le granite charnockitique de la SS d'Angavo-Ankazobe.

Les MR sur l'affluent de Faraony au Nord témoignent du démantèlement des grenatites ou du granite anatectique du groupe d'Ambatolampy ainsi que le, granite de Tafia.

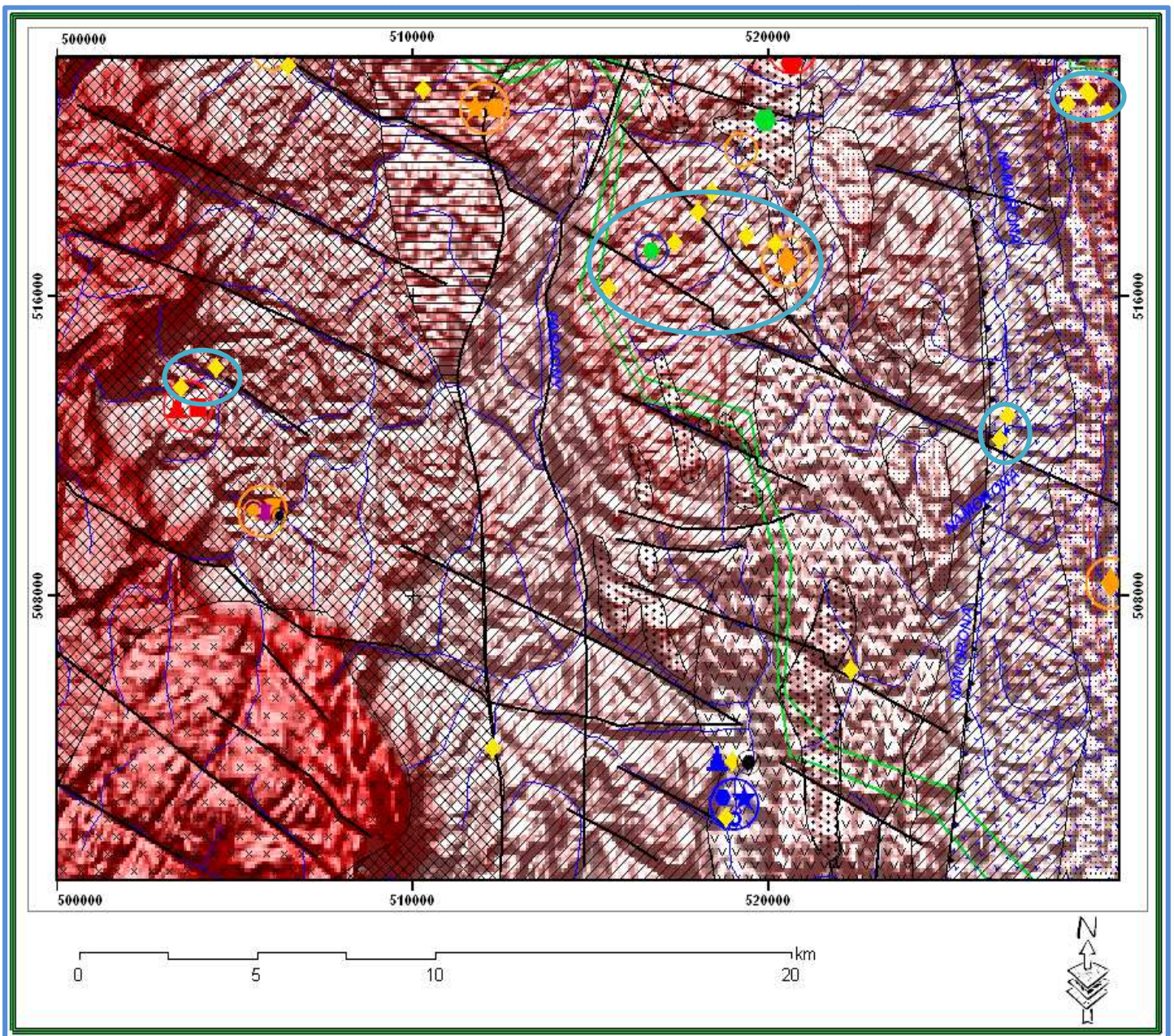
En conclusion, on note qu'il y a une forte expression de PGE/M et peu de circulation hydrothermale dans la partie SO de la zone d'étude. Les anomalies géochimiques en BMS, TR, MR, pierres et corindon y sont aussi répertoriées.

Les éléments chimiques des modèles métallogéniques suivants affirment la correspondance avec cette carte de synthèse:

- L'U, Th, Cs pour l'ANR



- Le Pt, Au, Fe pour l'AUB
- Le Ba, Ce, Hf, Sr pour le CC
- Le K, Mg, Ti, Al, Na, pour l'EMm
- Le Ga, Ge, In, Rb, Tl, Sc Pour l'ER
- Le V, W, Be pour le MR
- Le Ce, Y Pour le TR



**Figure 35-** Carte de synthèse : Sud-Ouest.

En résumé, l'abondance d'anomalie en PGE/M est toujours considérée dans cette partie et ce le témoin d'un fluide mésothermal. L'anomalie en corindon, BMS, pierre, MR, or est peu dispersée.

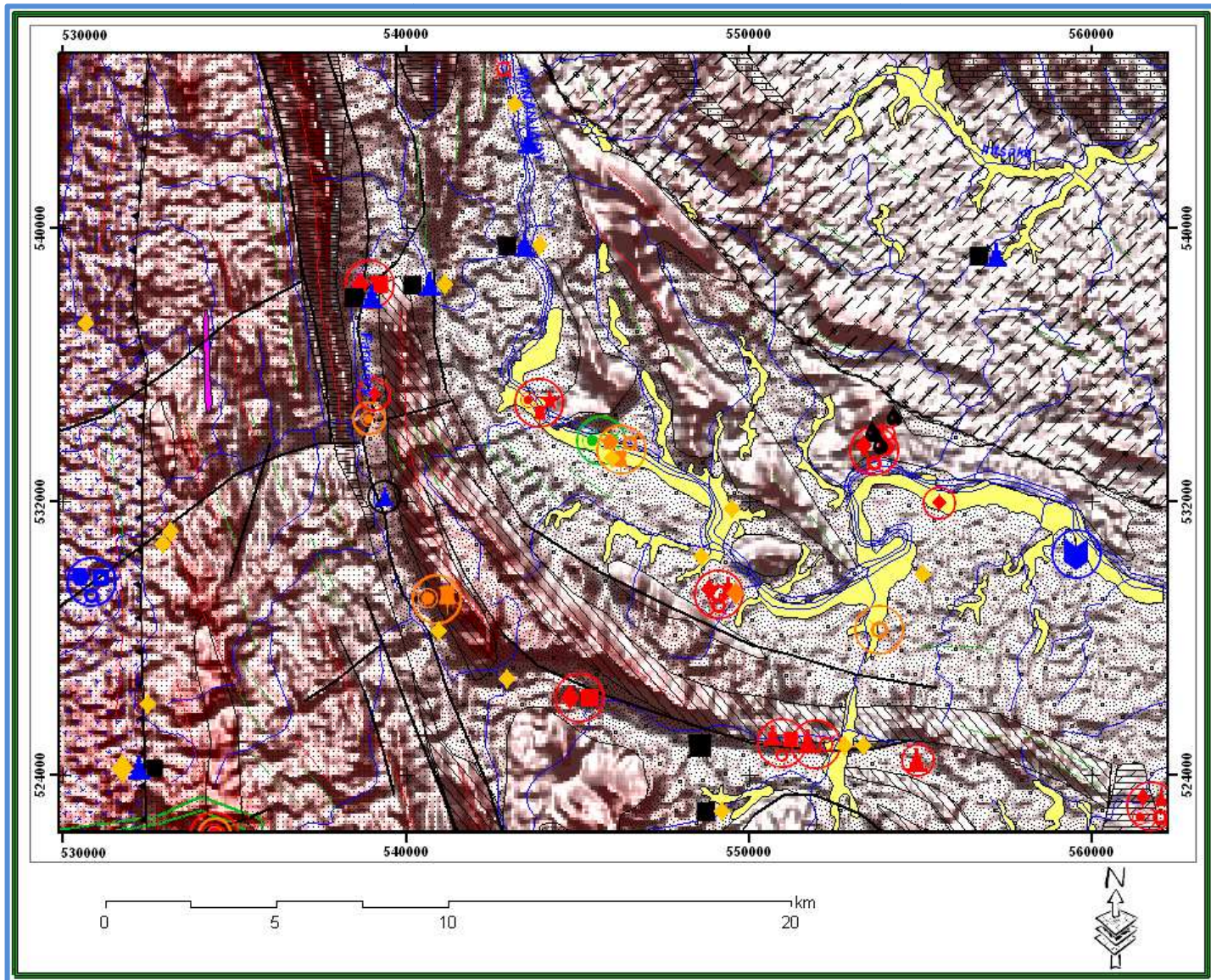
#### 🍏 Zone Nord-Est

Cette partie de la zone d'étude se trouve entièrement sur le bassin versant de Mananjary (**Figure 35**). L'interprétation se fait comme suit :

- La rivière Mananjary et ses affluents drainent la partie Sud-Est de cette zone et affectent ainsi les orthogneiss à pyroxène de la SS de Kianjavato, les amphibolites, les lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary, les lentilles d'amphibolite± schiste à hornblende, les schistes à trémolite±anthophyllite de la Suite de Nosy Boraha, les syénogranites de la suite d'Ambalavao ainsi que des alluvions et des dépôts lacustres indifférenciées. De plus les anomalies témoignent de circulation des fluides hypothermaux et mésothermaux. Ce sont des anomalies en PNF, PGE/M, Cr, BMS, MR, TR et pierres.
- Sur l'affluent Faravory de la grande rivière Mananjary, on retrouve quelques anomalies en Cr et en BMS qui proviendraient du lessivage des lentilles d'amphibolite± schiste à hornblende, de schiste à trémolite±anthophyllite. Un chapelet d'anomalies en columbite et une anomalie de PNF localisées dans une partie de déviation de cette rivière (au Nord) ; anomalies probablement associées aux mêmes lithologies. Il faut également tenir compte des granitoïdes de la SS de Kianjavato.
- Dans la partie Est, SE et Sud de la rivière Mananjary, on a une importante expression d'anomalies de PGE/M, BMS, MR, PNF dont les sources probables préalablement affectées par une circulation de fluide hypothermal seraient le groupe de Mananjary (coulées basaltiques) ainsi que les filons de basalte et de microgabbro et les orthogneiss à pyroxène de la SS de Kianjavato et l'amphibolite et les lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary.

On observe aussi une série d'anomalies associées à des indications de circulation de FH avec BMS, Cr, PNF et PGE/M, une suite de Cr qui sont localisées au Sud de cette zone NE. Ces anomalies proviendraient des mêmes sources lithologiques que les anomalies précédemment décrites.





**Figure 36-** Carte de synthèse : Nord-Est.

Dans la ZC d'Angavo-Ifanadiana, on a du PGE/M, un groupement de PGE/M, BMS et Cr et un témoin de FE (corindon, PNF et or) qui proviendraient d'une même source lithologique (lentilles d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat de formation d'Andasibe). Il y a aussi un groupe de PGE/M observé à l'Ouest de la ZC et provenant des mêmes sources lithologiques (formation d'Andasibe).

Au Nord de cette partie NE, on note un chaînon de groupes de chromite associé au BMS et PGE/M sur Faravory qui est un affluent de Mananjary et témoignent d'une circulation de FH. Les anomalies proviendraient des mêmes sources lithologiques (lentilles d'amphibolite, lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary, les lentilles d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat des formations d'Andasibe). Sur ce même affluent, différentes anomalies géochimiques en PGE/M, MR et pierre avec témoin d'une circulation de FM à laquelle seraient associés des BMS et MR juxtaposées à une anomalie à PGE/M. Ces anomalies proviendraient des mêmes sources lithologiques : lentilles d'amphibolite et lentilles

de pyroxénite du groupe d'Ampasary, des lentilles d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat des formations d'Andasibe, des orthogneiss à pyroxène de la SS de Kianjavato ou bien des syénogranites de la suite d'Ambalavao.

Sur les affluents au bord de grand fleuve de Mananjary, des anomalies en PGE/M sont observées et elles sont associées à des anomalies à BMS, PNF (témoin d'un FH) et un MN. Ces anomalies sont localisées le long de grand fleuve de Mananjary et proviendraient des orthogneiss à pyroxène, des lentilles d'amphibolite, des lentilles de pyroxénite.

En conclusion, l'abondance des anomalies en PGE/M est encore observée dans cette zone, mais on observe également un nombre significatif d'anomalie en chromite. L'importance de la circulation hypothermale est considérée comme étant le principal vecteur de lessivage au sein de cette zone.

Les éléments chimiques du modèle métallogénique en correspondance avec cette carte sont les suivants :


- Zn, Pb, Sb et Zr pour l'ANR
- Cr, Te, Fe, Cu, Ag, Au, Pt et Ni pour l'AUB
- Ba, Se, Hf et Hg pour le complexant
- Al, Ca, Ti, Mn, Mg et P pour l'EMm
- Ga, Ge, In, Rb et Sc pour l'ER
- V, Co, Cd et W pour le MR
- Ce, Y, Pour le TR

En bref, l'anomalie en BMS associée parfois avec le chrome est rependue presque partout dans cette partie et témoin d'un fluide hypothermal. Le PGE/M est toujours considérée comme principale anomalie de la zone d'étude et est trouvé dans les chenaux de la rivière Mananjary.

#### 🍏 Zone Sud-Est

On remarque que le bassin versant de Namorona occupe toute la partie Sud-Est de cette zone (**Figure 36**). Une petite partie du bassin de Mananjary occupe la partie Nord de la zone et où

on observe une série de témoin de fluide mésothermal et épithermal qui laisse suggérer que les MR et le PGE/M proviendraient du lessivage des orthogneiss à pyroxène ; des gneiss migmatitiques à pyroxène, de l'hornblendite de la SS de Kianjavato ou bien des lentilles d'amphibolite, des lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary.

Au sein du bassin versant de Namorona, un chapelet d'anomalie à témoin de circulation de fluide hypothermal est localisé à l'Est de la zone (  **Figure 36-**). Il est probable que les anomalies à PGE/M, PNF, BMS, MR, or et columbite associées proviennent des orthogneiss à pyroxène, des gneiss migmatitiques à pyroxène et de l'hornblendite de la SS de Kianjavato, des lentilles d'amphibolite, des lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary ou bien des coulées basaltiques du groupe de Mananjary. Plus au Nord de ce chapelet, il y a des anomalies de même caractères localisées le long des affluents de la Namorona.

Au Sud de la zone, une série d'anomalies en PGE/M associées parfois à argent, or est localisée. Ces anomalies proviendraient des mêmes sources lithologiques que les précédentes.

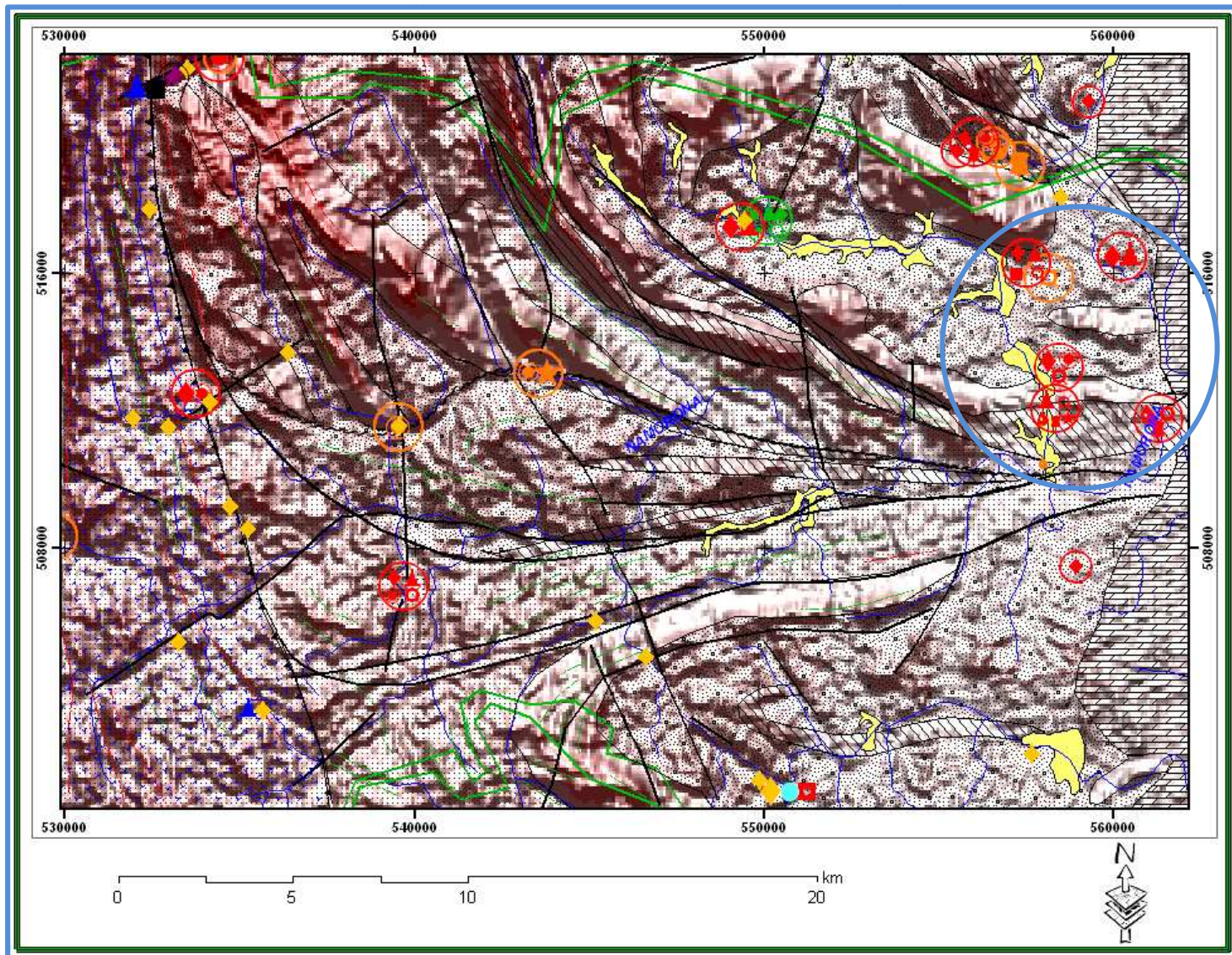
Sur la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana, plusieurs anomalies en PGE/M sont localisées et associées à BMS, MR et parfois à des témoins de la circulation d'un FH. Ces anomalies proviendraient des formations d'Andasibe (lentilles d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat).

Au Nord du tracé de la rivière Namorona et dans la zone virguée, des témoins de circulation de FM et de PGE/M sont relevés et provenant probablement des lentilles d'amphibolite, des lentilles de pyroxénite du groupe d'Ampasary, des lentilles d'amphibolite, de pyroxénite et d'amphibole à grenat des formations d'Andasibe ou bien des granitoïdes à pyroxène, de l'hornblendite de la SS de Kianjavato. Des anomalies en PGE/M et des témoins de circulation de FH sont localisés sur les affluents de la rivière Namorona sur en tracé Sud. Ces anomalies pourraient provenir des formations d'Andasibe et du groupe d'Ampasary.

On note également un groupement d'anomalies en Cr, BMS, PGE/M, MR associées à des témoins de circulation de FH et de FM et des pierres au Nord-Ouest de la zone et qui proviendraient des mêmes sources lithologiques.

En conclusion, on estime que la température de l'eau se trouvant sur la zone est élevée (FH) et une abondance de PGE/M est importante sur toute la partie (sur les affluents) et les autres minéraux sont peu dispersés mais non négligeables.





**Figure 37-** Carte de synthèse : Sud-Est.

La conformité avec les modèles métallogénique se fait comme suit :

- Pour l'AUB : Au, Re, Cu, Te, Cr, Fe et Pt
- Pour l'ANR : Zr, Sb, Pb, Th, Zn et Li
- Pour l'EMm : Na, Ti, Mg et K
- Pour le MR : Be, Mo, Cd, Co et V
- Pour le TR : Ce, La, Nb et Y
- Pour les complexants : Hf, S, Se, As, Bi, Ba et Hg
- Pour l'ER : Ge, In, Rb, Sn, Sc, Tl et Ga

En bref, le fluide hypothermal est le principal fluide de cette partie, et c'est l'abondance de l'anomalie en BMS, PGE/M, MR, PNF et la colombite qui témoigne ce phénomène de cette circulation.

#### 🍏 Synthèse générale de toutes les cartes ci-dessus

On peut conclure que les anomalies géochimiques se trouvent pratiquement tous en aval des chenaux de la rivière Mananjary, Namorona et Faraony. Les minéralisations indiquées par les indices peuvent provenir des formations géologiques, aux bords et/ou en amont du point de prélèvement. La zone d'étude est divisée en deux par la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana.

La partie Ouest de la zone d'étude se trouve dans la zone de haute altitude (**figure 37-**), l'abondance des fluides épithermaux et mésothermaux dans cette partie de la zone d'étude est localisée. La plupart de ce fluide présente une anomalie en corindon, PGE/M qui pourrait être les témoins de la source de ce fluide. Le niveau quantitatif d'anomalie en TR, PNF, MR, pierre est aussi important dans cette zone tandis que l'anomalie en or, uranium, Apatite, colombite est moindre. La plupart des anomalies en BMS se localisent sur la basse altitude et témoignent de la circulation d'un fluide hypothermal (exemple : l'affluent Faravory de Mananjary)

La plupart des anomalies est associée à des failles de direction NW-SE alors que la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana (zone mylonitique) offre des anomalies en tous ces éléments chimiques et témoignent également des circulations hydrothermales et favorables à la formation de la minéralisation.

Les caractéristiques lithologiques qui pourraient contribuer à ces minéralisations sont les suivantes :

- Pour le groupe d'Ambatolampy : paragneiss à sillimanite-graphite avec *lentilles de quartzites, de graphite, de grenatite et de pyroxénite*.
- Pour la subsuite d'Angavo-Ankazobe : *granito-gneiss* à microcline, parfois charnockitique avec *unité de sillimanite, de grenatite, de pyroxénite* ou *granite charnockitique* ou *monzogranite* à *granodiorite gneissique*.
- Pour le groupe de Vondrozo : paragneiss à grenat-biotite-sillimanite avec *lentilles de quartzites, d'amphibolite, de grenatite, de pyroxénite, d'amphibole* à *grenat*.

- Pour la formation d'Andasibe : paragneiss à *biotite±hornblende±magnétite±grenat* et *granitogneiss* avec *lentilles de quartzites, d'amphibolite, de roche graphiteuse, de pyroxénite, d'amphibole à grenat*.

On peut en déduire alors que les indices des minéralisations sont bien identifiés et que les roches basiques ainsi que les roches de nature éruptive ultérieurement métamorphisées sont les principales sources de ces minéralisations.

A l'Est de la zone de cisaillement, le fluide serait du type hypothermal explique ainsi l'abondance des anomalies en BMS, PGE/M, MR, PNF et la columbite. Les anomalies en BMS associées parfois avec le chrome sont répandues presque partout dans cette partie et confirment le caractère hypothermal du fluide. Les anomalies en PGE/M sont toujours considérées comme les principales anomalies de la zone d'étude et sont trouvées dans les chenaux des rivières Mananjary et Namorona. Les anomalies en pierre, TR et corindon sont en petit nombre. On ne trouve pas des anomalies en strontium, niobiotantalite, uranium dans cette partie. L'or et les métaux nobles ne marquent pas trop cette partie à l'Est de la ZC.

La zone de virgation de Kianjavato et la plupart des failles de direction NE-SW ont un rôle très important dans la possibilité de minéralisation dans cette partie tandis que les failles chevauchantes n'ont apparemment pas des fonctions appréciables en termes de minéralisation. La zone de cisaillement est toujours associée à diverses anomalies.

La caractéristique lithologique qui pourrait contribuer à cette minéralisation est les suivantes :

- Pour la formation d'Andasibe : paragneiss à *biotite±hornblende±magnétite±grenat* et *granitogneiss* avec *lentilles de quartzites, d'amphibolite, de roche graphiteuse, de pyroxénite, d'amphibole à grenat*.
- Pour le groupe d'Ampasary : paragneiss à *biotite±hornblende* avec *schistes à talc et/ou trémolite et unités de rare quartzite, de roche graphitique, d'amphibolite, corps lenticulaires de pyroxénite et hornblendite et de métapelite à sillimanite*.
- Pour la suite d'Ambalavao : *le syénogranite*
- Pour la suite de Kiangara : *granite gneissique, granite gneissique charnockitisé, orthogneiss portant pyroxène*.

On peut en déduire alors que les indices des minéralisations sont bien identifiés et que les roches basiques ainsi que les roches éruptives ultérieurement métamorphisées et localement granitisées sont les principales sources de ces minéralisations.



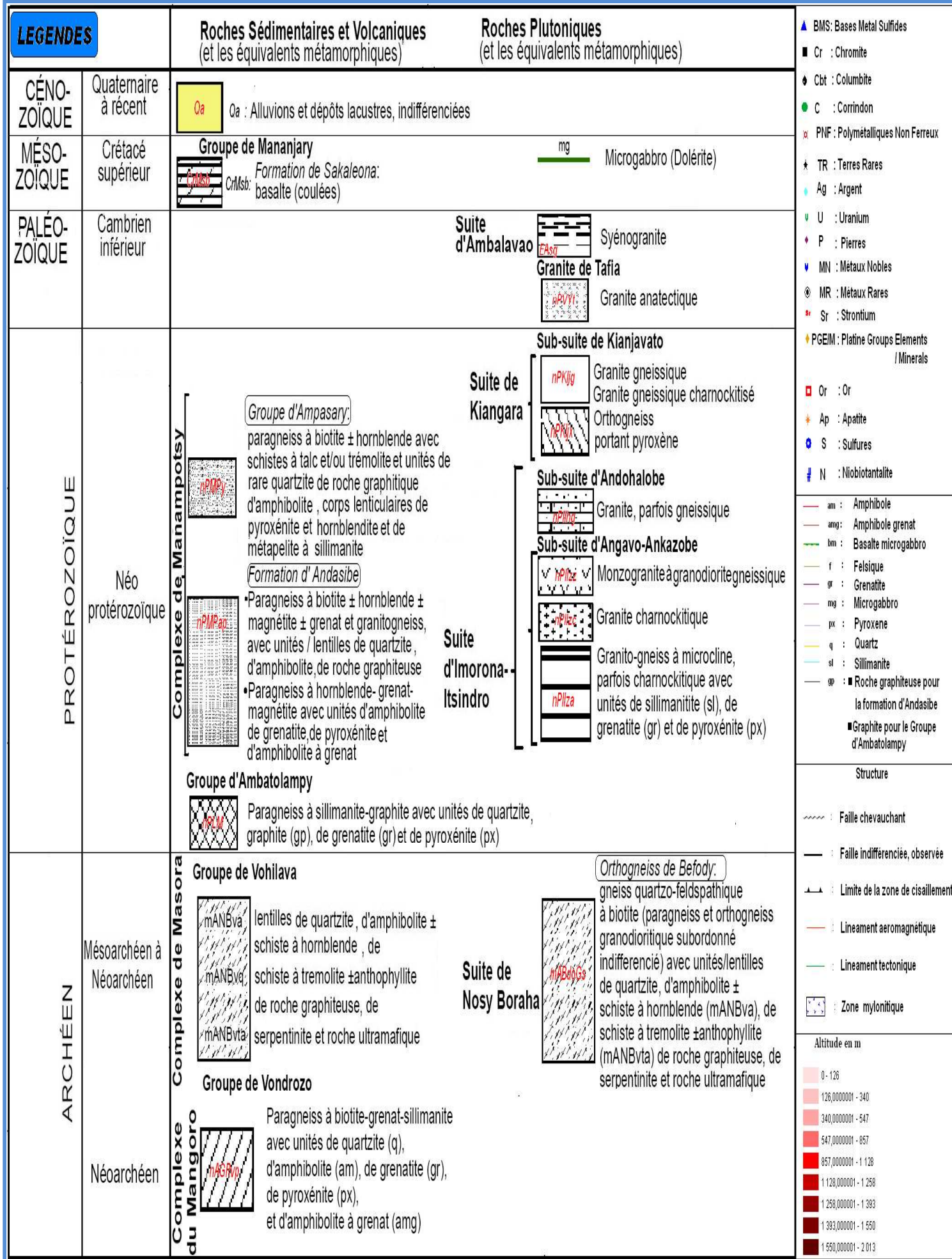


Figure 38- Légende de la carte de synthèse.



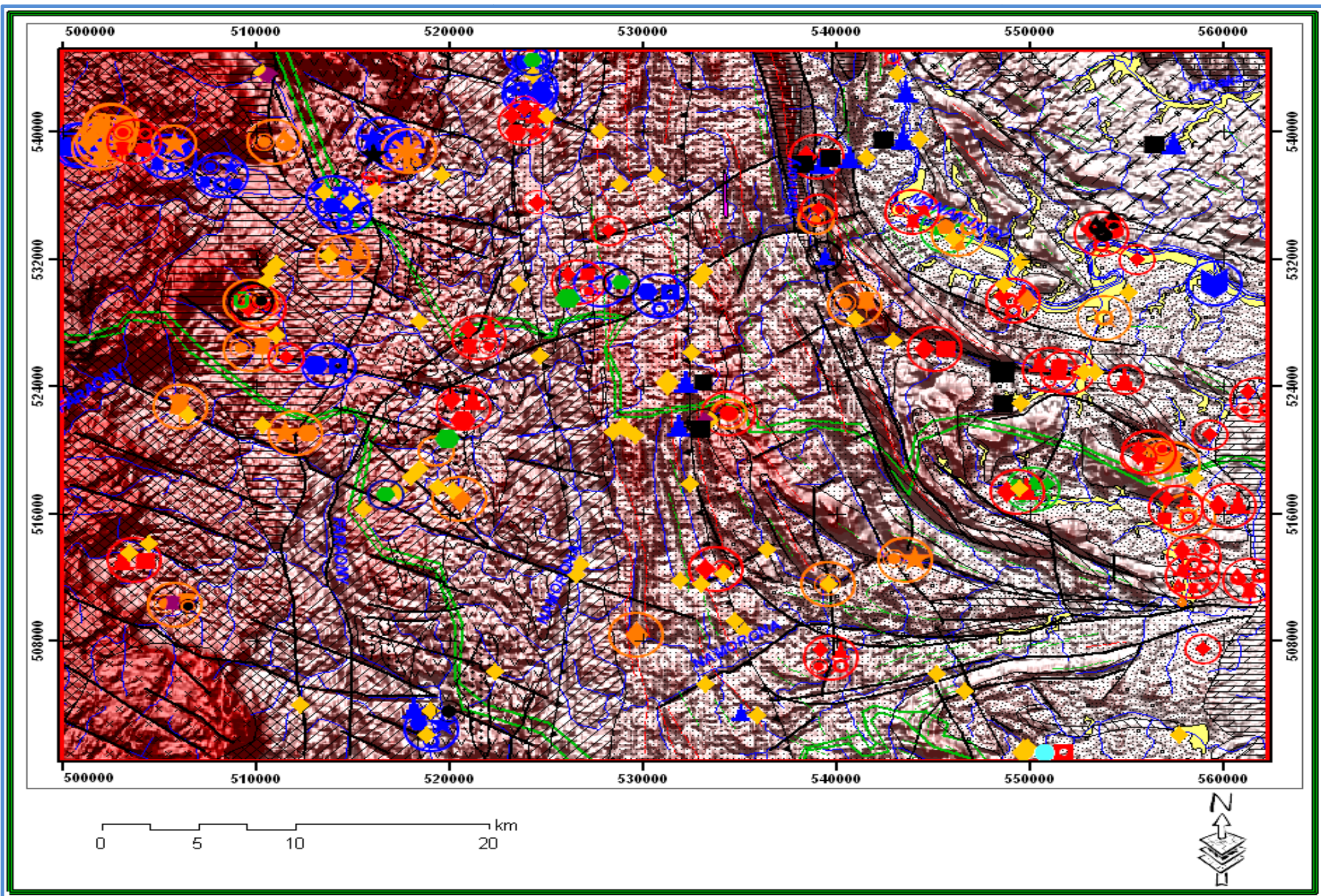


Figure 39- Carte de synthèse.



## **PARTIE VI : PROSPECTIVES, PERSPECTIVES GEOCHIMIQUES DE LA REGION**

## **CHAPITRE X : PROSPECTIVITE DE LA REGION**

La prospection géologique et géochimique effectuée dans la zone d'étude a permis d'établir différentes cartes à interpréter. Les résultats de recherche suggèrent que la région de Vatovavy pourrait être une zone fertile en des perspectives minières. Nous proposons un plan qui pourrait aboutir à une démarche vers une exploitation efficace et productive.

### **10.1. Plan technique**

D'après les études menées depuis les débuts de cette recherche, il nous est possible de voir les anomalies géochimiques existant dans les sédiments de ruisseaux des feuilles PQ53. Ce qui nous a convaincu des possibilités de minéralisation de notre zone d'étude.

Certes, nous n'avons réalisé qu'une étude théorique, dont la précision est limitée pour des raisons multiples et parmi lesquelles la faible densité des prélèvements rendant ainsi compte de la confiance à attribuer aux analyses spatiales incontournables dans ce genre d'études.

Nous allons avancer que les éléments PGE/M, TR, MR, BMS, PNF, corindon et or peuvent faire l'objet d'étude plus détaillée à l'avenir. Par contre, on signale que Sr, MN, uranium, columbite, apatite, argent, pierre, niobiotantalite, sulfure risquent de conduire à des gîtes malgré les petits nombres d'anomalies positives associées. Il est à souhaiter que quelques unes des indications actuelles seraient à l'avenir confirmées en des gîtes et que les méthodes géochimiques seraient confirmées également dans leur efficacité pour la recherche des minéralisations. Dans tous les cas elles ont déjà montré qu'elles sont un outil efficace d'exploration.

### **10.2. Plan économique**

Possibilités techniques : l'exploration (études géoscientifiques) qui permet de confirmer l'exploitation minière ultérieure est vivement conseillée pour prendre le relai. De telles perspectives peuvent déboucher sur l'embauche de plusieurs mains d'œuvre à recruter dans la région pour améliorer leur condition sociale. En cas d'issue positive et de l'opérationnalisation d'unités minières, les produits bruts pourraient être traités sur place avant l'exportation des produits valorisés qui contribueraient alors à la croissance économique du pays.

### **10.3. Plan social**

Si l'économie progresse, la vie de chaque citoyen s'améliorera et le pouvoir d'achat de chacun sera plus conséquent. En effet, du fait de la masse monétaire injectée directement

dans le circuit économique du village par le biais de l'activité de la recherche, les villageois pourront trouver un marché monétaire solvable pour écouler leurs produits agricoles.



## CHAPITRE XI : PERSPECTIVE GEOCHIMIQUE DE LA REGION

La région de Vatovavy offre des perspectives très intéressantes pour mieux comprendre la valorisation des informations de géochimie. Cette approche demande à être approfondie et à être explorée par des observations géologiques et géochimiques complémentaires.

- L'actualisation de la carte géologie n'est pas suffisante pour des opérateurs minières donc il faut toujours chercher à l'améliorer et à la perfectionner davantage.
- Sur le plan tectonique, à cause de la zone de cisaillement, la tectonique distingue deux parties :
  - l'Ouest de la zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana : presque toutes les failles sont de direction NW-SE.
  - l'Est de la zone de cisaillement : la zone de virgation de Kianjavato se précise

En bref, cette tectonique contribue à la minéralisation de la zone d'étude. Il est donc vivement souhaité d'explorer avec efficacité cette zone de cisaillement d'Angavo-Ifanadiana, zone de virgation de Kianjavato et ces diverses tectoniques mentionnées.

D'après les perspectives métallogéniques que nous venons d'énumérer, il s'avère que les éléments chimiques suggèrent des minéralisations dans les environs et en particulier en amont des points de prélèvement.

Pour mettre en relief la minéralisation, des prélèvements à des densités plus élevées s'avèrent nécessaires. Il est vivement recommandé de se référer à la carte de synthèse, carte des indices (annexe 1), carte de géochimie de l'or (si exceptionnellement l'or, annexe1) en vue de la mise en place de telles initiatives.

D'après ce que nous venons de recommander et d'après les indices géochimiques déjà cités auparavant, nous faisons appel aux opérateurs privés pour procéder à la valorisation de ces indices en vue de les valoriser. A ce titre, nous proposons:

- La mise à jour des données géochimiques par des prospections orientées vers une ou plusieurs substances spécifiques qui permettront d'établir la présence effective des gîtes des minerais comme l'or, le groupe du platine, le corindon,... Cette mise à jour est vivement recommandée pour avancer la connaissance des minéralisations.
- Les anomalies géochimiques constatées en aval nous permettent de persuader les opérateurs sur les possibilités en minéralisation en amont. Ceci implique donc la réalisation des levées de géophysique et des levées topographique afin de confirmer les gîtes.
- Des appuis techniques continus dans tous les domaines (domaine technique et scientifique, domaine économique et domaine social) sont vivement souhaités pour qu'il y ait amélioration de la valorisation des indices comme sus-citées.

- Enfin, il est nécessaire de renforcer les appuis et les orientations des Organisations Paysannes et élargir la collaboration avec les ONG intervenant dans la Région.

## CONCLUSION

La mise en cohérence des résultats de la géochimie et de la géologie a permis de proposer des modèles métallogéniques. Il a été observé que les minéralisations autour de notre zone d'étude, dans les sédiments des ruisseaux, sont étroitement associées à des formations géologiques.

Nous pouvons dire, au terme de cette étude que les objectifs fixés sont atteints. Les documents géologiques, géochimiques indispensables à toute interprétation ont été établis selon les règles de l'art. Si, et c'est tout-à fait normal, quelques imperfections se sont glissées, notamment au niveau de l'allure des cartes présentées, il ne faut pas oublier que les prélèvements ont été faits sur le cours d'eau des bassins versants de la zone d'étude par les observations géologiques et géochimiques mais aussi par les conditions topographiques (MNT).

Les cartes des modèles métallogéniques présentées sont en bonne cohérence avec l'allure générale des cartes de synthèses et de la carte des indices sur l'annexe 1. Les directions structurales majeures NW-SE, N-S pour la feuille P53 d'Ifanadiana et la zone de virgation, les failles de direction SE-NW pour la feuille Q53 de Kianjavato sont encore observées dans les séries de cartes.

Les anomalies géochimiques apparaissent, pratiquement tous, en aval des formations géologiques se trouvant sur le cours d'eau échantillonné. Les minéralisations indiquées par les indices proviennent des formations géologiques, aux abords et/ou en amont du point de prélèvement.

Enfin, on peut conclure que les résultats de cette étude pourront servir de guides de prospection pour d'autres indices de ces minéralisations qui ne sont pas encore apparus dans les formations géologiques ou affleurant sur les crêtes par suite de l'effet de l'érosion-altération....

J'espère que cet ouvrage contribue largement avec les opérateurs privés et prend part à l'essor socio-économique et technique de la région et de notre pays.

## **BIBLIOGRAPHIES**

- ANDRIAMAROFAHITRA, J., De La BOISSE, H., NICOLLET, C., 1990.** Datation U–Pb sur monazites et zircons du dernier épisode tectono-métamorphique granulitique majeur dans le Sud-Est de Madagascar. C. R. Acad. Sci. Paris 310, 1643–1648.
- ANNE-MARIE BARBIER, 2006.** Elaboration de méthodologies innovantes de traitements des données satellitales dans un cadre agro-environnemental. SIGMA, Univ Toulouse
- B.MOINE, 1968.** Carte du Massif Schisto-Quartzo-Dolomitique. 1/200 000. Service Géologique de Madagascar, Antananarivo.
- BERTUCAT, M. 1965,** Esquisse géologique de la région d’Antalaha (Nord-Est de Madagascar). Comptes rendues de la semaine géologique, Madagascar. Vol. 1965,77-80.
- BESAIRIE, H., 1970a.** Carte géol., Fianarantsoa, échelle 1:500 000. Service Géol. Madagascar, Antananarivo.
- BRENON, P. 1957.** Le volcanisme dans la zone centrale et méridionale de la côte Est. Parti VI in le volcanisme de Madagascar. Travaux de Bureau géologique no. 83. Service géologique de Madagascar, Tananarive (1957). 240 PP. BESAIRIE, H., BOULANGER, J., BRENON, P., BUSSIÈRE, P., EMBERGER, A., and DE ST. OURS, J., (Editors).
- CHAN PENG J. C., 2003.** Pétrographie, minéralogie et modalités de formation des gisements d’émeraude de la région de Mananjary, Est de Madagascar. Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse
- COLLINS A. S., KRÖNER A., FITZSIMONS I. C.W., and RAZAKAMANANA T., 2003.** Detrital footprint of the Mozambique Ocean: U–Pb SHRIMP and Pb evaporation zircon geochronology of metasedimentary gneisses in eastern Madagascar. Tectonophysics 375, 77–99.
- COLLINS, A.S., WINDLEY, B.F., 2002.** The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana. Journal of Geology 110, 325–340.
- DE LA ROCHE, H., 1951.** Etude géologiques des feuilles Ifanadiana-Mananjary. 74p., 9pl., 1 pl. photo, 1 carte géologique hors texte en deux couleurs, 1952.
- DELBOS, L. 1958.** Etude géologique au 1 :100 000 de la feuille Anivorano-Sud. Service Géologique de Madagascar.
- EMBERGER, A. 1958.** Reconnaissance de gisement de Bauxites dans l’Ankaizina. Arch. Service Géologique, A, 1300, 1301, Tananarive

- G. HOTTIN, 1976.** Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2nd séries IV, 117–153.
- J. BOULANGER, 1957.** Géologie et Prospection de la région côtière du Sud-Est de Madagascar. 104 p., 15 pl., 1 pl. photo, 1958, 4 cartes hors texte.
- J. CHANTRAINE, 1967.** Géologie et prospection de la région Ambohimahasoa-Fianarantsoa-Ifanadiana. 16p., 4pl., 2 cartes géologiques hors texte. 1968.
- JOURDE, G., RASAMOELINA, D., RAVELOSON, SA, and RAZANAKOLONA, J., 1974.** Carte géologique Andravory (W34)- Antsirabe Nord (XY34), 1 :100.000. (Service géologique de Madagascar).
- KRÖNER A., et al., (2000).** Age and magmatic history of the Antananarivo Block, Central Madagascar, as derived from zircon geochronology and Nd isotopic systematics. American Journal of science 300, 251-288.
- LACROIX, A. 1922.** Minéralogie de Madagascar, Paris. Société d'Editions géographiques maritimes et coloniales, 17, rue Jacob, v.II. pp. 5-56.
- LENOBLE, A. 1935.** Les formations aurifères de la région Tsaratanana-Andriamena. Cong. Int. Mines. Metallogénie et Géologie Appliquée Tome I-II Session.
- MARTELAT J.E, LARDAUX J.M, NICOLLET C., et al. 2000.** Strain pattern and late Precambrian deformation history in southern Madagascar. Precambrian Research 102, 1-20.
- MEERT, J.G., NEDELEC, A., HALL, C., WINGATE, M.T.D., RAKOTONDRAZAFY, M., 2001.** Paleomagnetism, geochronology and tectonic implications of the Cambrian-age Carion granite, central Madagascar. Tectonophysics 340, 1–21.
- NEDELEC A., RALISON B., BOUCHEZ J.L., et al., 2000.** Structure and metamorphism of the granitic basement around Antananarivo: a key to the Panafrican history of Central Madagascar and its Gondwana connections. Tectonophysics 19, 997-1020.
- NEDELEC, A., MOINE, B., RAKOTONDRAZAFY, M., 1992.** Granulites du Sud-Est de Madagascar: thermobarométrie des leptynites de Fort-Dauphin. In: 14e`me Re`union Sciences Terre, Toulouse, p. 113.
- NEDELEC, A., PAQUETTE, J.-L., BOUCHEZ, J.-L., OLIVIER, P., RALISON, B., 1994.** Stratoid granites of Madagascar: structure and position in the Panafrican orogeny. Geod. Acta 7, 48–56.
- NOIZET, G., and RAZAFIMANANTSOA, 1958.** Antanambao-Manampotsy 100 000 geological map.

- PAQUETTE, J.L., NEDELEC, A., 1998.** A new insight into Pan-African tectonics in the East–West Gondwana collision by U–Pb zircon dating of granites from central Madagascar. *Earth and Planetary Science Letters* 155, 45– 56.
- PART-ENANDER EVA, SJOBERG ANDERS, MELIN BO:** The Matlab Handbook, Addison-Wesley, 1996.
- RAHARIMAHEFA, T. and KUSKY, T. M. 2006.** Structural and remote sensing studies of the southern Betsimisaraka Suture, Madagascar. *Gondwana Research*. Vol. 10. pp. 186-197.
- RANAIVOARIVELO ANDRIAMANANTENA, 1997,** Etude pétrographique et géochimique du gisement de quartzites à magnétite de Soalala Nord-Ouest Madagascar, Univ. Paul Sabatier Toulouse III, spécialité : minéralogie-metallogénie.
- RANTOANINA, M. 1958.** Carte géologique au 1/100.000ème des feuilles Kianjavato-Antsenavolo-Mananjary. Service Géologique de Madagascar, Antananarivo.
- RASOAMAHENINA, J. A., 1967.** Etude géologique et travaux de recherche effectués sur les gisements de graphite de la région de Tamatave-Moramanga. Archives du service géologique de Madagascar. Vol A2099, 97.
- TUCKER, R.D., ASHWAL, L.D., HANDKE, M.J., HAMILTON, M.A., Le GRANGE, M., RAMBELOSON, R.A., 1999.** U–Pb geochronology and isotope geochemistry of the archaean and proterozoic rocks of north-central Madagascar. *J. Geol.* 107, 135–153.
- WINDLEY, B.F., RAZAFINIPARANY, A., RAZAKAMANANA, T., ACKERMANN, D., 1994.** Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections: a review and reappraisal. *Geol. Rundsch.* 83, 642–659.

## WEBOGRAPIES

- <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- <http://srtm.usgs.gov/>
- <http://glcf.umiacs.umd.edu/>
- <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SWBDeast/>
- <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/maant/pg/lappalainen/combinin.pdf>
- <http://www.monanneaucollege.com/4.svt.chap2.htm>
- <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003938/en/>
- <http://www.geologie.ens.fr/~arobert/teaching/erosion-continentale.pdf>
- <http://lgca.obs.Ujf-grenoble.fr/perso/mduberne/gites-mx.pdf>

## **AUTRES**

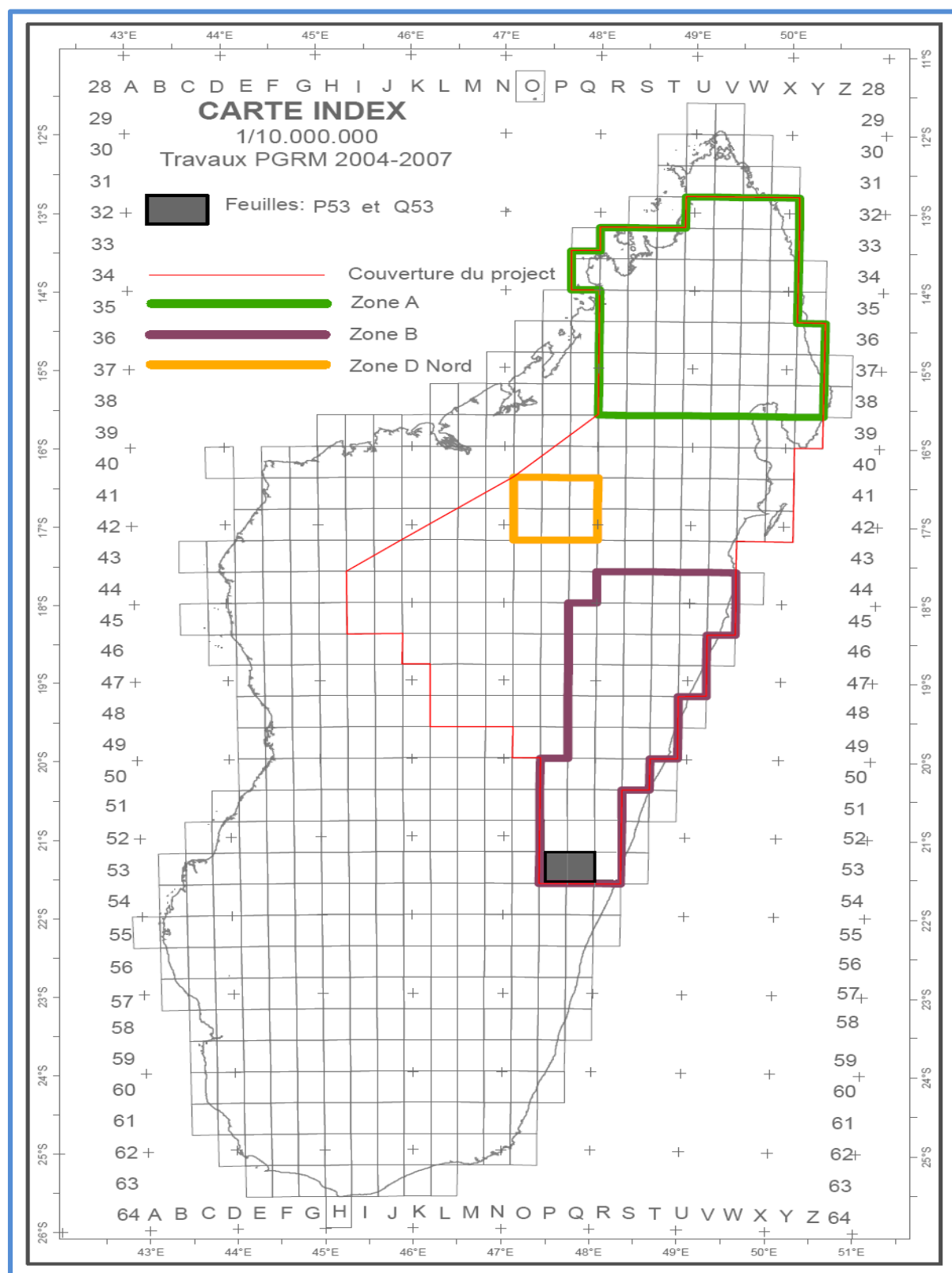
**MICROSOFT ENCARTA, 2008**, Métamorphisme, phénomène d'Altération-transport-dépôt, les éléments chimiques, tableau périodique des éléments.

**SAR, 2006**, Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna

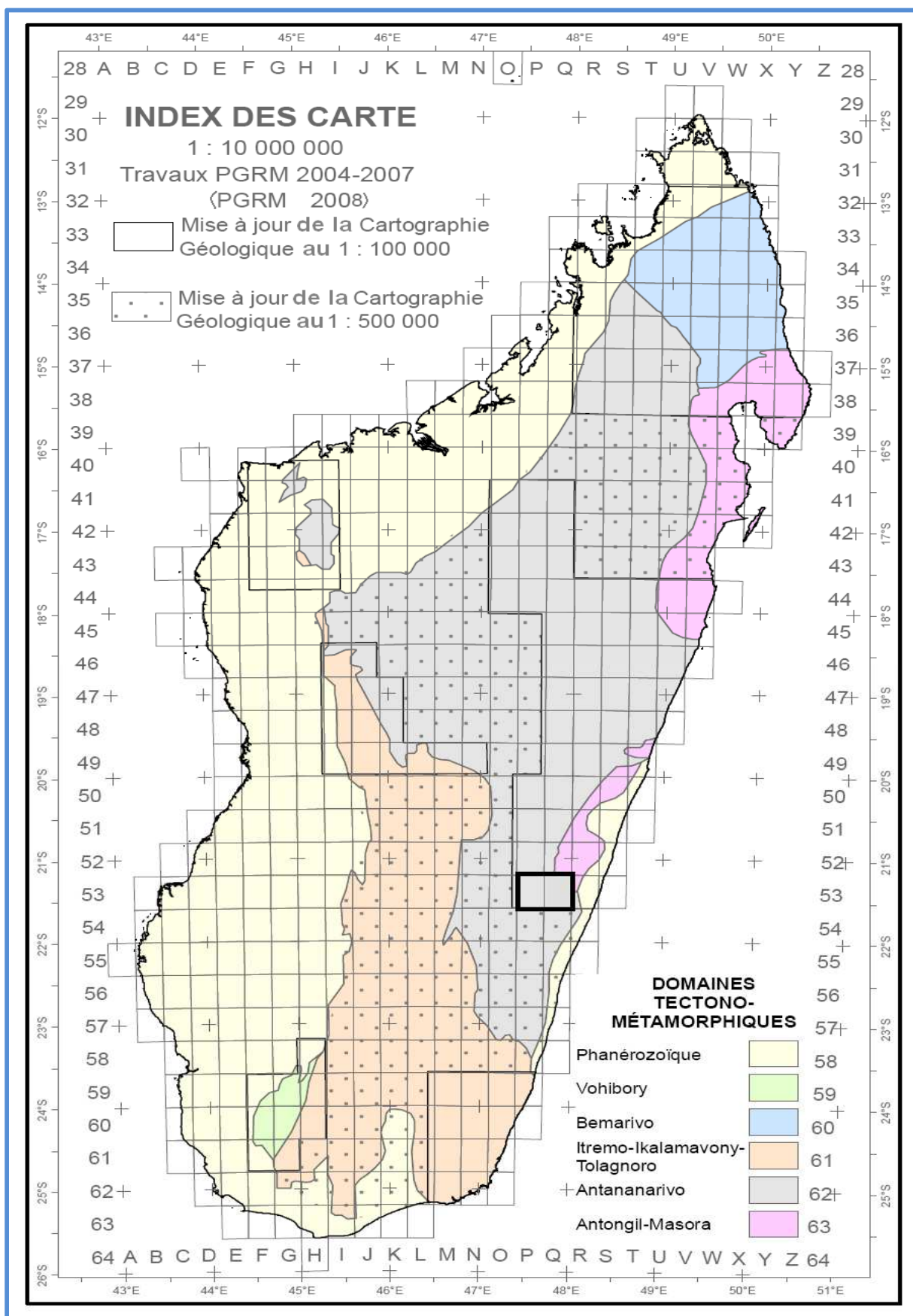


## LISTE DES ANNEXES

### Annexe 1: Carte des index, indices et géochimie de l'or.



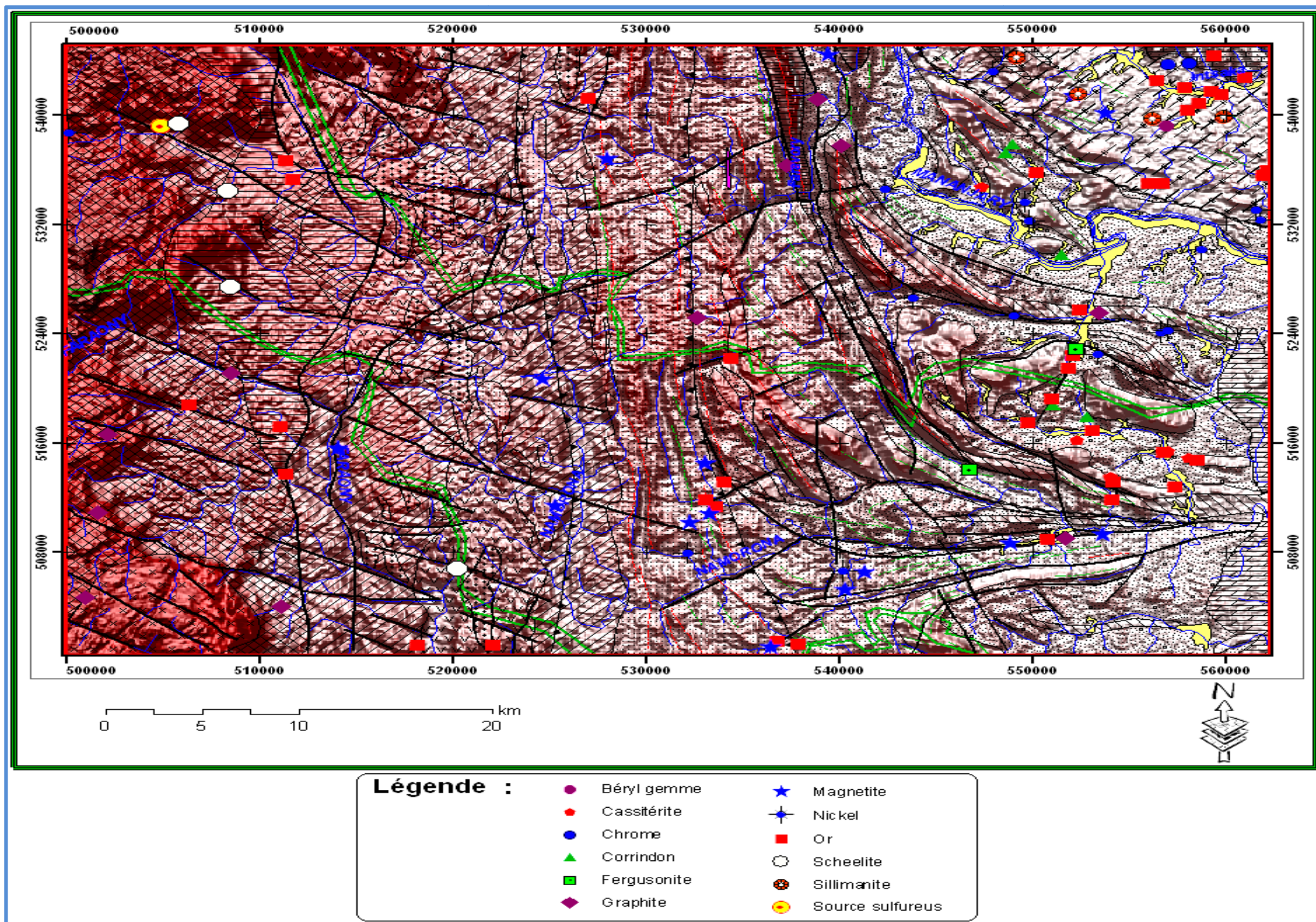
Limite de la zone A, B et D Nord



Domaines tectono-métamorphiques et limites des feuilles PQ53







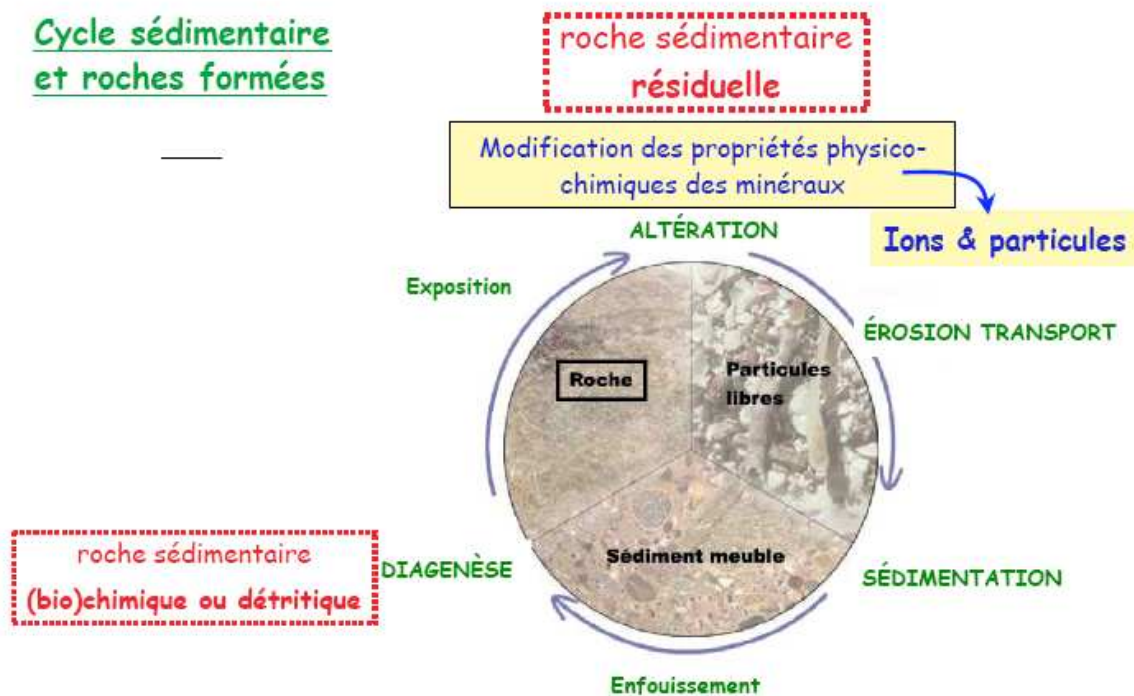


## Processus et produits d'altération

### Introduction

Poszwa Anne. LIMOS UHP - 2007 -M1

#### Cycle sédimentaire et roches formées

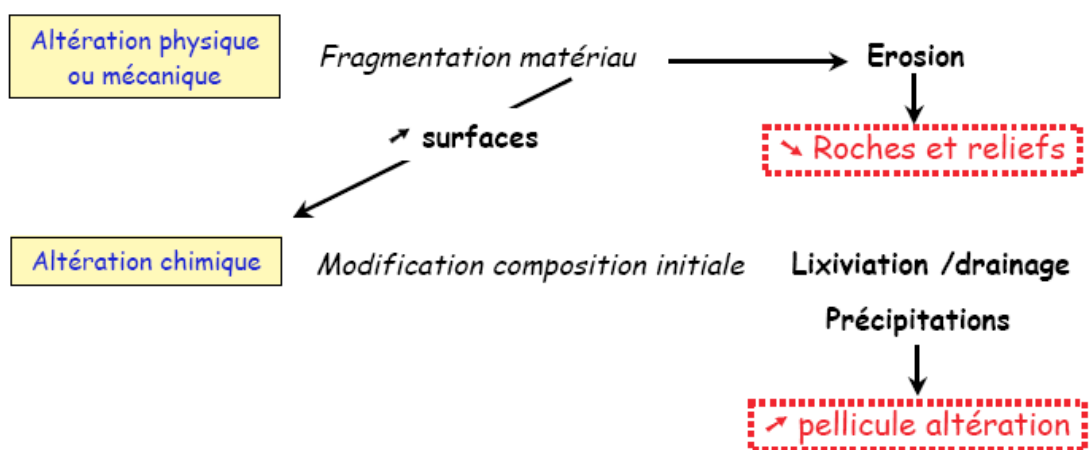


1

## Processus et produits d'altération

### Introduction

#### 2 modes d'altération



Formations superficielles résultantes = **ALTÉRITES**

**SOLS** = complexe d'altération ± évolué

2

# I. Altération chimique et biochimique

## 1. Agents

### Action de l'eau

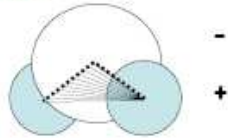
A la base de toutes les altérations exogènes des roches

Acide faible

$H^+$

hydrolyse

Dipôle

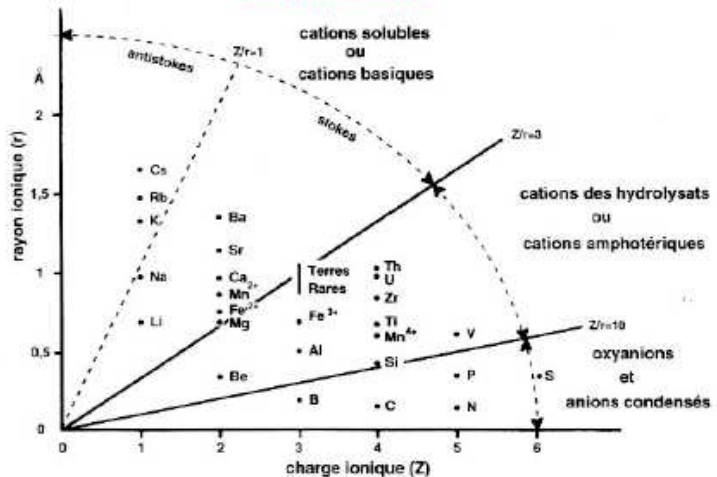


attraction / ions

Fonction du potentiel ionique :

$$\frac{\text{charge (e)}}{\text{rayon ionique (r)}}$$

Diagramme de Goldschmidt



# I. Altération chimique et biochimique

## 1. Agents

Oxygène

Provient de l'air ou de la réduction d'oxydes

Oxydations

Gain d'O ou perte e-

Gaz carbonique

Air / activité biologique

Pression relative dans sol 3 à 5 fois supérieure à air

Renforce activité eau

Acide faible

Acides organiques

Bactéries, racines, MO

minéraux

Orages (S), activités homme (N, S)

Agents actifs de destruction

Température

Vitesse d'altération

X 2 quand  $\nearrow 10^\circ$

Conditions de drainage (eaux)

Lessivage, réductions

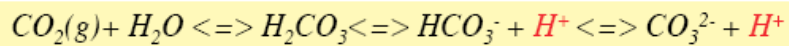
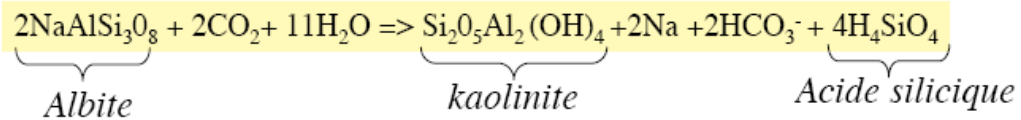


## I. Altération chimique et biochimique

### 2. Réactions chimiques

---

**Hydrolyse** Action acide carbonique sur minéraux riches en cations



Consommation ions  $\text{H}^+$

Réactions plus poussées dans milieux bien drainés

⇒ renouvellement ions  $\text{H}^+$

⇒ élimination ions en solution

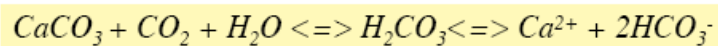
6

## I. Altération chimique et biochimique

### 2. Réactions chimiques

---

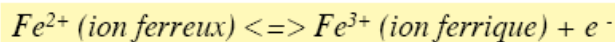
**Dissolution** Décomposition d'un minéral en ces ions constitutifs



Dissolution carbonates

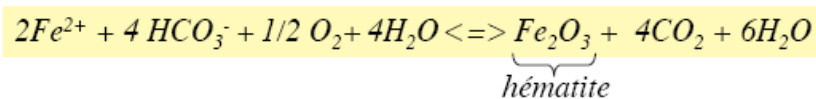
≠ hydrolyse où il reste une phase insoluble

**Oxydation** Perte d'électrons lors de la formation de nouveaux produits



⇒ Oxygène : élément oxydant le plus répandu

⇒ éléments les plus facilement oxydables : Fe et Mn



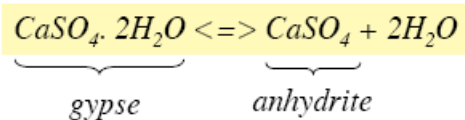
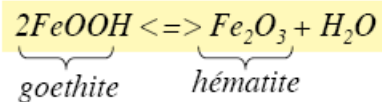
7

## I. Altération chimique et biochimique

### 2. Réactions chimiques

#### Hydratation / déshydratation

Perte ou gain de molécules d'eau faisant partie de la structure du minéral



8

## I. Altération chimique et biochimique

### 3. Mécanismes selon les types de roches

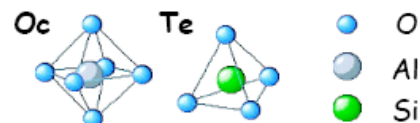
#### Roches sédimentaires

Beaucoup résultent déjà de processus d'altération

\* Sables

\* Argiles

Silicates d'aluminium ± hydratés,  
Structure en feuillet (phyllites)



#### Propriétés particulières :

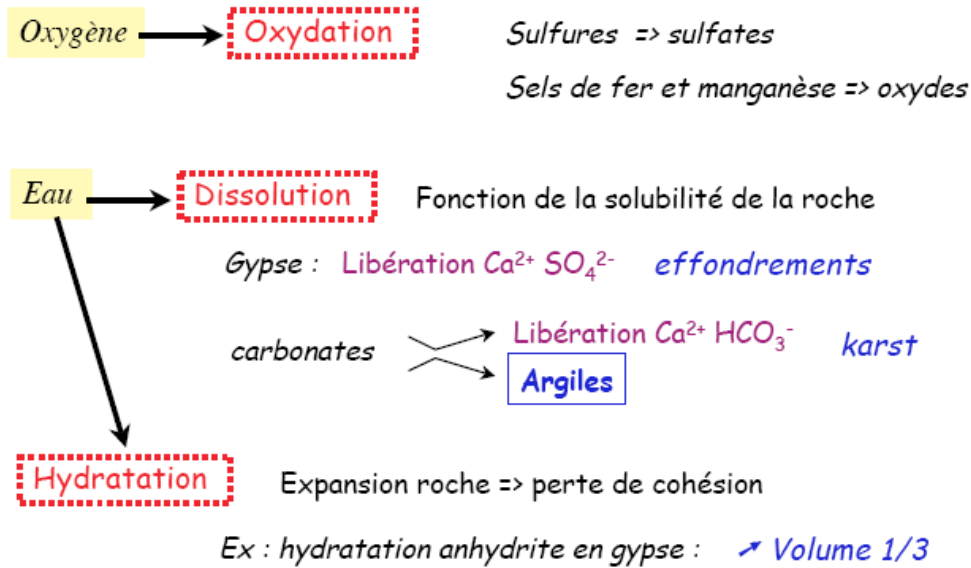
Charges négatives (substitutions) => adsorption cations échangeables

Adsorption d'eau entre feuillets => argiles gonflantes

Rôle dans la formation des agrégats avec MO => « ciment »

9

## Roches sédimentaires

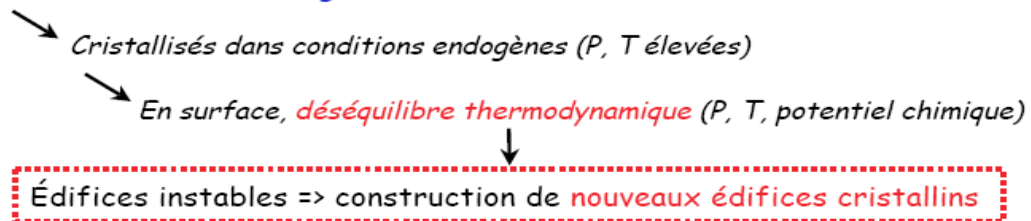


Quelques formations superficielles résultantes : terra rossa, loess...

10

## Roches magmatiques et métamorphiques

Formées d'un assemblage de minéraux



**Vulnérabilité** fonction des **minéraux** et de la **structure** de la roche

Influence de la structure À sensibilité égale des minéraux

Roches à gros grains plus altérables que roches à grains fins

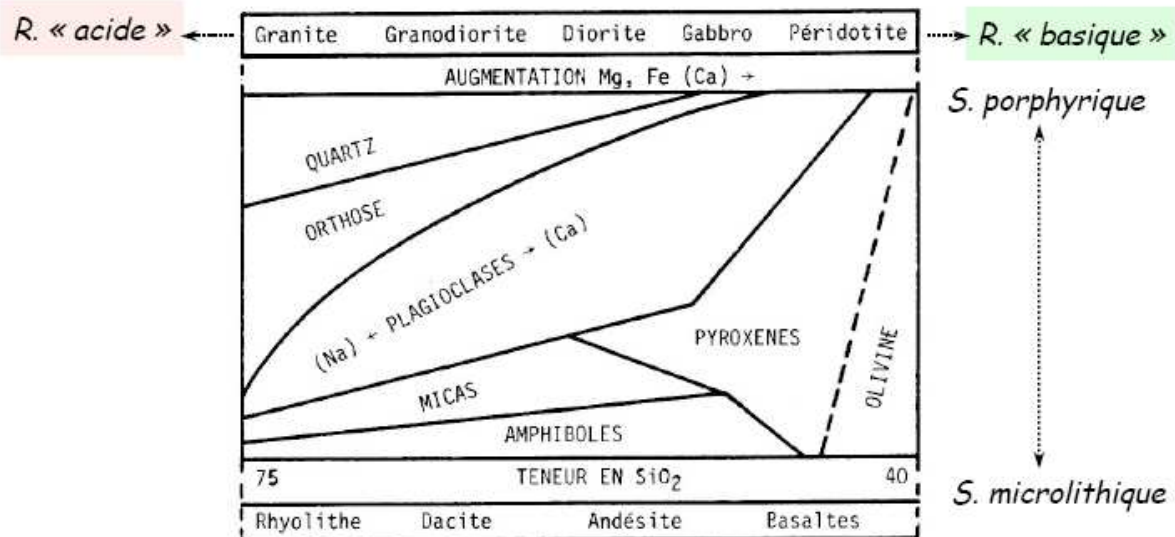
Ex pegmatites      Ex aplites

Granites intermédiaires

11

## Roches magmatiques et métamorphiques

### Composition des principales roches magmatiques



*Abondance des silicates*

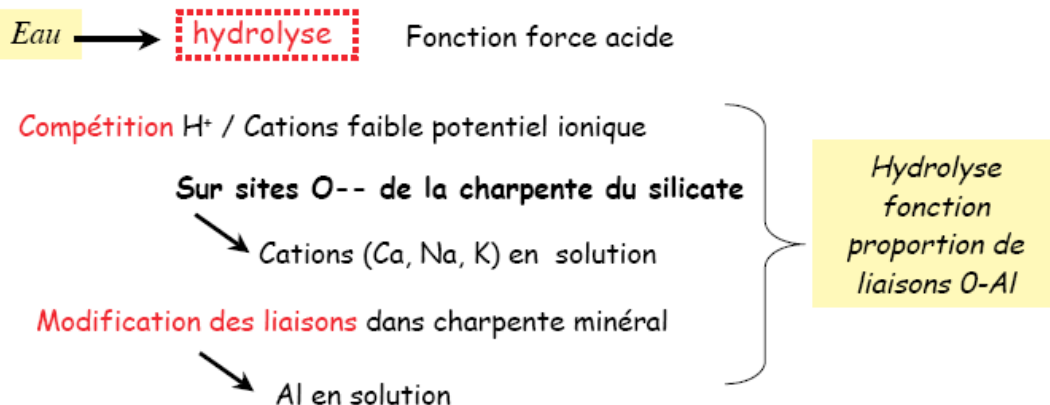
12

## Roches magmatiques et métamorphiques

### Ordre de stabilité des minéraux (d'après Goldich 1938)

Quartz > muscovite > feldspath K > biotite > plagioclases Na > plagioclases Ca

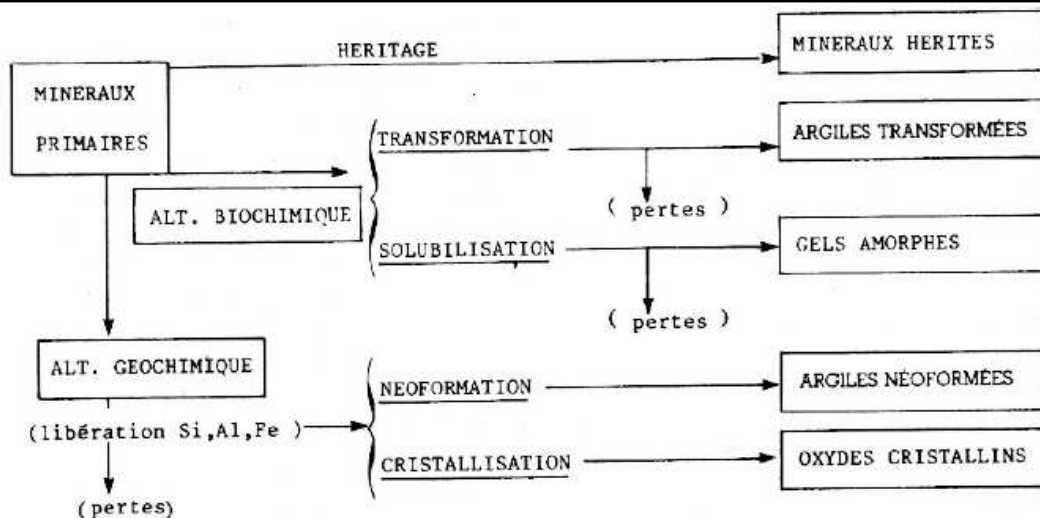
### Mécanismes d'altération des silicates :



13

## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés



> **Héritage** Simple microdivision sans transformation chimique : **Quartz**

> **Transformations** Transformation chimique mineure (perte certains ions) mais conservation de la structure : **Mica => illites, vermiculites**

> **Néoformation** Perte ions et cristallisation **in situ** des éléments restants

14

## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés

> **argiles Te-Oc (1/1)** Pas de substitution dans les couches, **dioctaédrique** ( $C^{3+}$ )

Épaisseur constante des feuillets accolés (7 Å), charge nulle

**Kaolinite**

Ép. variable (intercalation  $H_2O$  : 10 Å) **Halloysite**

> **argiles Te-Oc-Te (2/1)**

**Substitution Tétraédrique** (a. micacées)  $Si^{4+} \Rightarrow Al^{3+}$  **Pouvoir fixateur de K**

**Dioctaédrique** (Al 2/3 Oc)

Ép. constante des feuillets (10 Å) **Illite**

Ép. variable (15 Å) **Vermiculite dioctaédrique**

**Trioctaédrique** (Mg 3/3 Oc)

Ép. constante (10 Å) **Illites trioctaédrique**

Ép. variable (15 Å,  $f(H_2O)$ ) **Vermiculite**

élimination K  
charges -

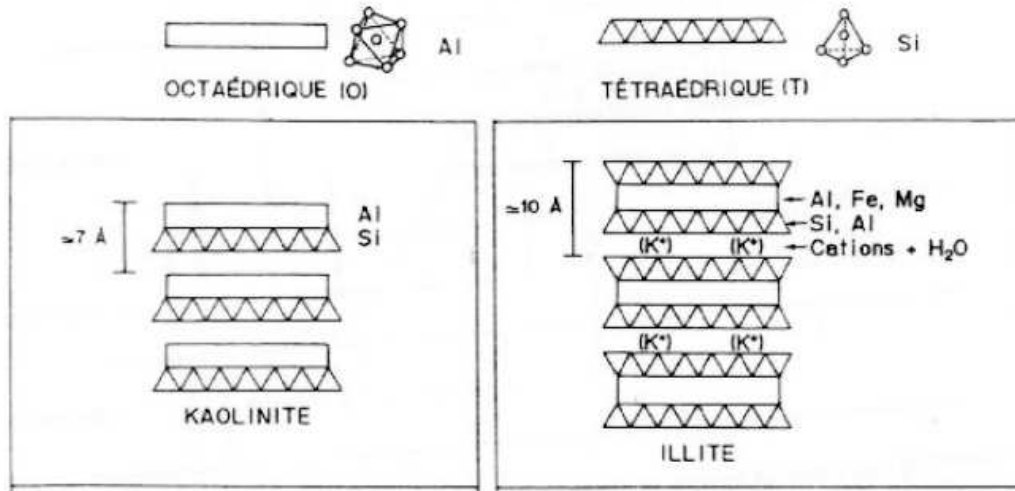
Ouverture feuillets  
+ Ca, Mg,  $H_2O$

15



## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés



Structure de quelques minéraux argileux

16

## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés

**Substitution Octaédrique**  $Al^{3+} \Rightarrow Mg^{2+}$

Faible pouvoir fixateur de K

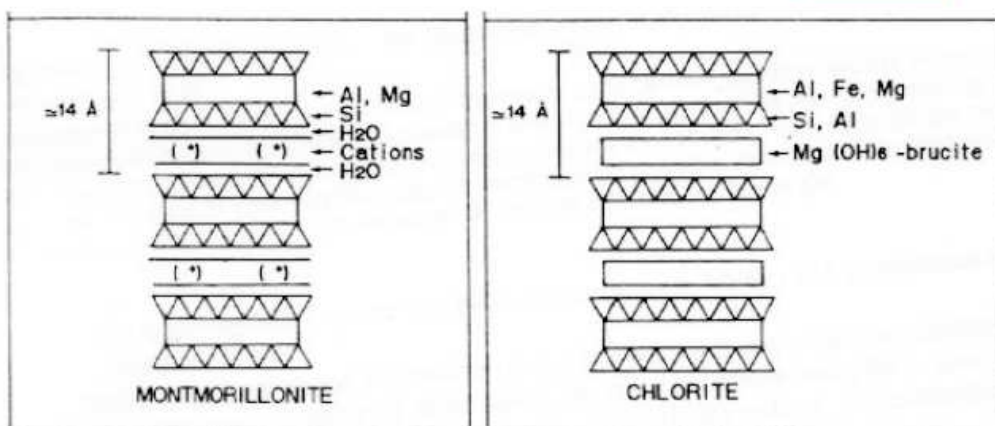
Ép. variable (> 20 Å, f(H<sub>2</sub>O)), Dioctaédrique .....

**Smectites  
Montmorillonites**

> argiles Te-Oc-Te-Oc (2/1/1) Trioctaédrique

Épaisseur constante des feuillets, Charges nulles .....

**Chlorites**



17

## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés

---

#### > Oxyhydroxydes de fer

\* **Forme ionique** échangeable :  $\text{Fe}^{3+}$  Très rare en milieu aéré (sauf si très acide)

→ **Forme complexée**  $\Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2^+$  : ion hydroxylé non échangeable

→ **Forme amorphe**  $\Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$  : hydrate ferrique insoluble agrég. A-MO-Fe

\* **Formes cristallines**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{goethite } (\alpha\text{FeO.OH}) \\ \text{hematite } (\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3) \\ \dots \end{array} \right.$  ↓ 
 ↘ MO complexante  
 ↗ T & Humectation- dessiccation

18

## II. Produits d'altération

### 1. Grands types de minéraux rencontrés

---

#### > Oxyhydroxydes d'aluminium

\* **Forme ionique** échangeable :  $\text{Al}^{3+}$  Bien présent en milieu aéré (si  $\text{pH} < 5$ )

\* **Formes hydroxylées** complexes  $\Rightarrow \text{Al}(\text{OH})_2^+, \text{Al}(\text{OH})_3$  : Quand  $\text{pH} > 5$

peu échangeables  $\Rightarrow$  agrég. A-MO-Al

ou Cale entre feuillets A

\* **Formes amorphes**  $\Rightarrow$  **allophanes** Abondance MO : frein cristallisation

\* **Forme cristalline**  $\Rightarrow$  **gibbsite** Milieu très drainé, pauvre en MO

...

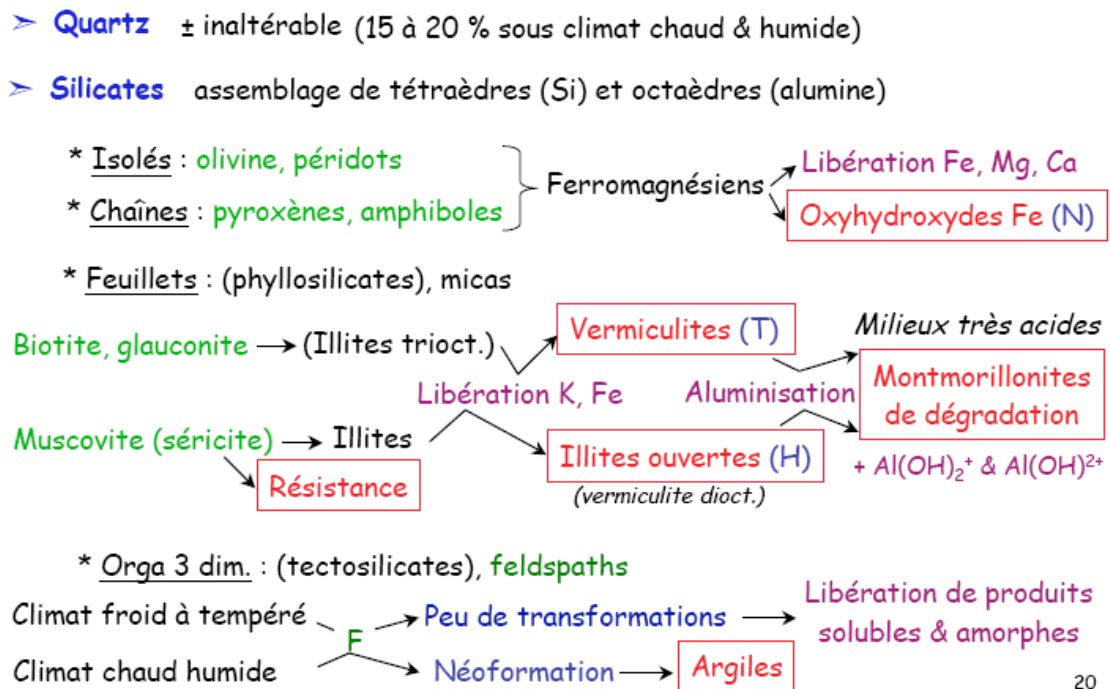
excès de Al/Si  $\Rightarrow$  Cristallisation Al Kaolinite (N)

ou Substit. Fe  $\Rightarrow$  Al ds goethite

19

## II. Produits d'altération

### 2. Origine : les minéraux primaires



20

### 2. Origine : les minéraux primaires

**Altération différentielle des minéraux primaires**  
(d'après Tardy 1969)

|     | Quartz                                                                                      | Vermiculite           | Montmorillonite       | Kaolinite             | Gibbsite              |                                    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|
| I   | Quartz<br>Muscovite →<br>Feldspath-K →<br>Biotite →<br>Feldspath - Na →<br>Feldspath - Ca → | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | MILIEU FERMÉ<br>Faiblement lessivé |
| II  | Quartz<br>Muscovite →<br>Feldspath-K →<br>Biotite →<br>Feldspath - Na →<br>Feldspath - Ca → | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | MILIEU INTERMÉDIAIRE               |
| III | Quartz<br>Muscovite →<br>Feldspath-K →<br>Biotite →<br>Feldspath - Na →<br>Feldspath - Ca → | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | →<br>→<br>→<br>→<br>→ | MILIEU OUVERT<br>Très lessivé      |

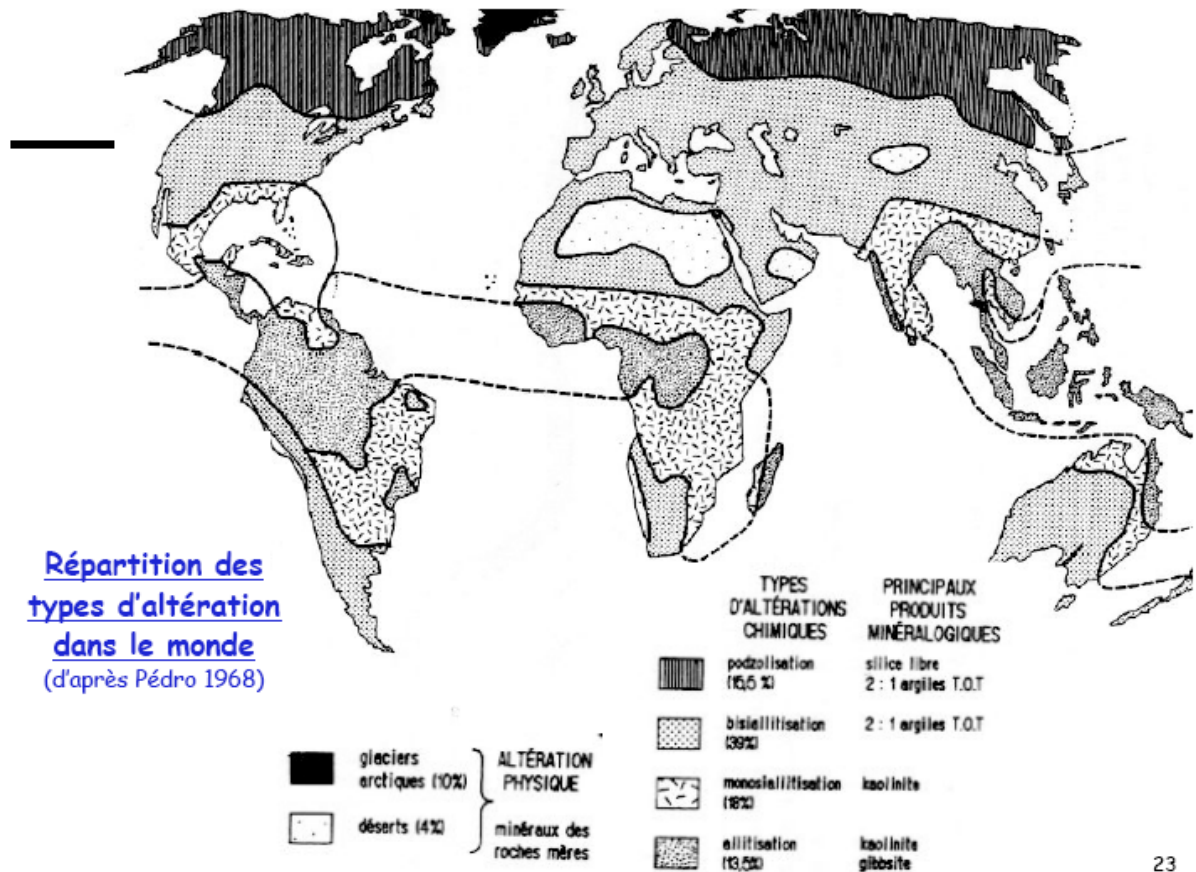
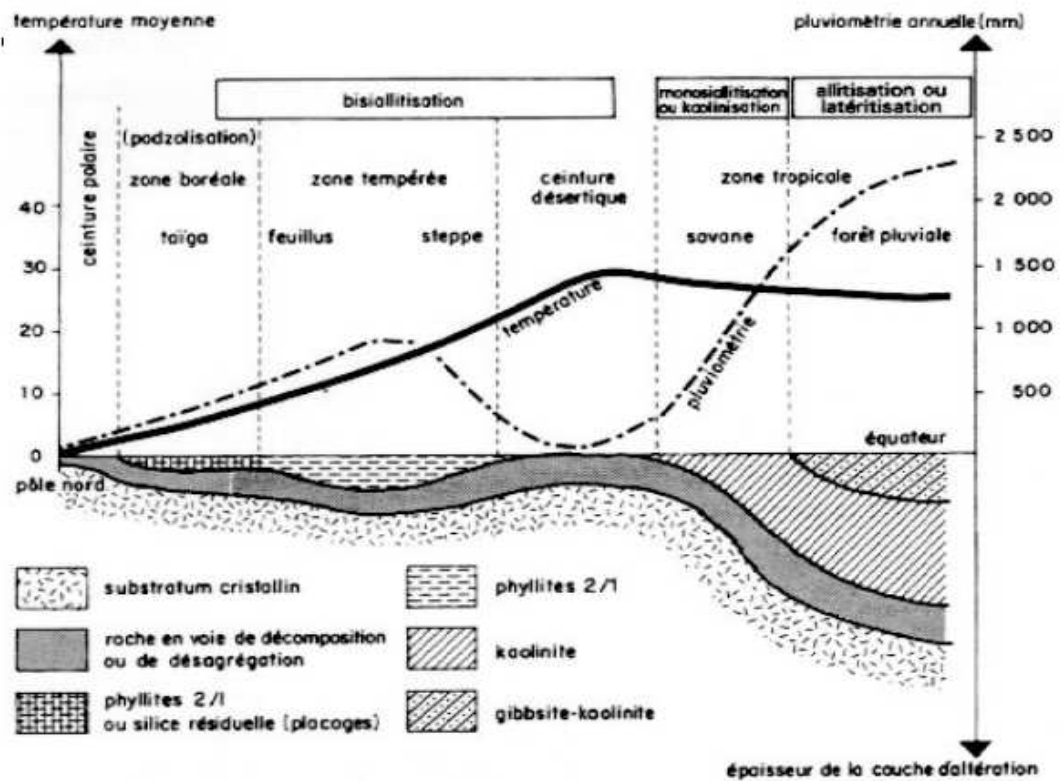
**Séquences spécifiques d'altération des minéraux parcourues à des vitesses ≠**

- Fonction de la résistance des minéraux primaires (goldich, 1938)
- Fonction des conditions de milieu (drainage et renouvellement de la solution).

21

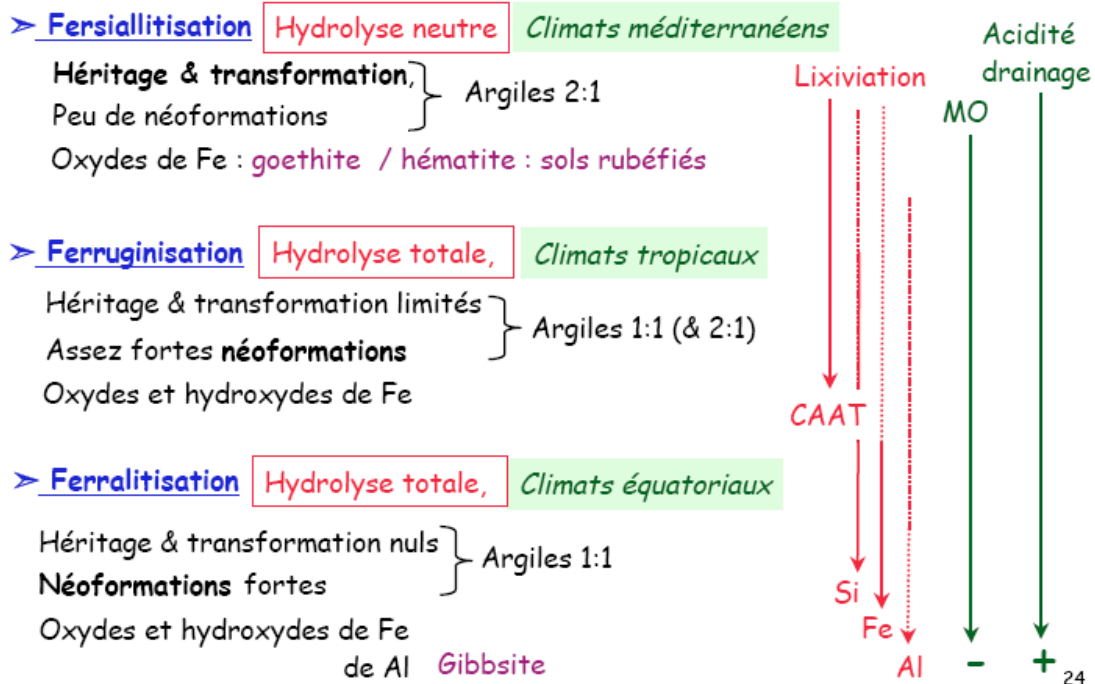
### 3. Importance du climat sur les profils d'altération

Épaisseur des principaux horizons selon la latitude  
(d'après Pédro 1975)





## 4. Altération géochimique



## 4. Altération géochimique

### ➤ Hydrolyse totale

#### ➤ Influence du drainage local et du pH

|         | Drainage            | pH    | Argiles néoformées               |
|---------|---------------------|-------|----------------------------------|
| Stade 1 | Milieu confiné      | > 7   | <b>Smectite, montmorillonite</b> |
| Stade 2 | Milieu semi-confiné | acide | <b>Kaolinite</b>                 |
| Stade 3 | Milieu drainant     | acide | <b>Gibbsite</b>                  |

#### ➤ Influence du facteur temps

Succession fréquente des 3 stades

*Si minéraux altérables et milieu très drainé*

Stade 2 : équilibre sur **matériau acide**

Stade 3 : ne se produit que sur les **roches initialement pauvres en Si**

25



### III Latérites

#### 1. Intérêt des couvertures latéritiques

**Latérites** : produits communs de l'altération des roches sous les climats tropicaux

*Later = brique* (Buchanan 1807)

##### Sens restreint ancien

**Matériaux indurés** ou s'indurant à l'air,  
=> fabrication maisons (tropiques)



##### Sens large

Tous les **matériaux meubles ou indurés, riches en hydroxydes de Fe ou Al**



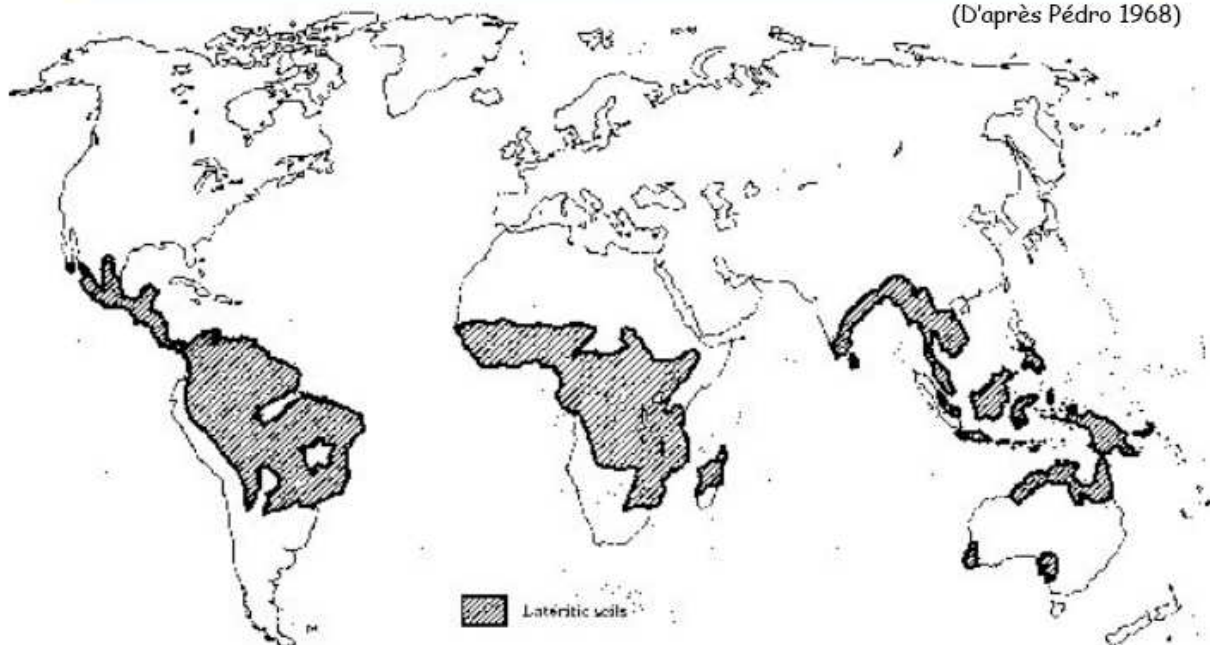
- > processus évolué d'altération
- > redistribution des produits d'altération

- Carapace ou cuirasse latéritique
- croûtes à l'intérieur du sol

26

#### Répartition mondiale des sols latéritiques en développement ou conservés

(D'après Pédro 1968)



Domaine intertropical = 40% de la surface des terres émergées

- zones désertiques et de steppes

=> **33% des continents**

27



## 1. Intérêt des couvertures latéritiques

Sols « maigres, lessivés et appauvris en éléments nutritifs fertilisants

Végétation abondante mais **fragile** de grande **forêt équatoriale**

└─→ « poumon du monde » ─→

**compartiment de  
l'écosystème forestier**

Siège de concentration de substances utiles

→ **Gîtes métallifères latéritiques**

Al, Fe, Mn, Ni et Cu,  
Au, Pb, Cr, Ti, P, REE

Couvertures latéritiques souvent argileuses, **poreuses** mais très peu perméables

**Réserve importante des aquifères**

**Filtre** de près de la moitié de l'écoulement continental global

## 2. Profils verticaux

### 4 grands ensembles dans un profil latéritique

(qq m à qq dizaines de m, voir > 100 m)

|                             |                                    |                                   |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Sol latéritique s.l.        | Transformation et amincissement    | ↑ altération chimique<br>↑ argile |
| Saprolite fine / lithomarge | Maturité et équilibre              |                                   |
| Saprolite grossière / arène | Transition, départ de l'altération |                                   |
| Roche mère                  | Origine du profil                  |                                   |

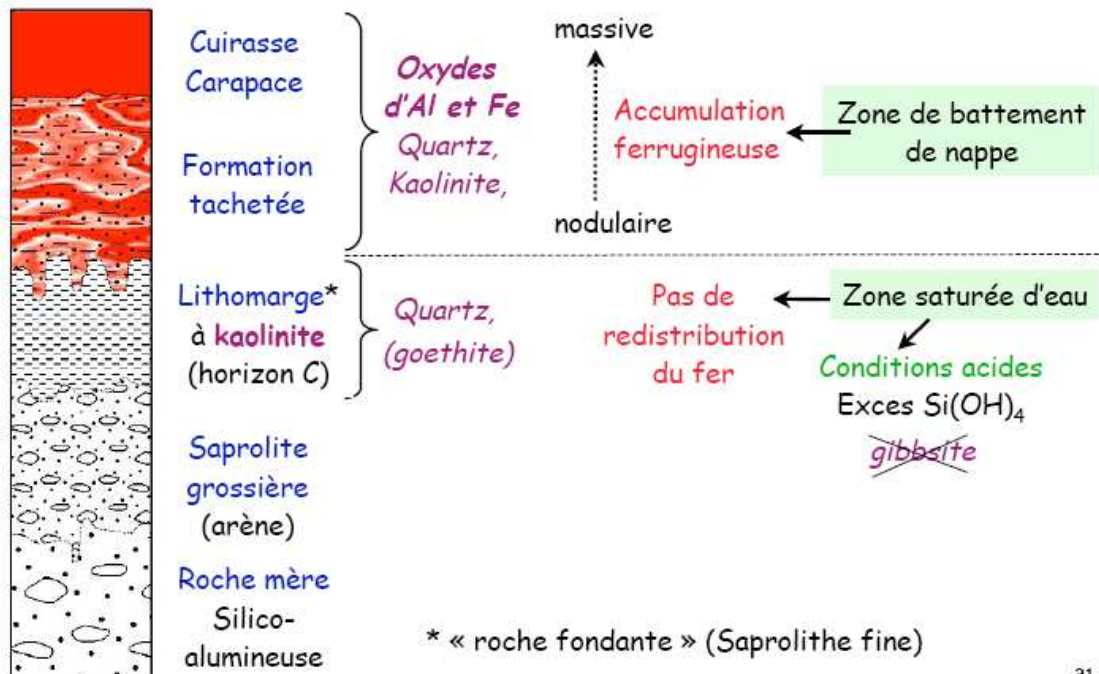
**Saprolite** : « roche pourrie », faciès basal de tout profil d'altération à architecture parentale conservée

- *grossière* : dominée par *fragments roche mère et minéraux primaires*
- *fine* : dominée par *minéraux secondaires d'altération*

30

## 2. Profils verticaux

(Retallack 1997)



31

## 2. Profils verticaux

---

2 facteurs essentiels à leur formation :

➤ TEMPS LONG

➤ CLIMAT chaud et humide ➡ **EAU**

\* Hydratation et déshydratation

\* Hydrolyses

} domaines de stabilité  
des minéraux



**Indicateurs de climats**

32



### Annexe 3: Tableau périodique des éléments.

| Tableau périodique des éléments |          |          |          |                         |           |           |           |                      |           |           |           |                |            |            |            |            |            |            |
|---------------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| >                               | 1        | 2        | 3        | 4                       | 5         | 6         | 7         | 8                    | 9         | 10        | 11        | 12             | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         |
| V                               | I A      | II A     | III B    | IV B                    | V B       | VI B      | VII B     | VIII B               | VIII B    | VIII B    | IB        | IIB            | III A      | IV A       | V A        | VI A       | VII A      | VIII A     |
| 1                               | 1<br>H   |          |          |                         |           |           |           |                      |           |           |           |                |            |            |            |            |            | 2<br>He    |
| 2                               | 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |                         |           |           |           |                      |           |           |           |                | 5<br>B     | 6<br>C     | 7<br>N     | 8<br>O     | 9<br>F     | 10<br>Ne   |
| 3                               | 11<br>Na | 12<br>Mg |          |                         |           |           |           |                      |           |           |           |                | 13<br>Al   | 14<br>Si   | 15<br>P    | 16<br>S    | 17<br>Cl   | 18<br>Ar   |
| 4                               | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti                | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe             | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn       | 31<br>Ga   | 32<br>Ge   | 33<br>As   | 34<br>Se   | 35<br>Br   | 36<br>Kr   |
| 5                               | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr                | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru             | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd       | 49<br>In   | 50<br>Sn   | 51<br>Sb   | 52<br>Te   | 53<br>I    | 54<br>Xe   |
| 6                               | 55<br>Cs | 56<br>Ba | *        | 72<br>Hf                | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os             | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg       | 81<br>Tl   | 82<br>Pb   | 83<br>Bi   | 84<br>Po   | 85<br>At   | 86<br>Rn   |
| 7                               | 87<br>Fr | 88<br>Ra | **       | 104<br>Rf               | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs            | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Uub     | 113<br>Uut | 114<br>Uuq | 115<br>Uup | 116<br>Uuh | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |
| * Lanthanides                   |          |          | 57<br>La | 58<br>Ce                | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm             | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy       | 67<br>Ho   | 68<br>Er   | 69<br>Tm   | 70<br>Yb   | 71<br>Lu   |            |
| ** Actinides                    |          |          | 89<br>Ac | 90<br>Th                | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu             | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf       | 99<br>Es   | 100<br>Fm  | 101<br>Md  | 102<br>No  | 103<br>Lr  |            |
| Métalloïdes                     |          |          |          | Non-métaux              |           |           |           | Halogènes            |           |           |           | Gaz nobles     |            |            |            |            |            |            |
| Métaux alcalins                 |          |          |          | Métaux alcalino-terreux |           |           |           | Métaux de transition |           |           |           | Métaux pauvres |            |            |            |            |            |            |
|                                 |          |          |          | Lanthanides             |           |           |           | Actinides            |           |           |           |                |            |            |            |            |            |            |

Tableau périodique des éléments

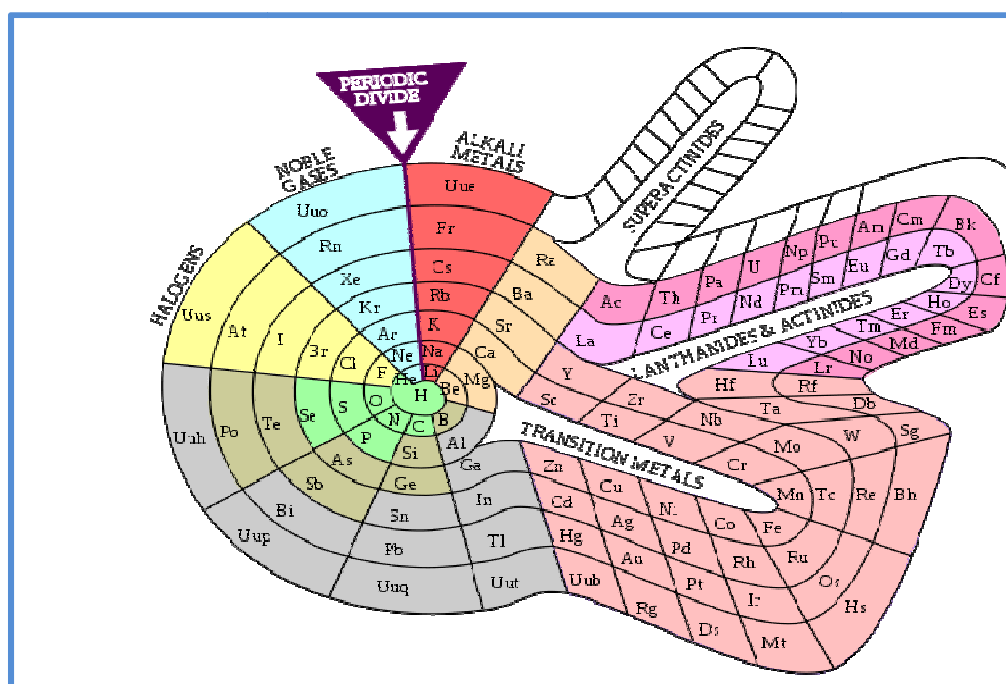


Tableau périodique en spirale de Theodor Benfey.

Le **tableau périodique des éléments**, également appelé **table de Mendeleïev**, **classification périodique des éléments** ([CPE](#)) ou simplement **tableau périodique**, représente tous les [éléments chimiques](#), ordonnés par [numéro atomique](#) croissant et organisés en fonction de leur [configuration électronique](#), laquelle sous-tend leurs propriétés chimiques.



Son invention est généralement attribuée au chimiste russe [Dimitri Mendeleïev](#), qui construisit en 1869 une table différente de celle qu'on utilise aujourd'hui mais similaire dans son principe, dont le grand intérêt était de proposer une classification systématique des éléments chimiques connus à l'époque en vue de souligner la périodicité de leurs propriétés chimiques, d'identifier les éléments qui restaient à découvrir, et même de pouvoir prédire les propriétés de ces éléments alors inconnus.

Le tableau périodique a connu de nombreux réajustements depuis lors jusqu'à prendre la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, et est devenu un référentiel universel auquel peuvent être rapportés tous les types de comportements physique et chimique des éléments. En [juin 2009](#), sa forme standard comportait 117 éléments, allant de  ${}^1\text{H}$  à  ${}_{118}\text{Uuo}$ , à l'exception de l'[élément 117](#) qui n'a pas encore été synthétisé.

**Dans des conditions normales de température et de pression (0 °C, 1 atm) :**

- Les éléments dont le numéro atomique est **rouge** sont **gazeux** ;
- Les éléments dont le numéro atomique est **bleu** sont **liquides** — il n'y en a que deux à 0 °C : le **brome** (35) et le **mercure** (80)<sup>3</sup> ;
- Les éléments dont le numéro atomique est **noir** sont **solides**.

**Dans la nature :**

- Les éléments avec une bordure continue grise peuvent être trouvés naturellement sur [Terre](#), sous la forme d'un ou plusieurs isotopes stables.

- Les éléments avec une bordure en tirets fins noirs apparaissent naturellement lors de la désintégration d'autres éléments chimiques, mais n'ont pas d'[isotopes](#) plus anciens que la [Terre](#).

- Les éléments avec une bordure en pointillés fins bleus sont artificiels ([éléments synthétiques](#)).

- Les éléments sans bordure n'ont pas encore été observés — au 30 juin 2009, il n'en restait plus qu'un : l'[élément 117](#).

#### Annexe 4: Quelques notions des bases théoriques de la géochimie.

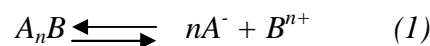
##### ■ Bases théoriques de la géochimie

Le sol est un système hétérogène car il comporte plusieurs phases qui réagissent par leurs surfaces de contact. Les réactions géochimiques sont des réactions hétérogènes entre solution et phase solide. Nous étudierons dans ce chapitre trois réactions de changement de phase qui peuvent contribuer à la formation de la minéralisation à substances utiles : les réactions de précipitation-dissolution de minéraux alcalins, les réactions d'échanges cationiques et les réactions d'oxydo-réduction ; ces dernières étant soit des réactions hétérogènes, soit des réactions homogènes.

##### ■ La précipitation et la dissolution des minéraux alcalins

###### *Concepts théoriques*

La réaction de dissolution-précipitation d'un minéral  $A_nB$  s'écrit :



Comme pour toute réaction chimique, l'Enthalpie libre, ou Energie de Gibbs,  $\Delta G_r$  s'écrit :

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln \frac{(A^-)^n \cdot (B^{n+})}{(A_nB)} \quad (2)$$

Où  $\Delta G_r^0$  ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ ) est l'enthalpie libre standard à 25°C et à 1 atm., R est la constante des gaz parfaits ( $8.314 \cdot 10^{-3}$  kJ/deg.mol), T la température absolue et  $(A^-)$  et  $(B^{n+})$  et  $(A_nB)$  les activités des éléments impliqués dans la réaction. Le signe de  $\Delta G_r$  indique le sens de la réaction qui se produit vers la gauche, si  $\Delta G_r > 0$ , et, vers la droite, si  $\Delta G_r < 0$ .

A l'équilibre,  $\Delta G_r = 0$ , et on a :

$$\Delta G_r^0 = -RT \ln \frac{(A^-)_{eq}^n \cdot (B^{n+})_{eq}}{(A_nB)} \quad (3)$$

et finalement, en substituant (3) dans (2) :

$$\Delta G_r = RT \cdot \ln \left[ \frac{\frac{(A^-)^n \cdot (B^{n+})}{(A_nB)}}{\frac{(A^-)_{eq}^n \cdot (B^{n+})_{eq}}{(A_nB)}} \right] = RT \ln \left[ \frac{Q_{A_nB}}{K_{A_nB}} \right] \quad (4)$$

Avec

$(A^-)_{eq}$  et  $(B^{n+})_{eq}$ , les activités des ions  $A^-$  et  $B^{n+}$  à l'équilibre,

$K_{A_nB}$  le produit de solubilité

$Q_{A_nB}$ , le produit ionique de la solution par rapport au minéral  $A_nB$ .

La valeur du produit de solubilité dépend de la température. Les variations de la constante de masse en fonction de celles de la température sont calculées par la loi de Van't Hoff ou

ajustées pour chaque minéral selon des formulations empiriques comme, par exemple, celles de Nordstrom *et al.* (1990).

On apprécie l'état de saturation d'une solution par rapport au minéral  $A_nB$  par l'index de saturation  $IS_{AnB}$  qui s'écrit :

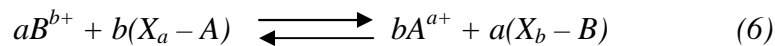
$$IS_{AnB} = \log \left( \frac{Q_{AnB}}{K_{AnB}} \right) \quad (5)$$

Une solution est sous-saturée et sur-saturée lorsque  $IS$  est, respectivement, négatif et positif : elle est à l'équilibre avec le minéral lorsque  $IS=0$ .

#### ▪ Les échanges cationiques

##### *Concepts théoriques*

Dans les milieux naturels, ce sont les minéraux argileux, la matière organique et, dans une moindre mesure, les oxydes, qui ont une capacité à échanger des cations avec la solution qui est à leur contact. L'échange de deux cations A, de valence a, et B, de valence b, entre la solution et l'échangeur X peut s'écrire comme :



Tout comme dans le cas d'une réaction de précipitation-dissolution d'un minéral, la loi d'action de masse donne l'expression de l'enthalpie libre  $\Delta G_r$  ( $kJ.mol^{-1}$ ) :

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln \frac{[A^{a+}]^b [X_b - B]^a}{[B^{b+}]^a [X_a - A]^b} \quad (7)$$

Où  $[A^{a+}]$ ,  $[B^{b+}]$ ,  $[X_a - A]$ ,  $[X_b - B]$ , sont les activités des ions  $A^{a+}$  et  $B^{b+}$ , respectivement en solution, et sur le complexe d'échanges.

A l'équilibre, on a :

$$\Delta G_r^0 = -RT \ln \left[ \frac{[A^{a+}]_{eq}^b [X_b - B]_{eq}^a}{[B^{b+}]_{eq}^a [X_a - A]_{eq}^b} \right] = -RT \ln K_{A/B} \quad (8)$$

avec  $K_{A/B}$ , la constante d'équilibre de la réaction.

En substituant (8) dans (7), on obtient finalement :

$$\Delta G_r = RT \cdot \ln \left[ \frac{\frac{[A^{a+}]^b [X_b - B]^a}{[B^{b+}]^a [X_a - A]^b}}{\frac{[A^{a+}]_{eq}^b [X_b - B]_{eq}^a}{[B^{b+}]_{eq}^a [X_a - A]_{eq}^b}} \right] \quad (9)$$

Il existe plusieurs formulations pour expliciter la constante d'équilibre K (Gapon, 1933; Gaines & Thomas, 1953). Gaines & Thomas (1953) traduisent la constante d'équilibre en un coefficient de sélectivité  $K_{A/B}^{GT}$ . Cette convention présente l'intérêt d'être cohérente du point de vue thermodynamique et de proposer une formulation des activités des cations

échangeables comme la fraction échangeable  $E$  de ces cations, qui peut être mesurée expérimentalement.

Ainsi, pour des échanges monovalents ou divalents, on peut expliciter  $K_{A/B}^{GT}$  à partir de la relation thermodynamique (9) :

$$K_{A/B}^{GT} = \frac{[A^{a+}]^b \cdot E_B^a}{[B^{b+}]^a \cdot E_A^b} \quad (10)$$

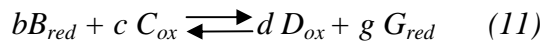
Avec  $E_A = \frac{a \cdot N_A}{a \cdot N_A + b \cdot N_B}$ ,  $N_A$  et  $N_B$ , molarités ( $\text{mol.kg}^{-1}$ ) des cations sur le complexe d'échange.

Le coefficient de sélectivité traduit un équilibre qui est dépendant de la nature minéralogique des constituants du sol et de la composition du complexe d'échanges.

### ▪ Les processus d'oxydo-réduction

#### Concepts théoriques

La réaction générale d'oxydo-réduction entre deux couples  $D_{ox}/B_{red}$  et  $C_{ox}/G_{red}$  s'écrit comme :



Tout comme les réactions de changements de phase, l'enthalpie libre de Gibbs de la réaction (11) s'écrit alors :

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln \frac{[D_{ox}]^d [G_{red}]^g}{[B_{red}]^b [C_{ox}]^c} \quad (12)$$

Où  $\Delta G_r^0$  est l'enthalpie libre standard ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ ) à 25°C et à 1 atm.,  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $8.314.10^{-3} \text{kJ/deg.mol}$ ),  $T$  la température absolue et  $(D_{ox})$ ,  $(G_{red})$ ,  $(B_{red})$ , et  $(C_{ox})$  les activités des éléments impliqués dans la réaction.

L'enthalpie libre peut être reliée au potentiel d'une réaction électrochimique par :

$$\Delta G_r = nFE \quad (13)$$

où  $n$  est le nombre d'électrons transférés pendant la réaction,  $F$  la constante de Faraday (96.42 kJ/volt) et  $E$  le potentiel électrique (Volt). On en déduit ainsi la relation de Nernst :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(D_{ox})^d (G_{red})^g}{(B_{red})^b (C_{ox})^c} \quad (14)$$

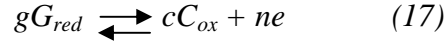
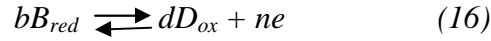
Avec  $E^0$ , le potentiel standard.

La combinaison de la relation (14) appliquée simultanément à la réaction (11) et à la réaction analogue pour le couple  $H^+/H_2$ , fournit une expression du potentiel  $Eh$  d'un couple  $D_{ox}/B_{red}$  en référence au couple  $H^+/H_2$  :

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(D_{ox})^d}{(B_{red})^b} \quad (15)$$

Il est souvent plus simple de traiter les réactions redox en ne considérant que les demi-réactions.

Ainsi la réaction 11 se décompose en deux réactions :



La constante d'équilibre  $K_{Dox-Bred}$  de (16) s'écrit :

$$K_{Dox-Bred} = \frac{(D_{ox})^d (e^-)^n}{(B_{red})^b} \quad (18)$$

Cela conduit à considérer, pour le couple  $D_{ox} / B_{red}$ , un potentiel électron  $pe$  qui se définit comme :

$$pe = -\log (e^-) \quad (19)$$

avec  $(e^-)$  l'activité de l'électron.

La valeur de  $pe$  se déduit de  $Eh$ , paramètre accessible à la mesure, par :

$$pe = \frac{F}{2.303.RT} Eh \quad (20)$$

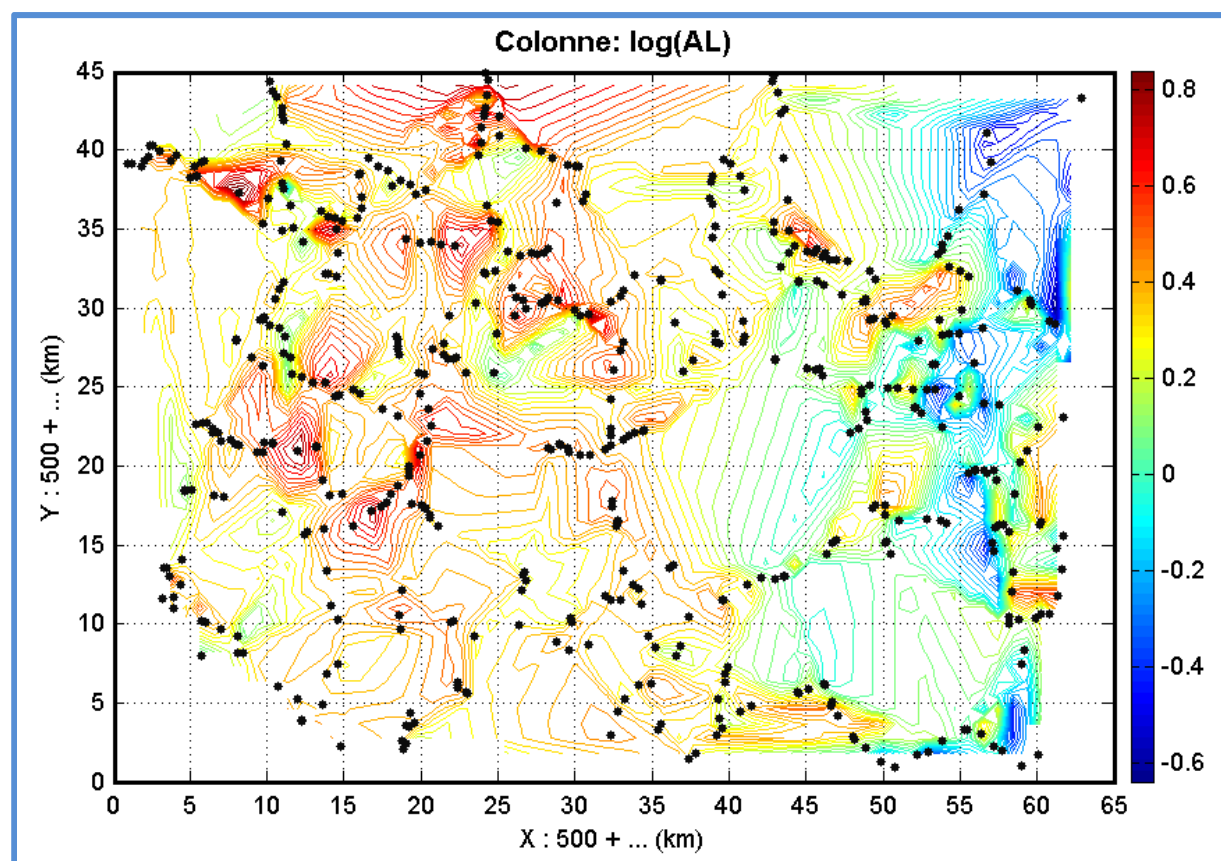
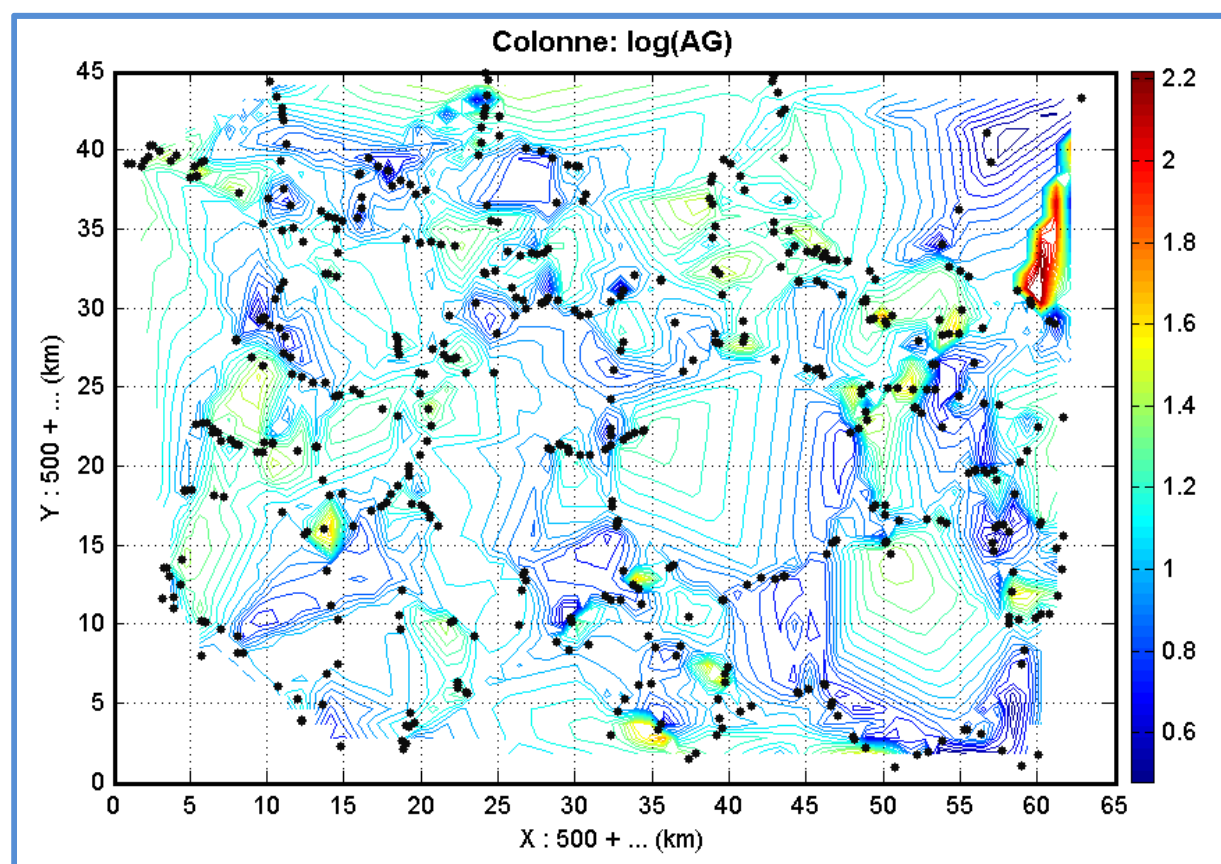
soit, à 25°C et à 1 atm.,

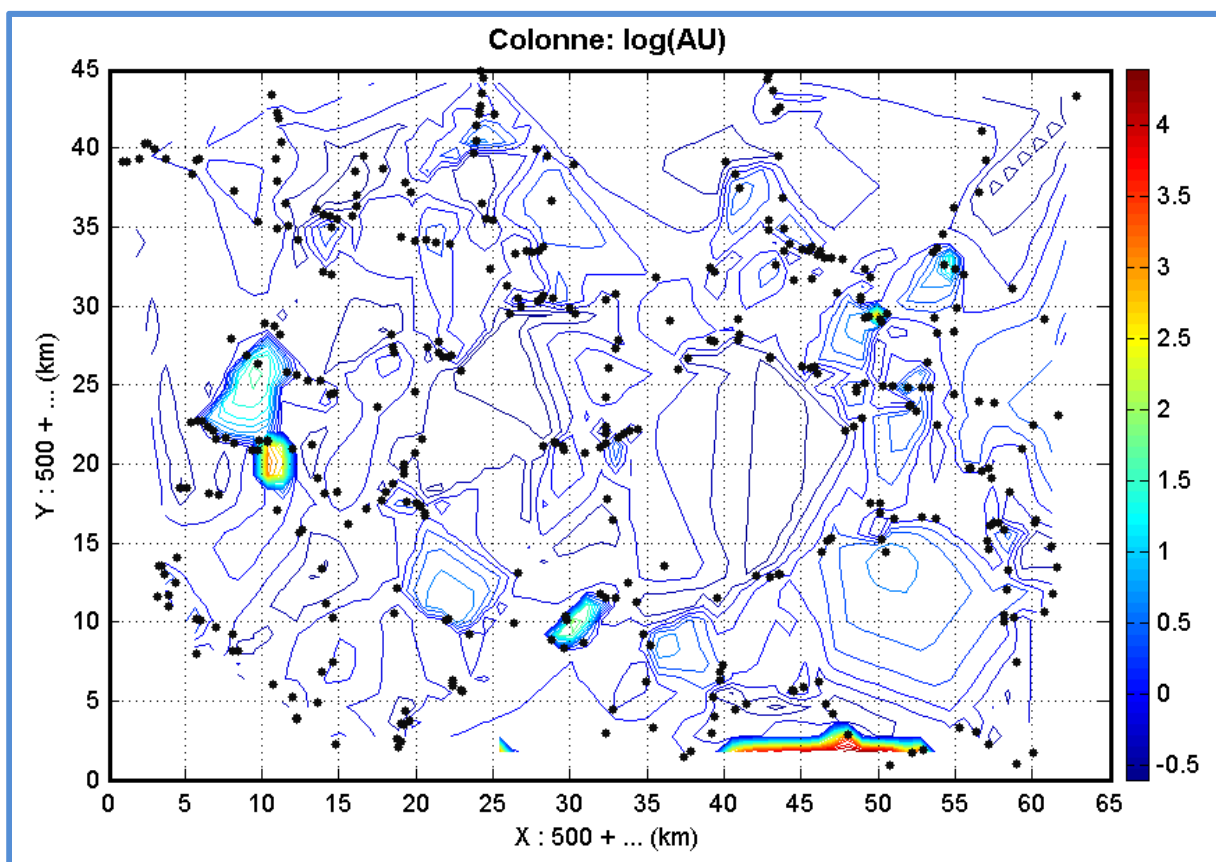
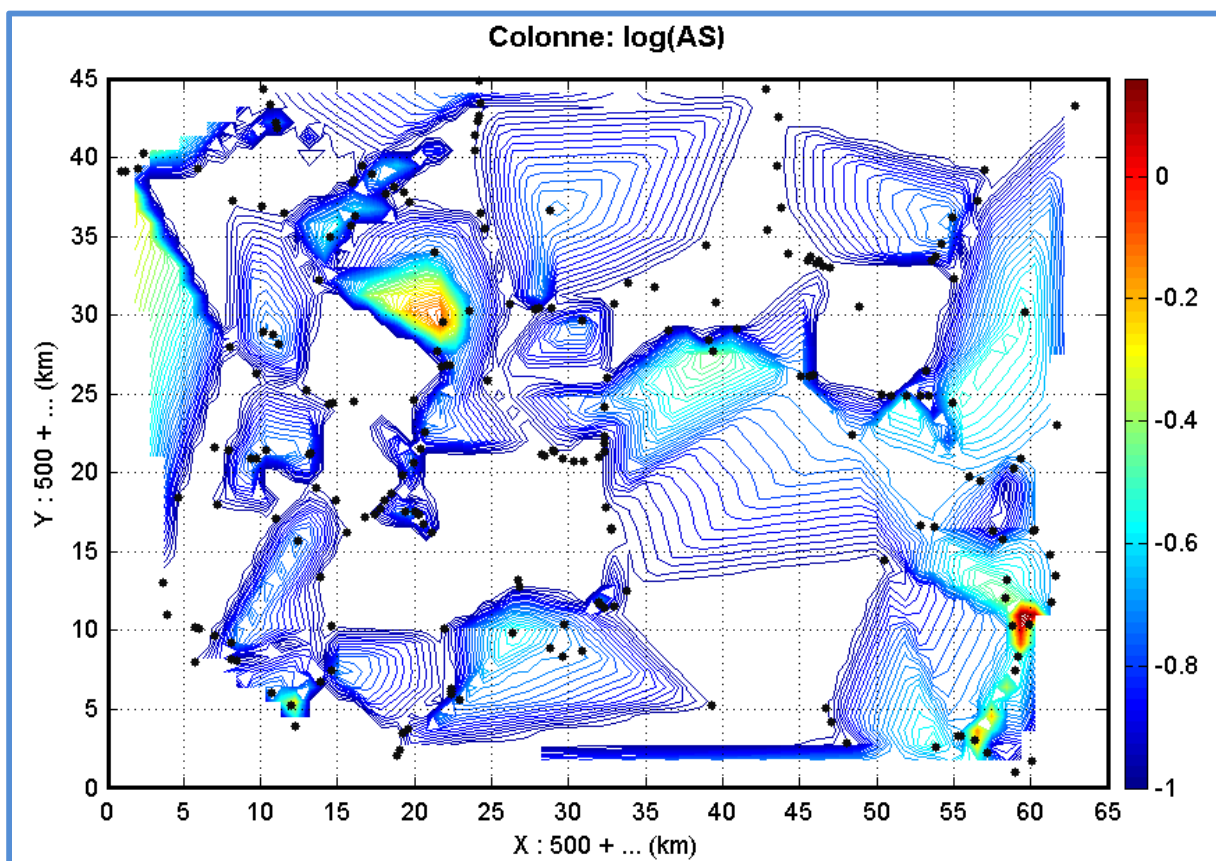
$$pe = \frac{1}{0.059} Eh \quad (21)$$

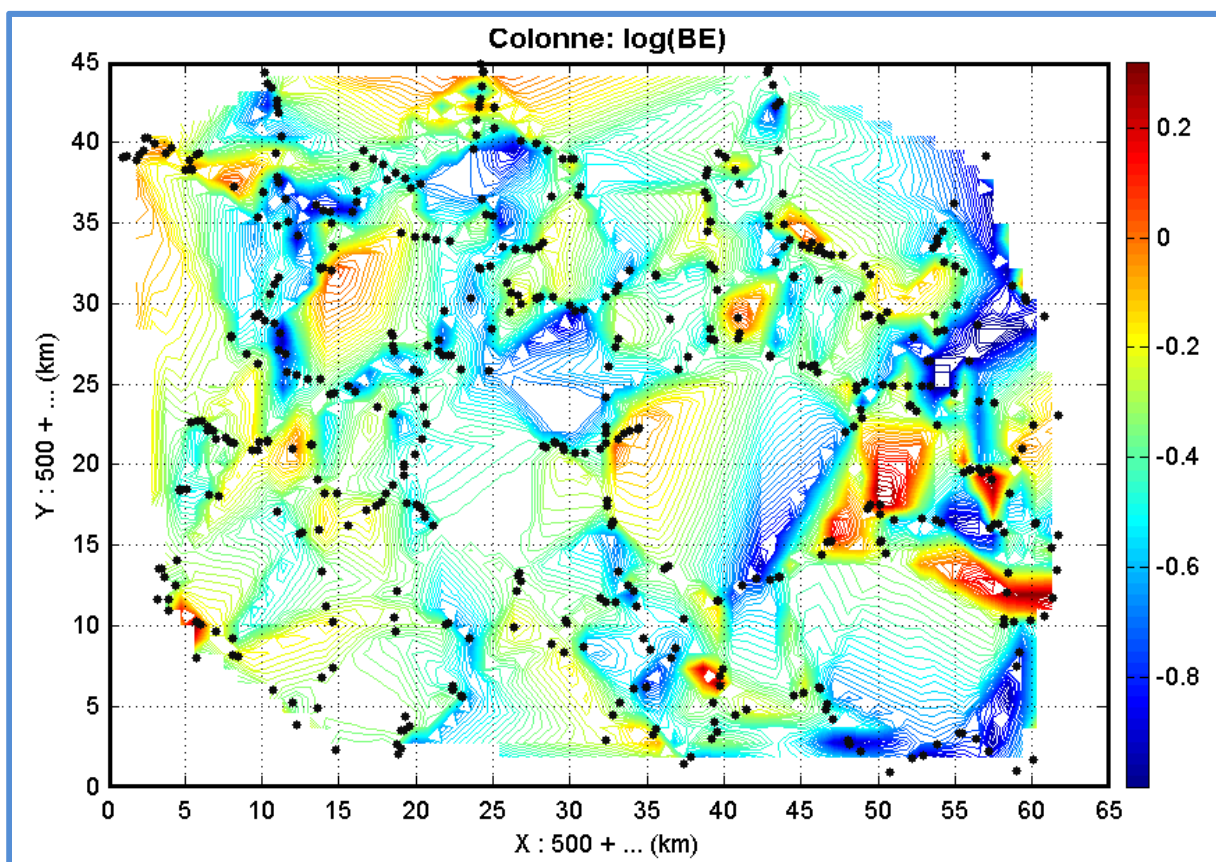
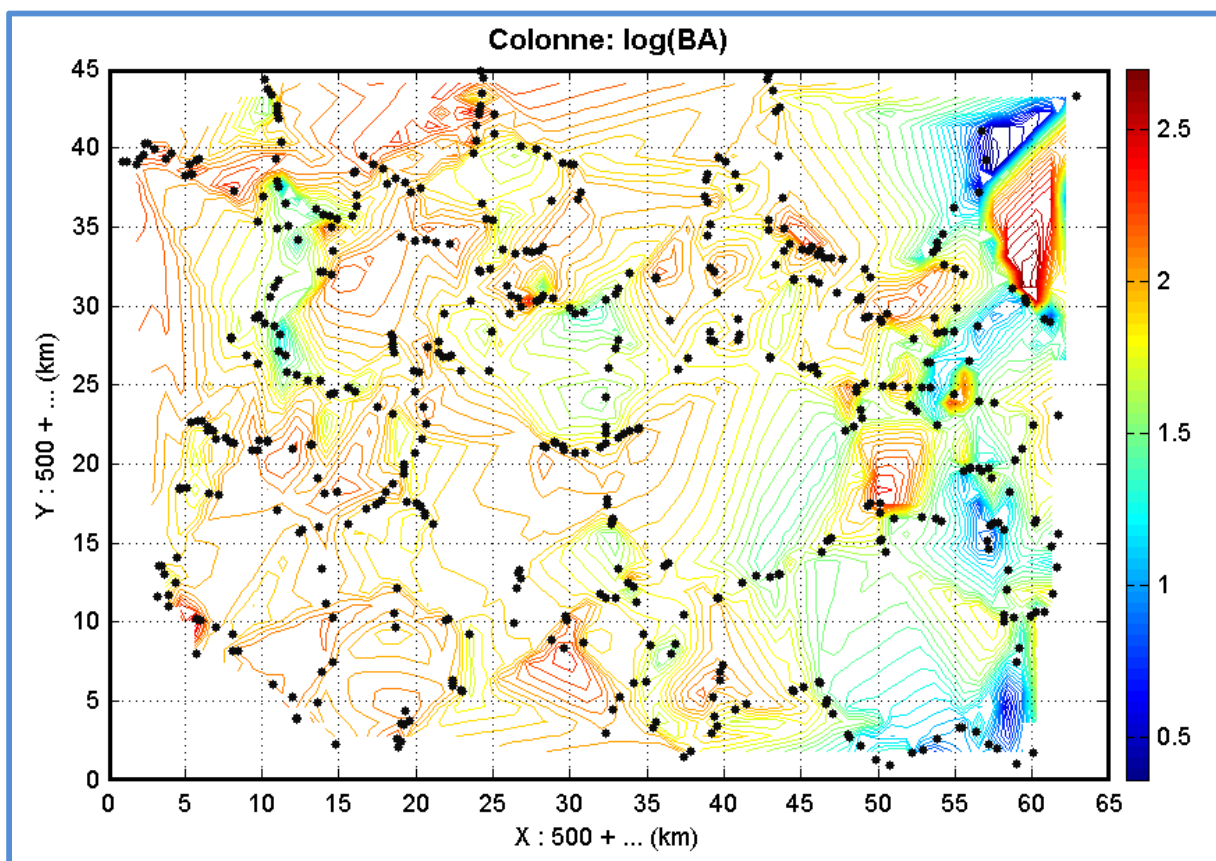
La libération d'électron dans le milieu s'accompagne généralement de celle de protons. Les réactions d'oxydo-réduction ont donc un impact sur le  $pH$  du milieu. Cette propriété est importante à noter dans le cas de l'étude de sol alcalin car cela influe directement sur les balances alcalines et donc sur les autres processus géochimiques (précipitation-dissolution de minéraux).



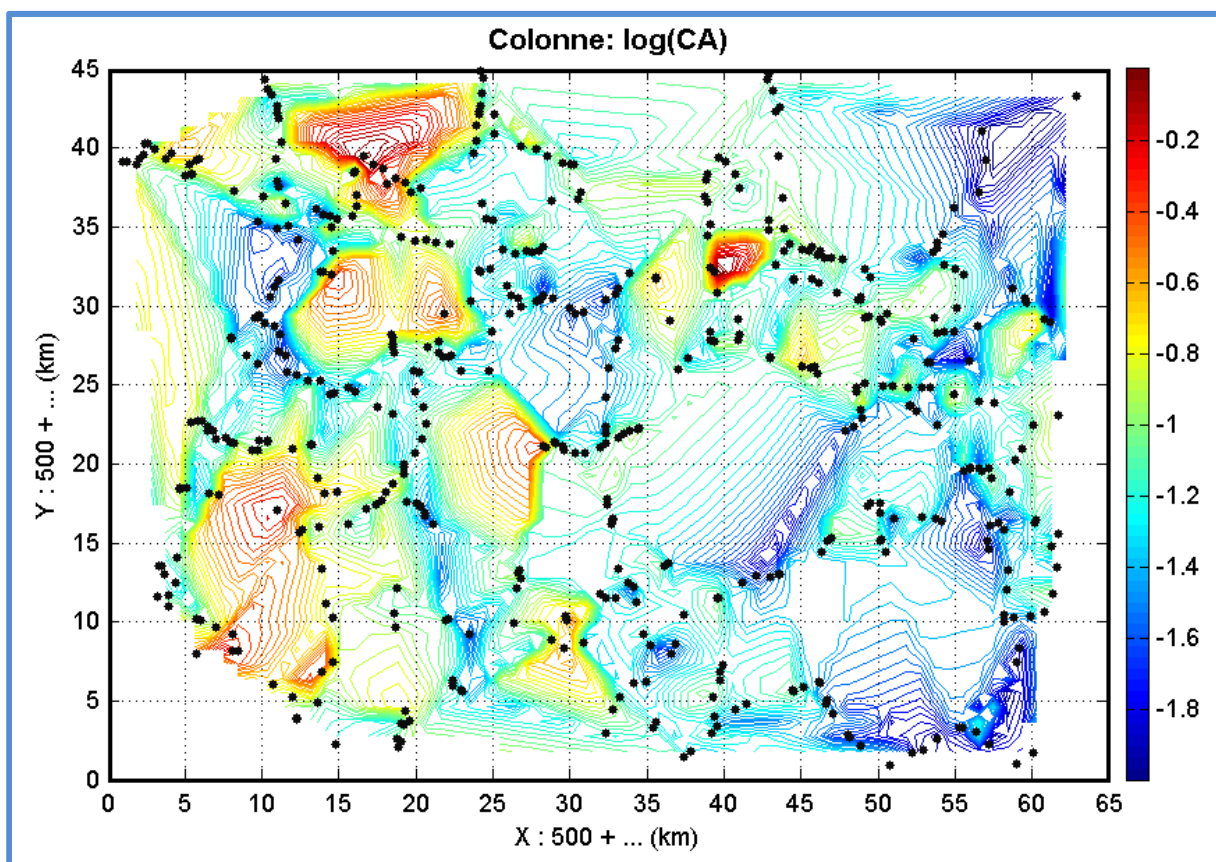
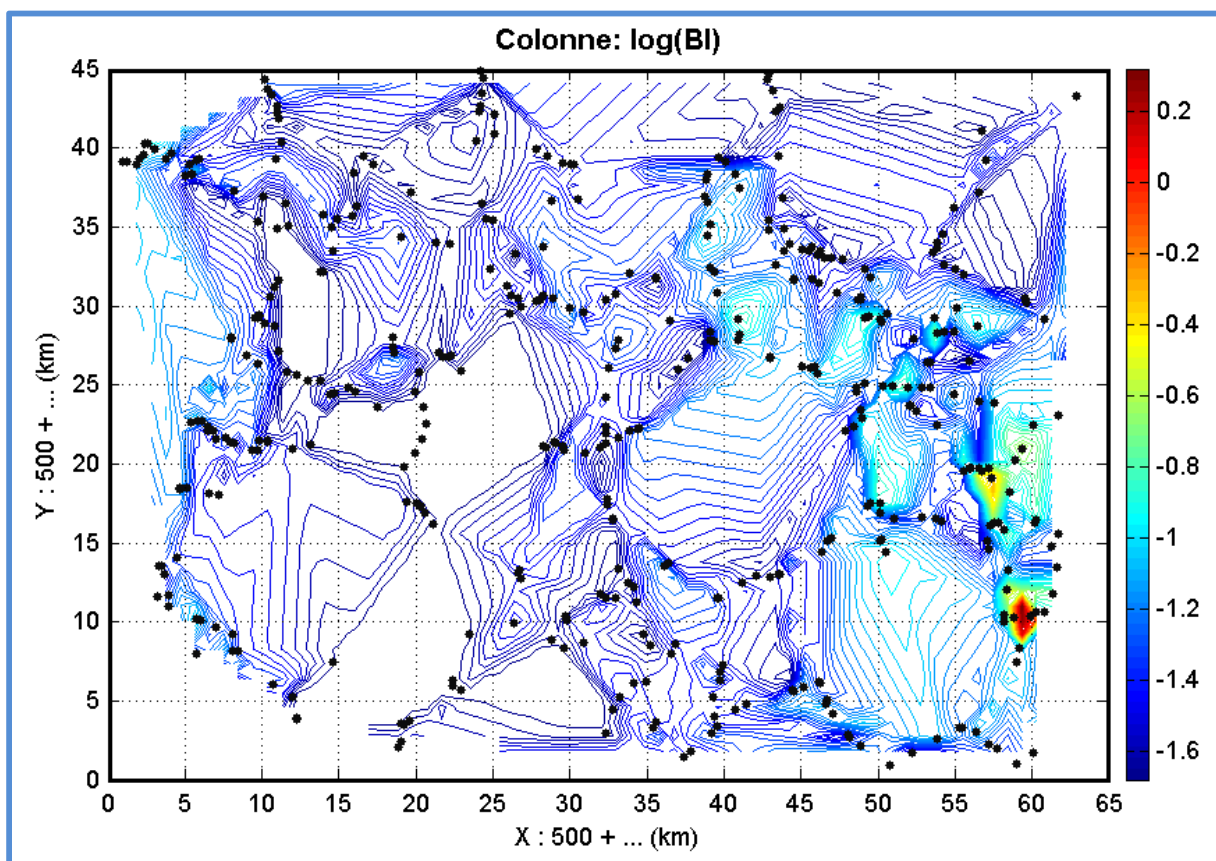
**Annexe 5:** Différentes cartes des éléments chimiques ( $\log_{10}$ ).

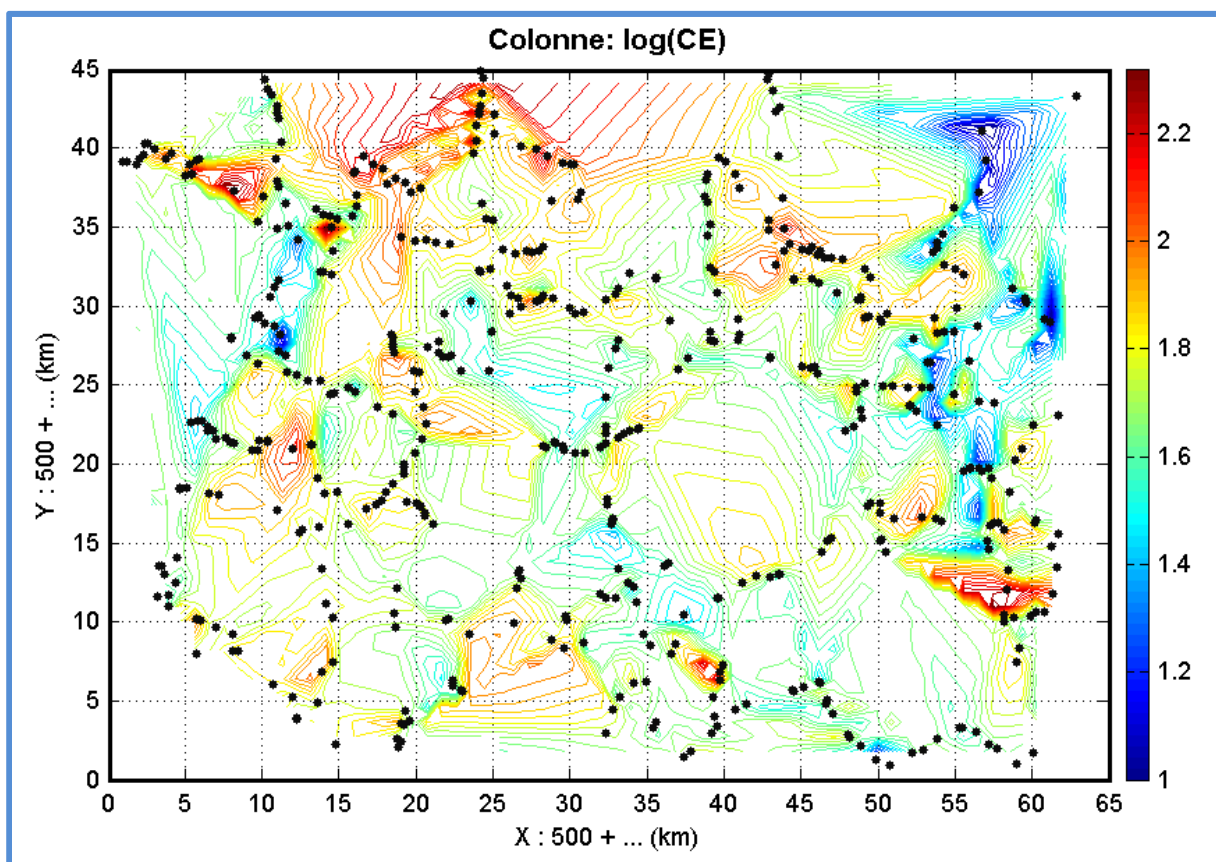
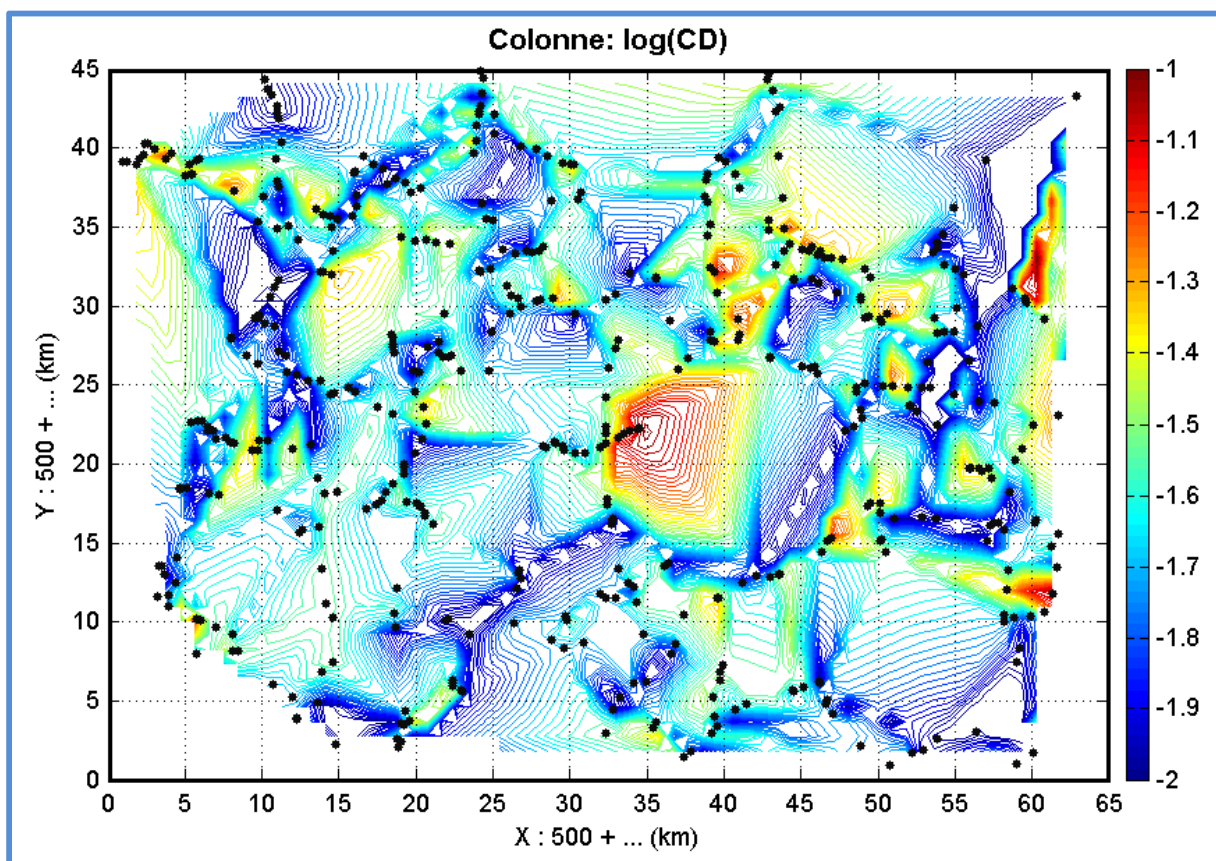




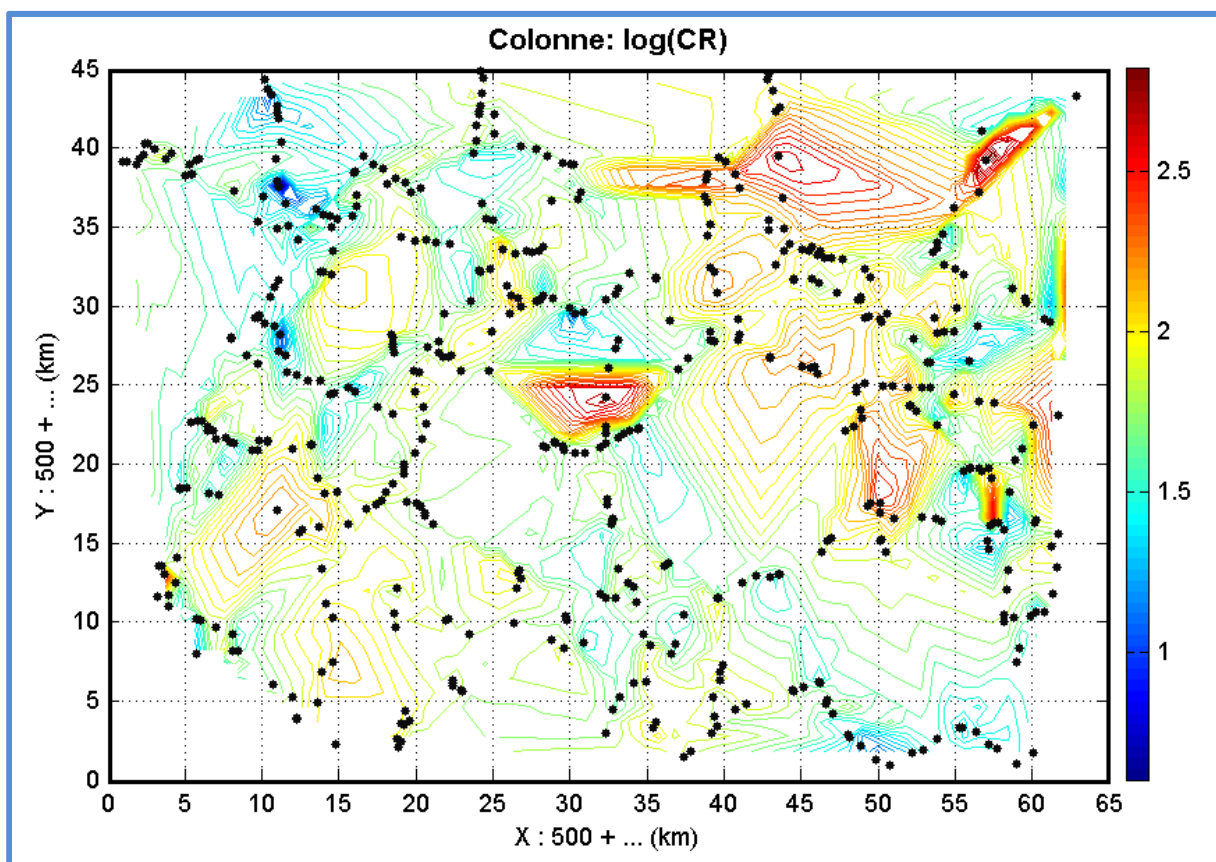
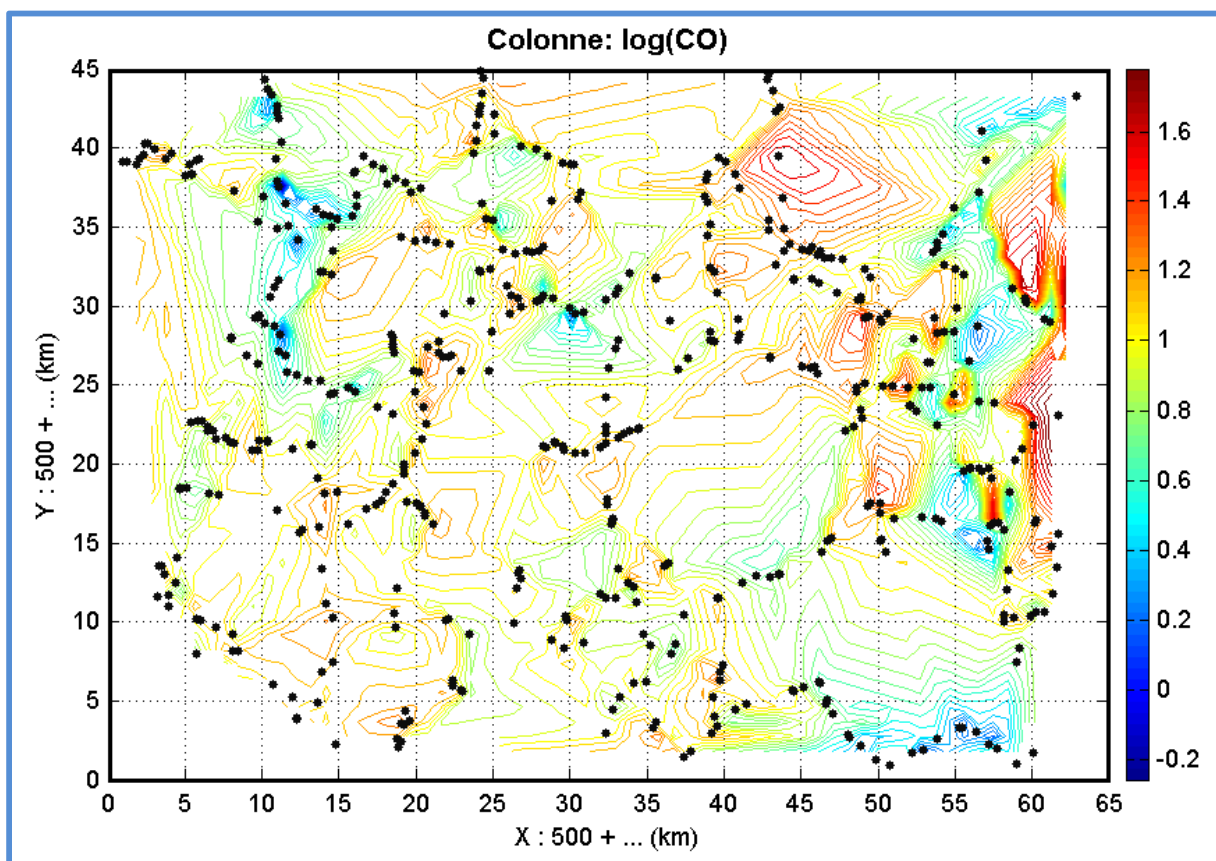


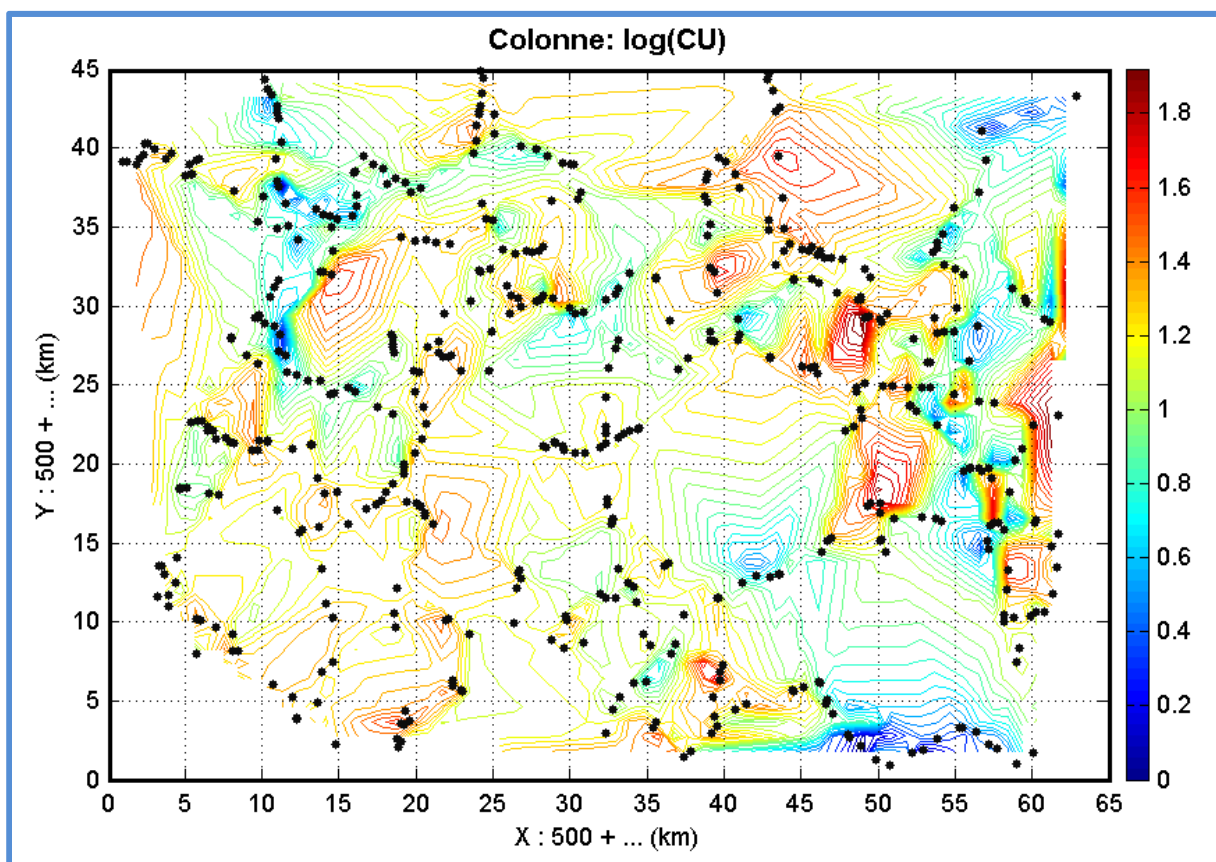
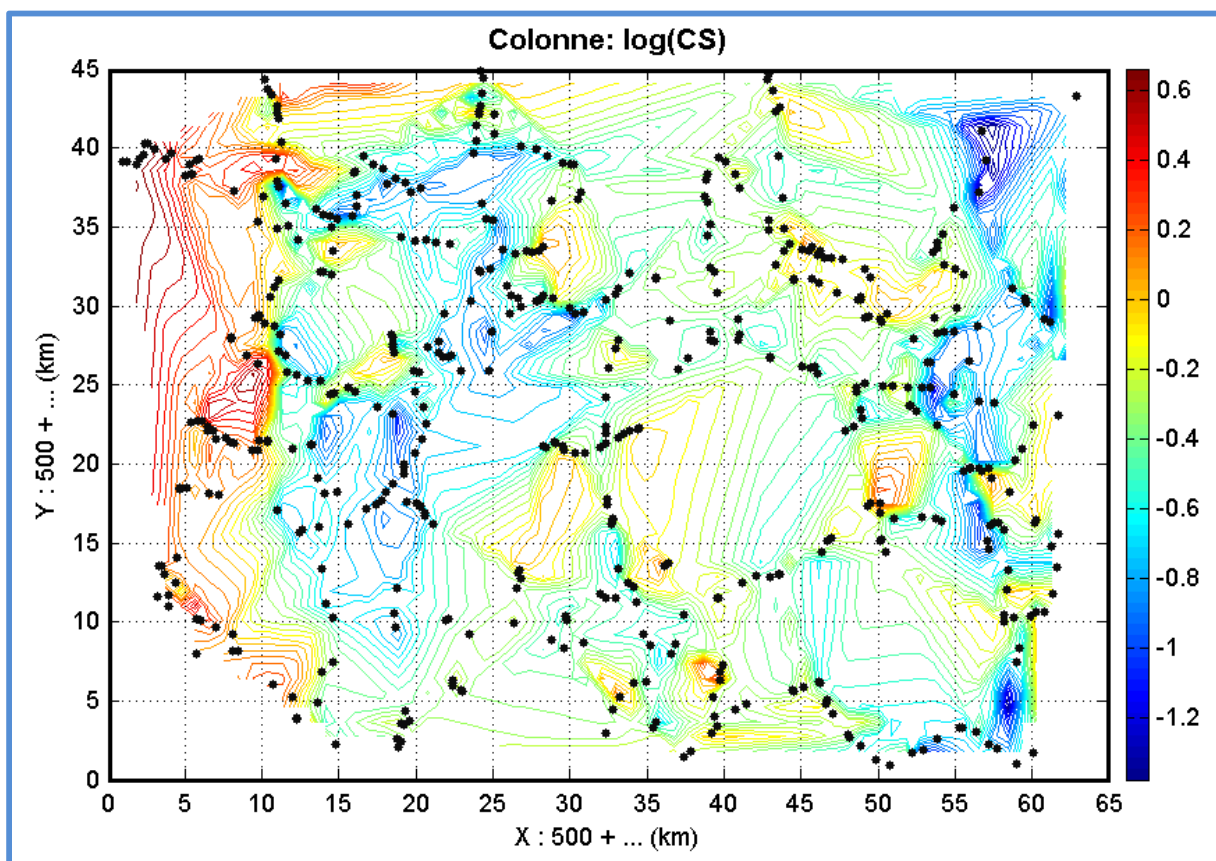


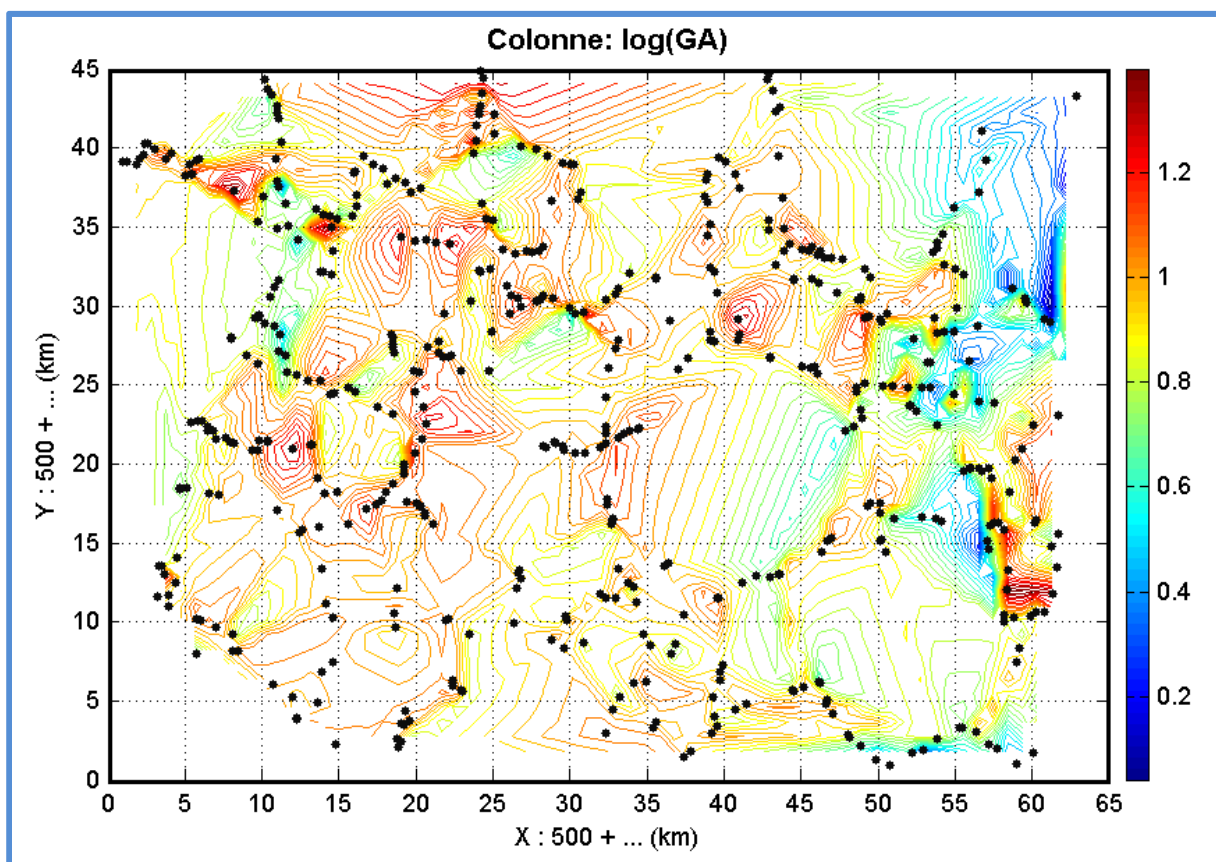
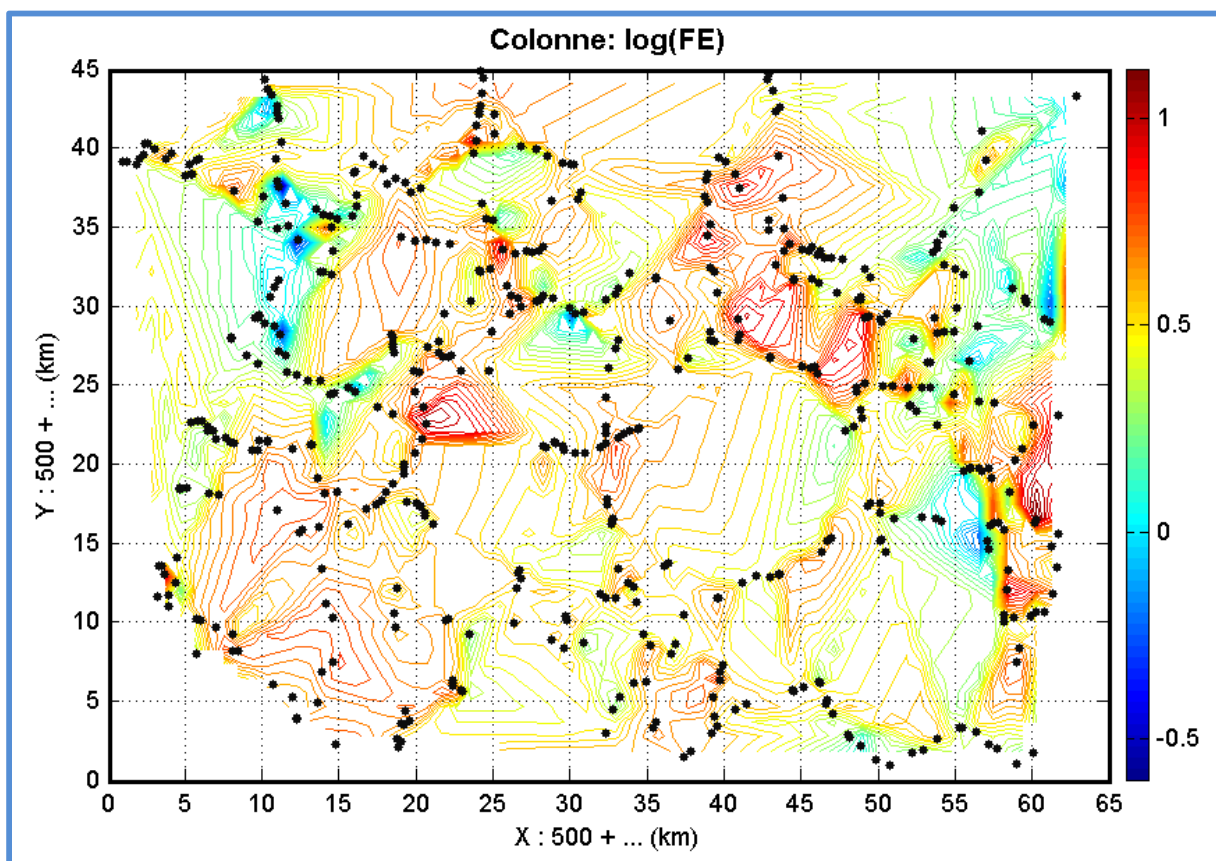




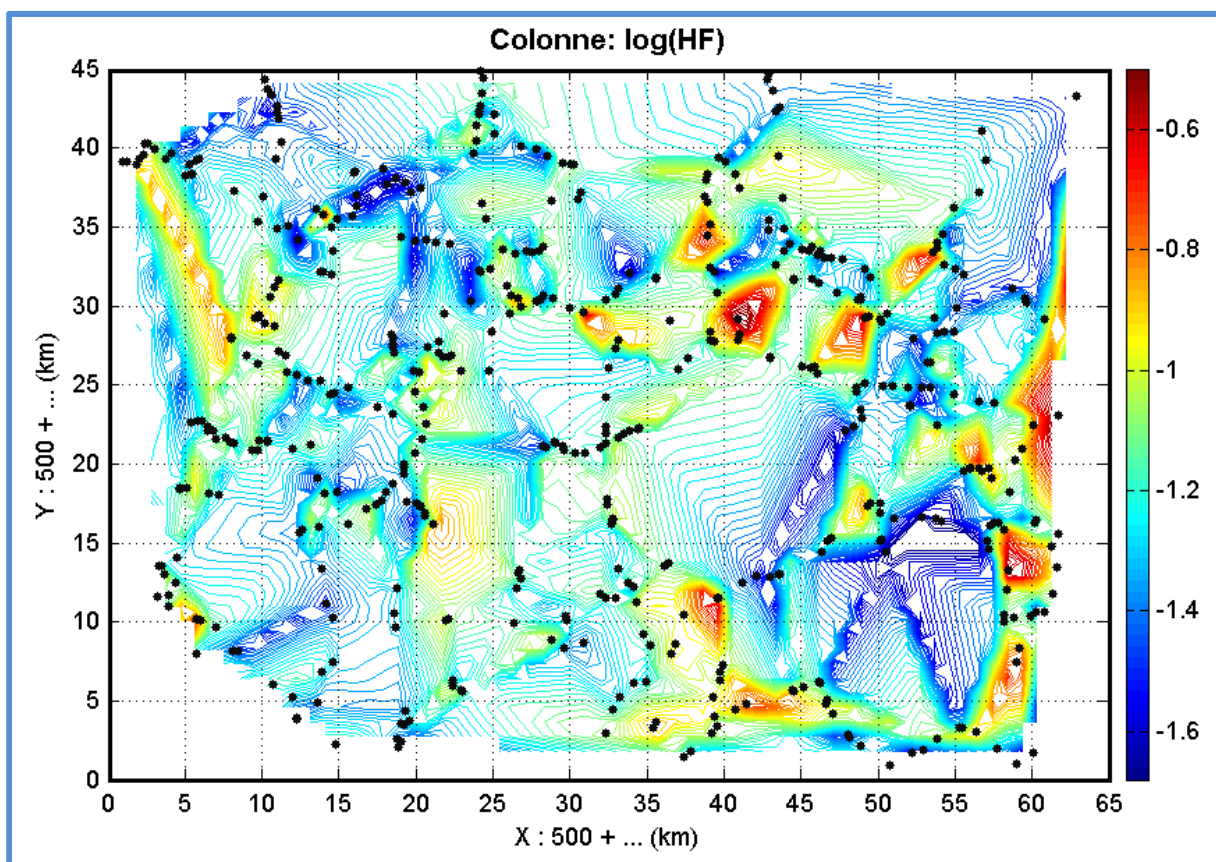
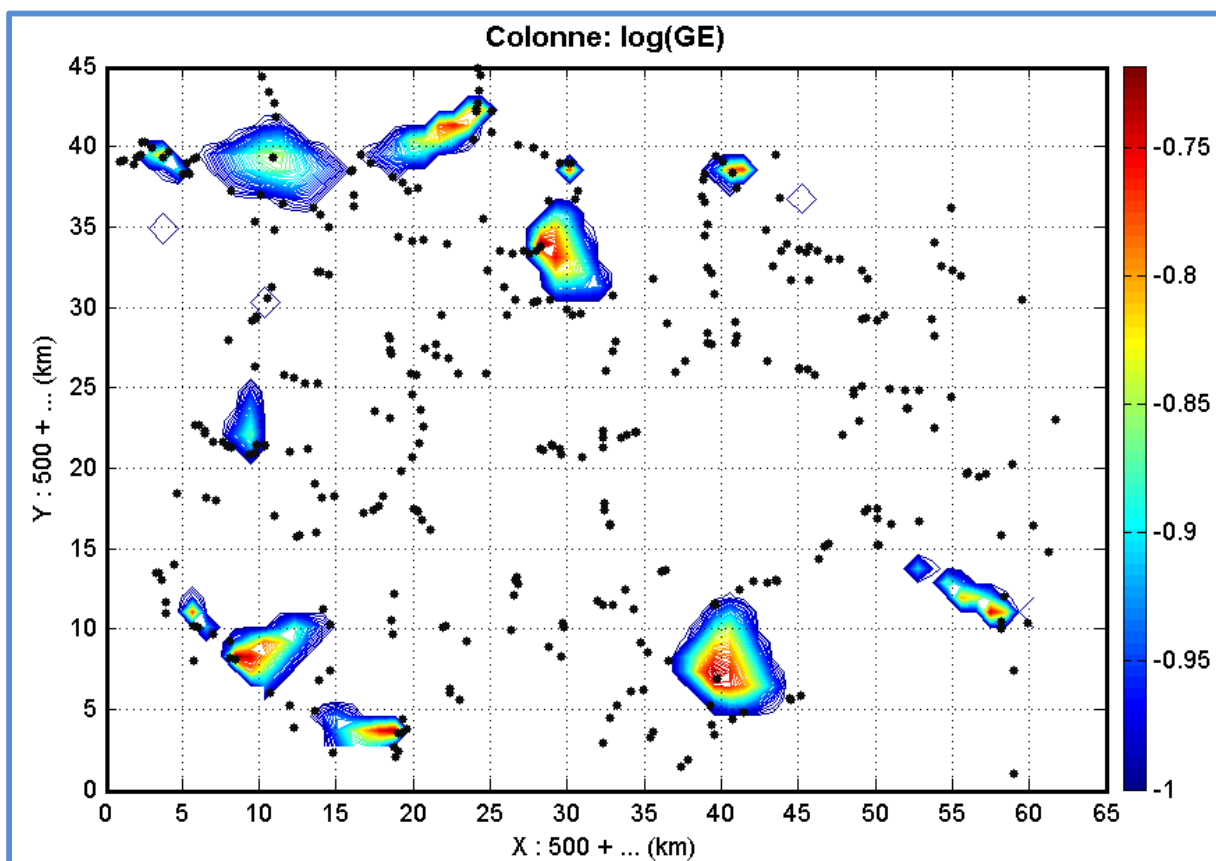


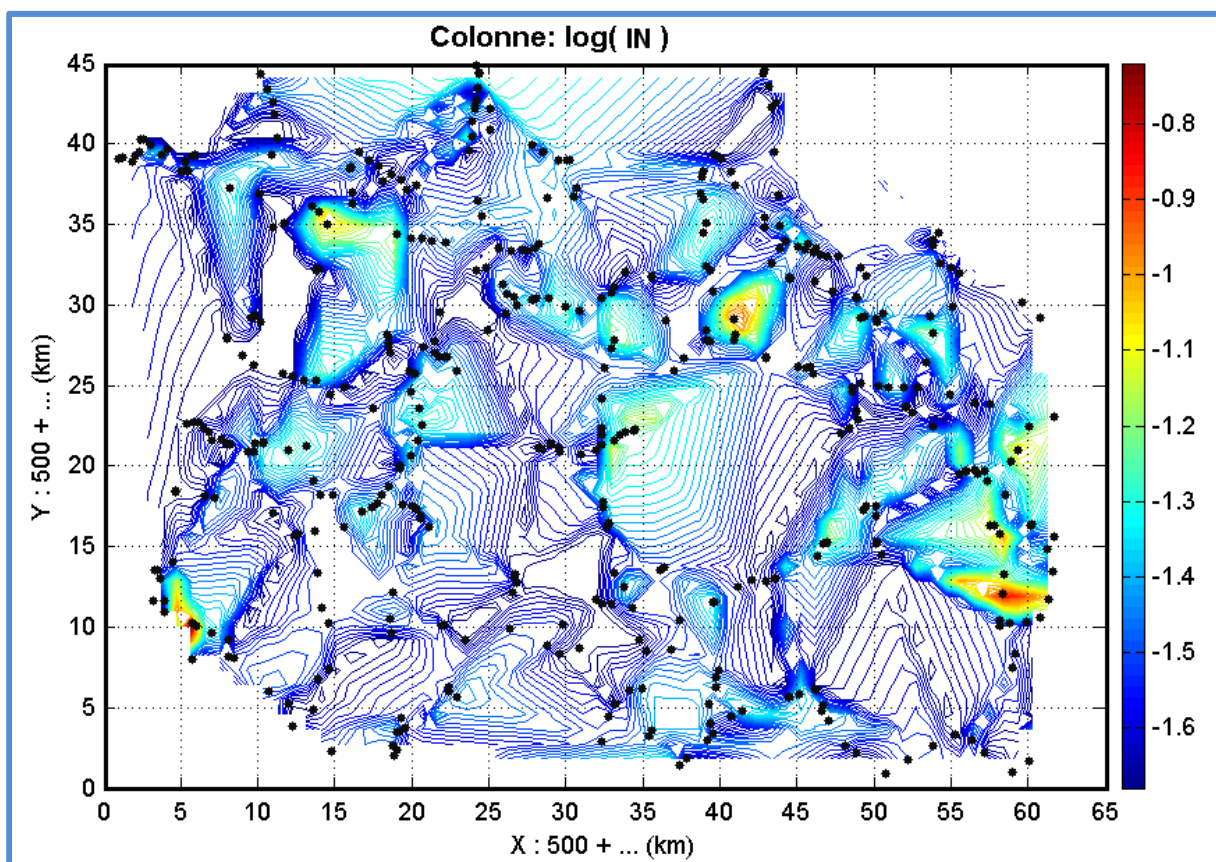
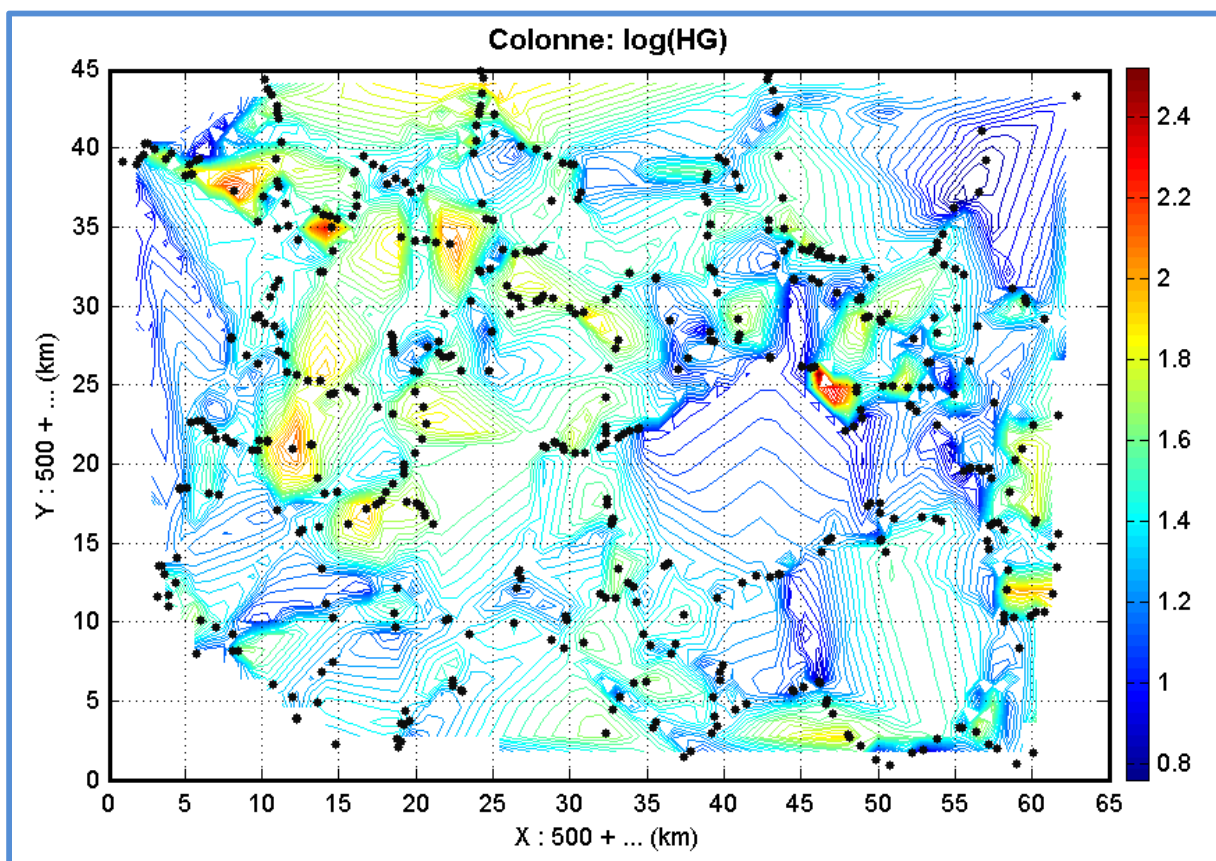




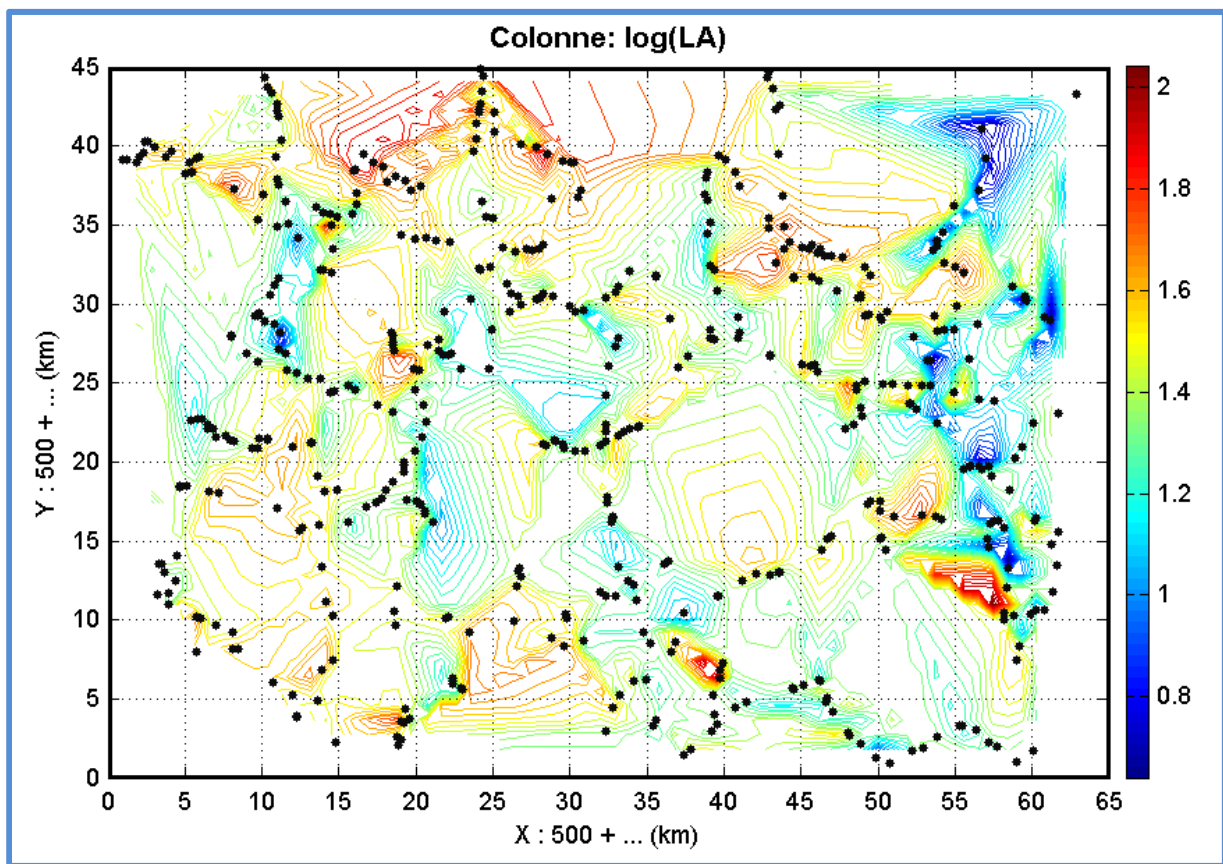
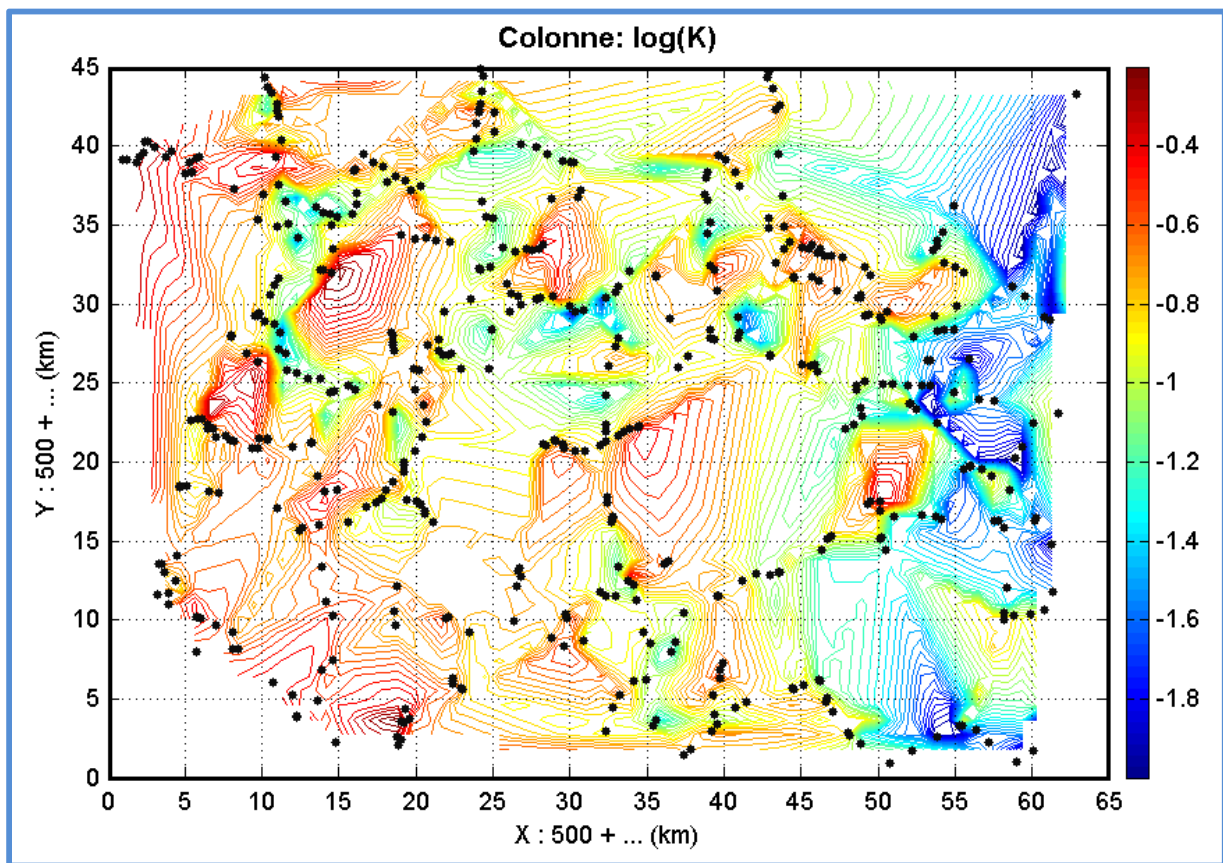


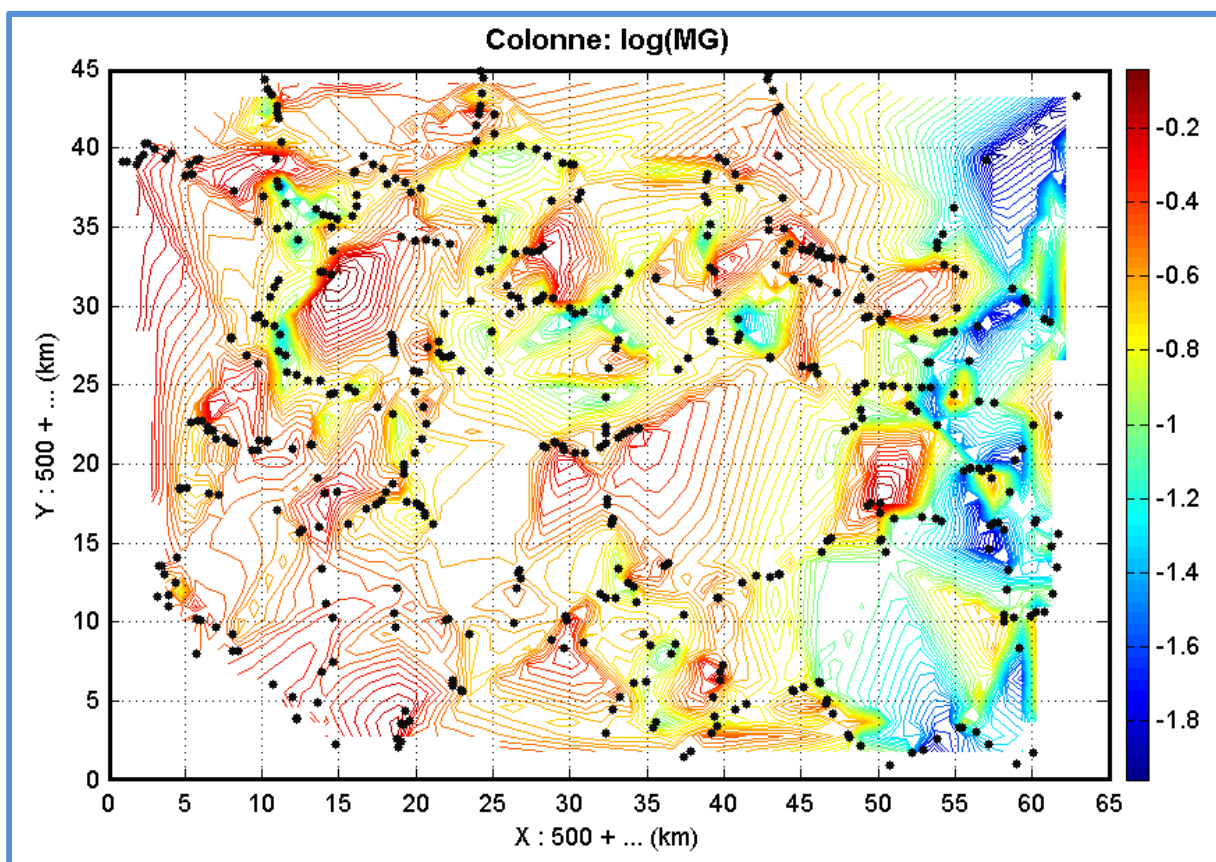
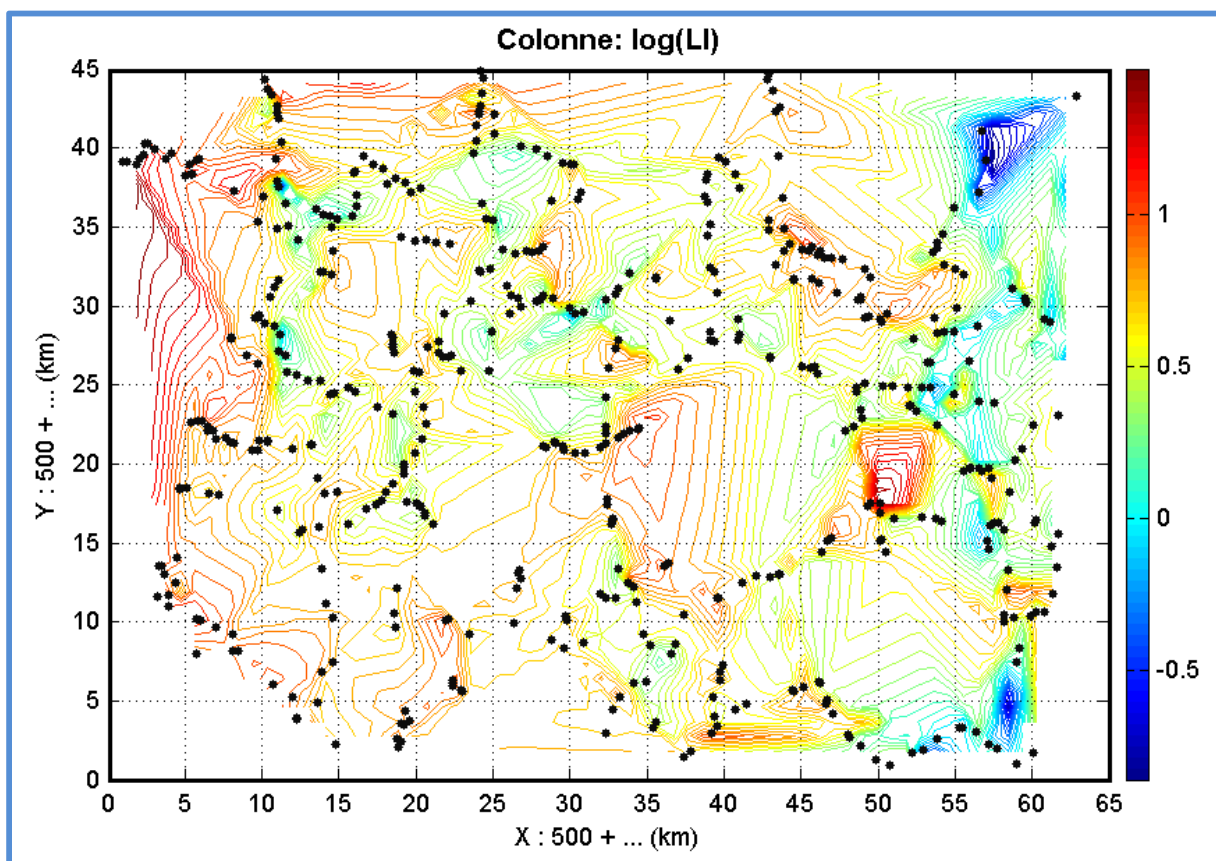




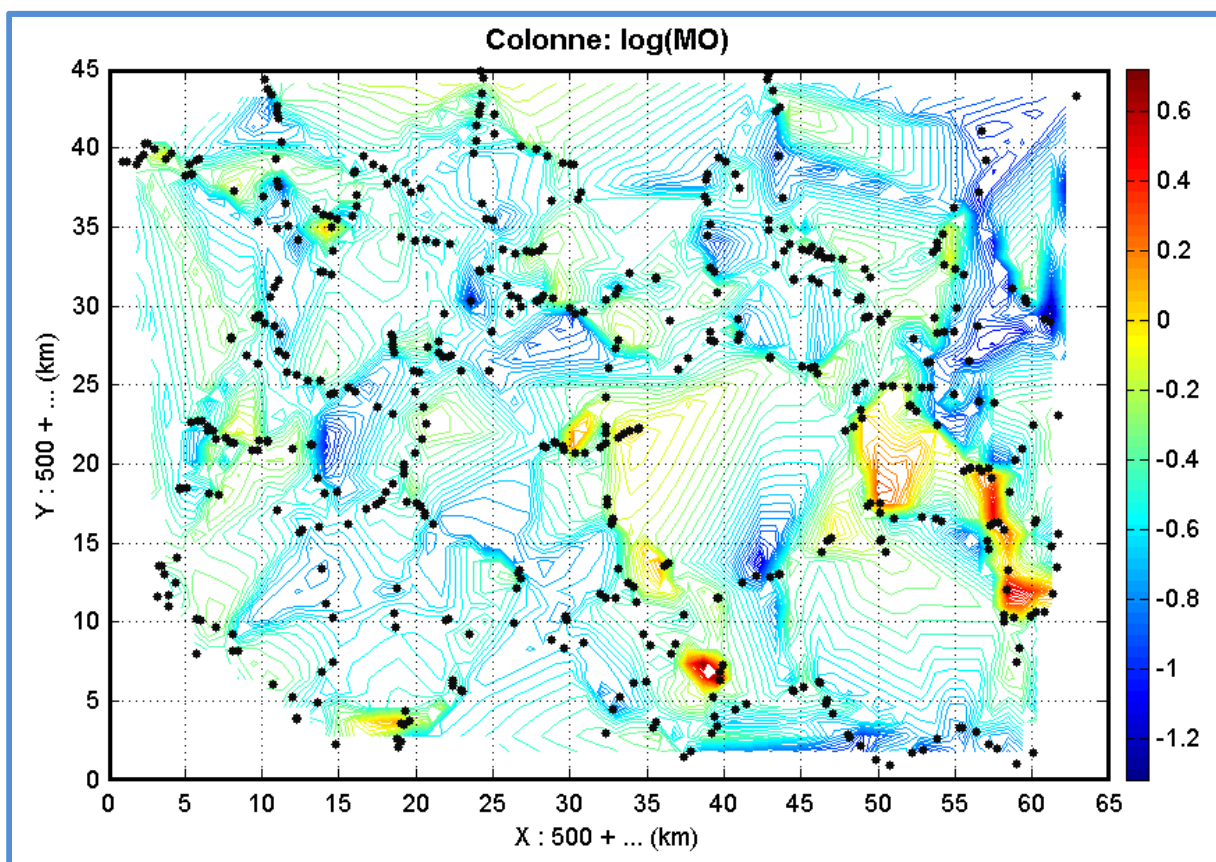
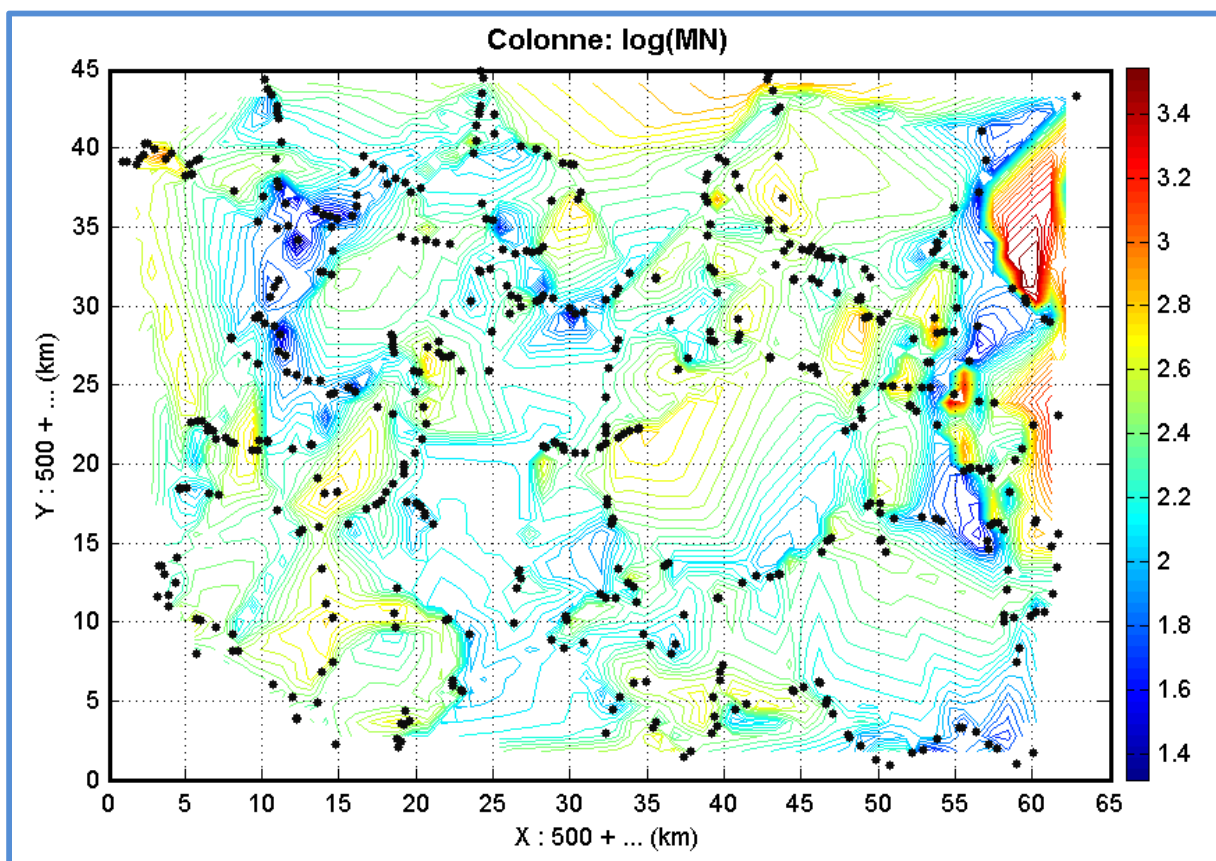


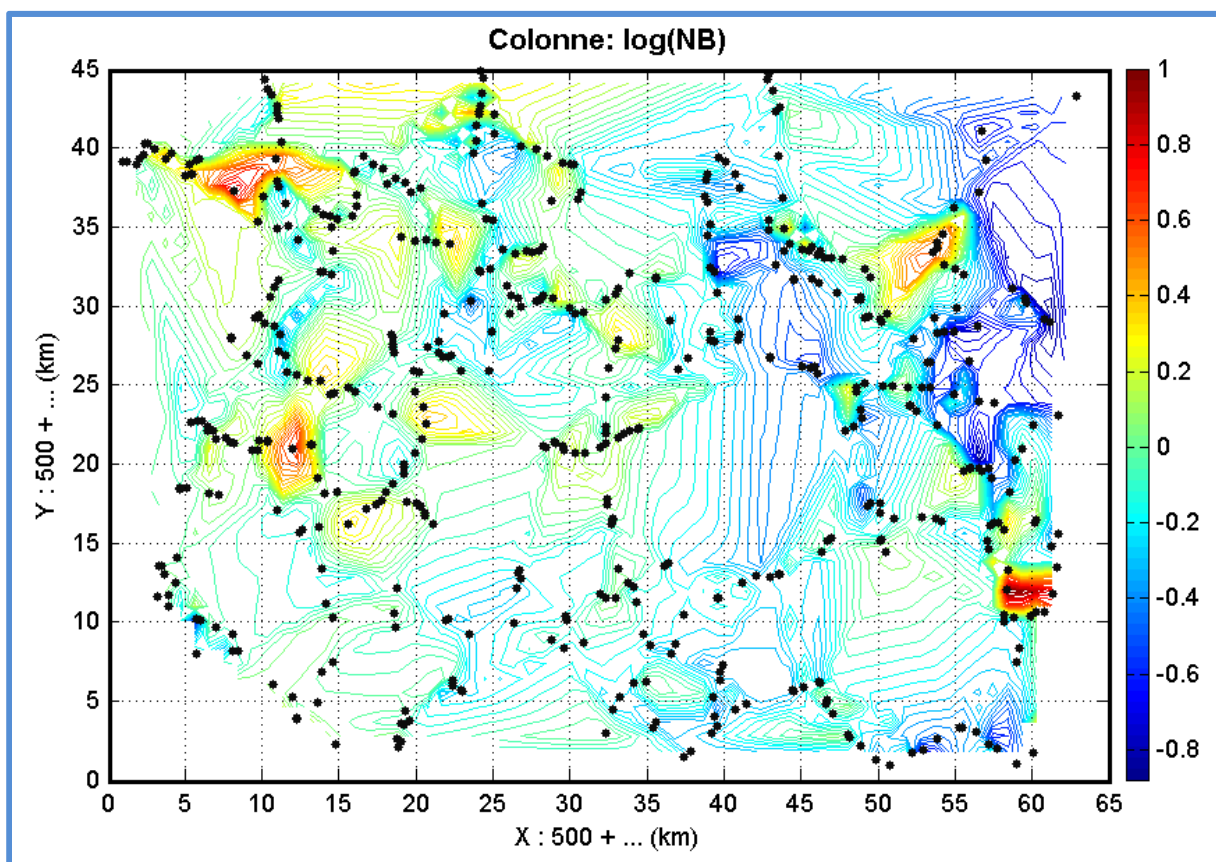
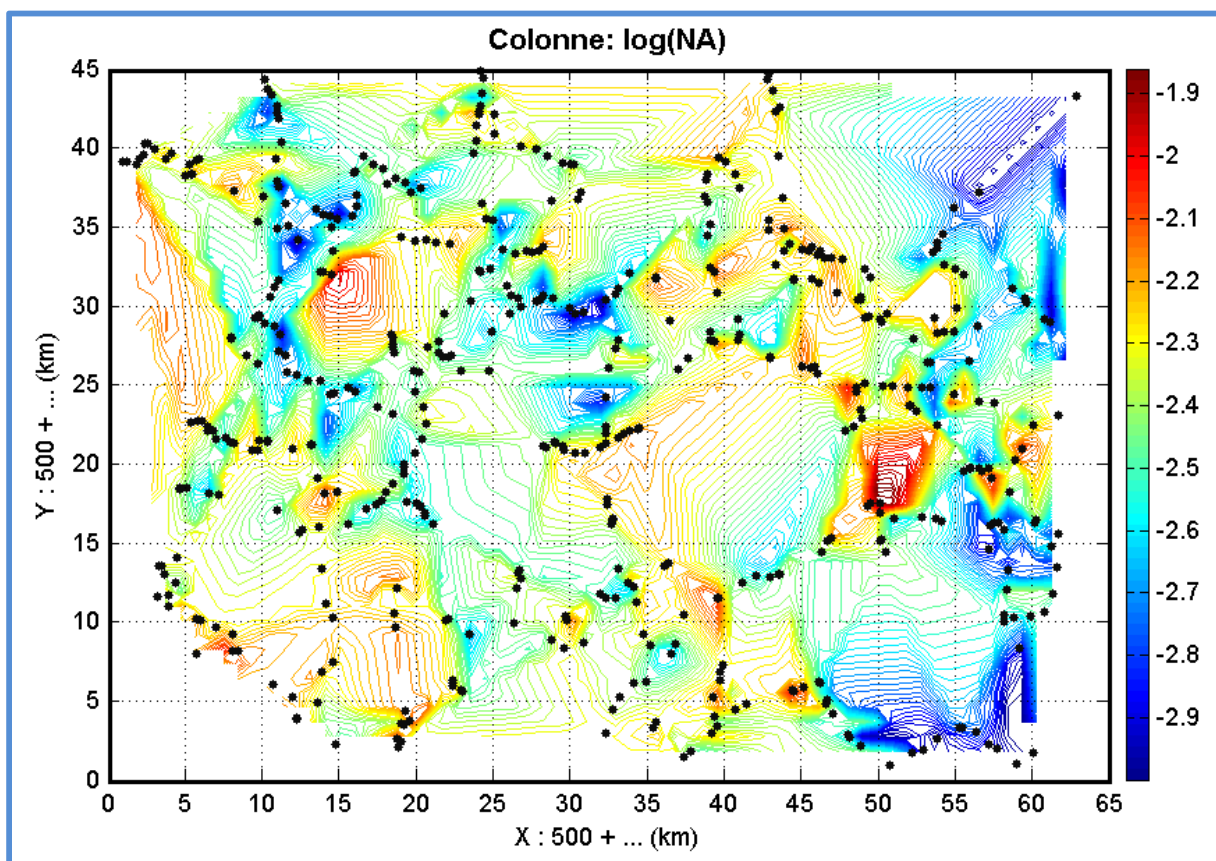




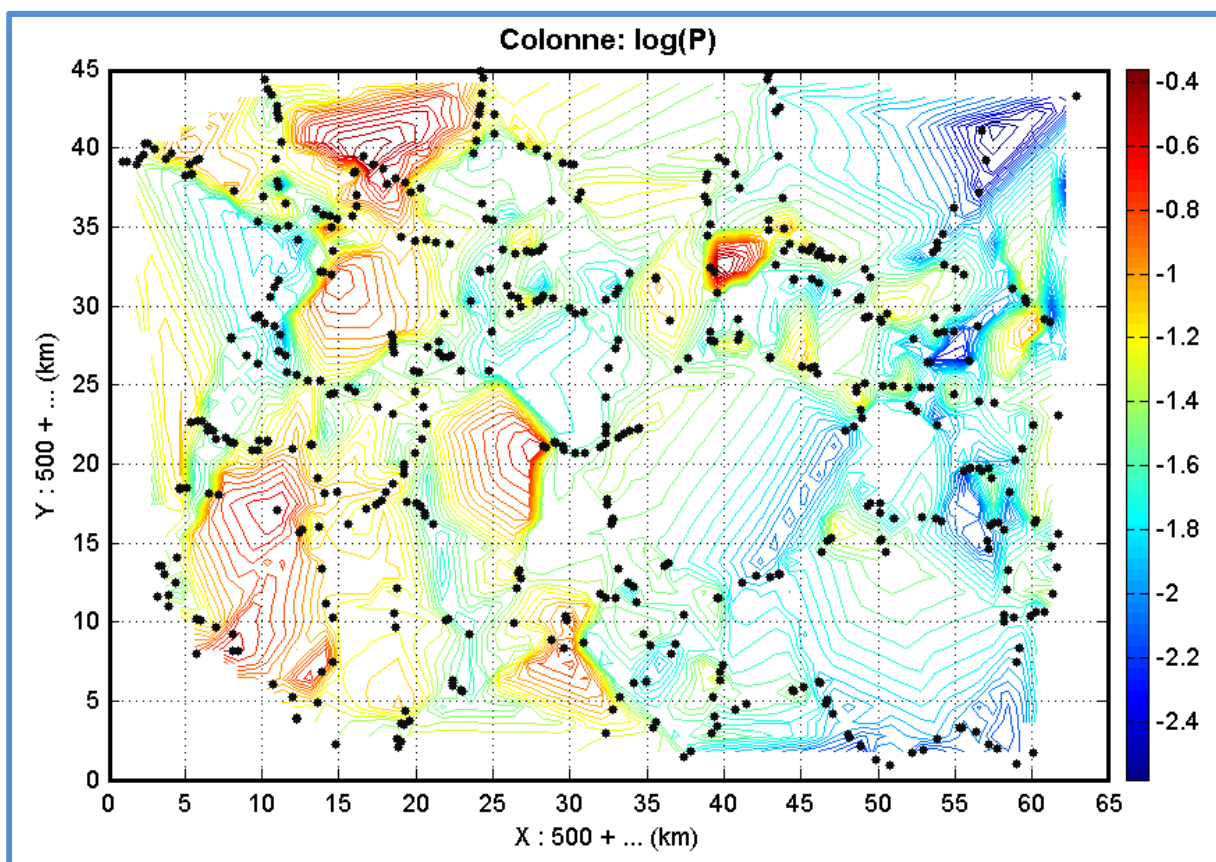
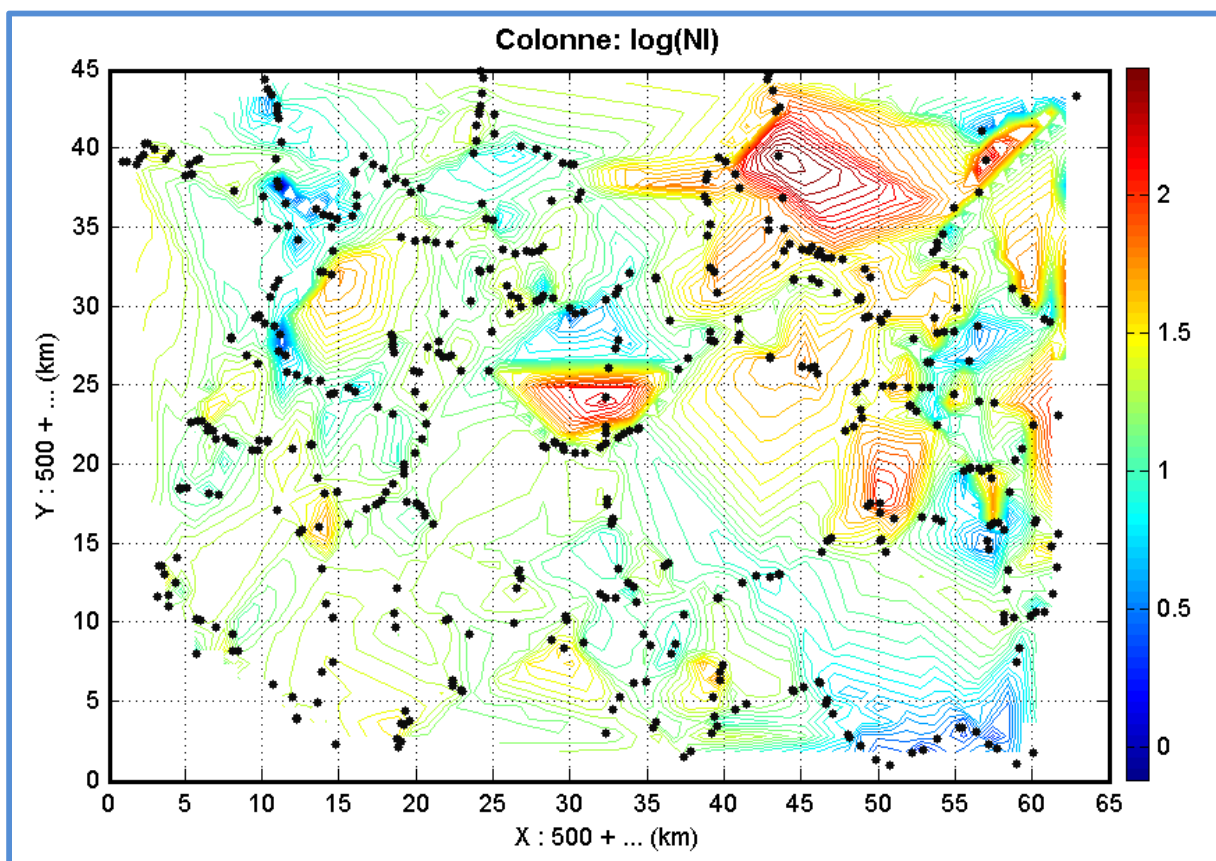




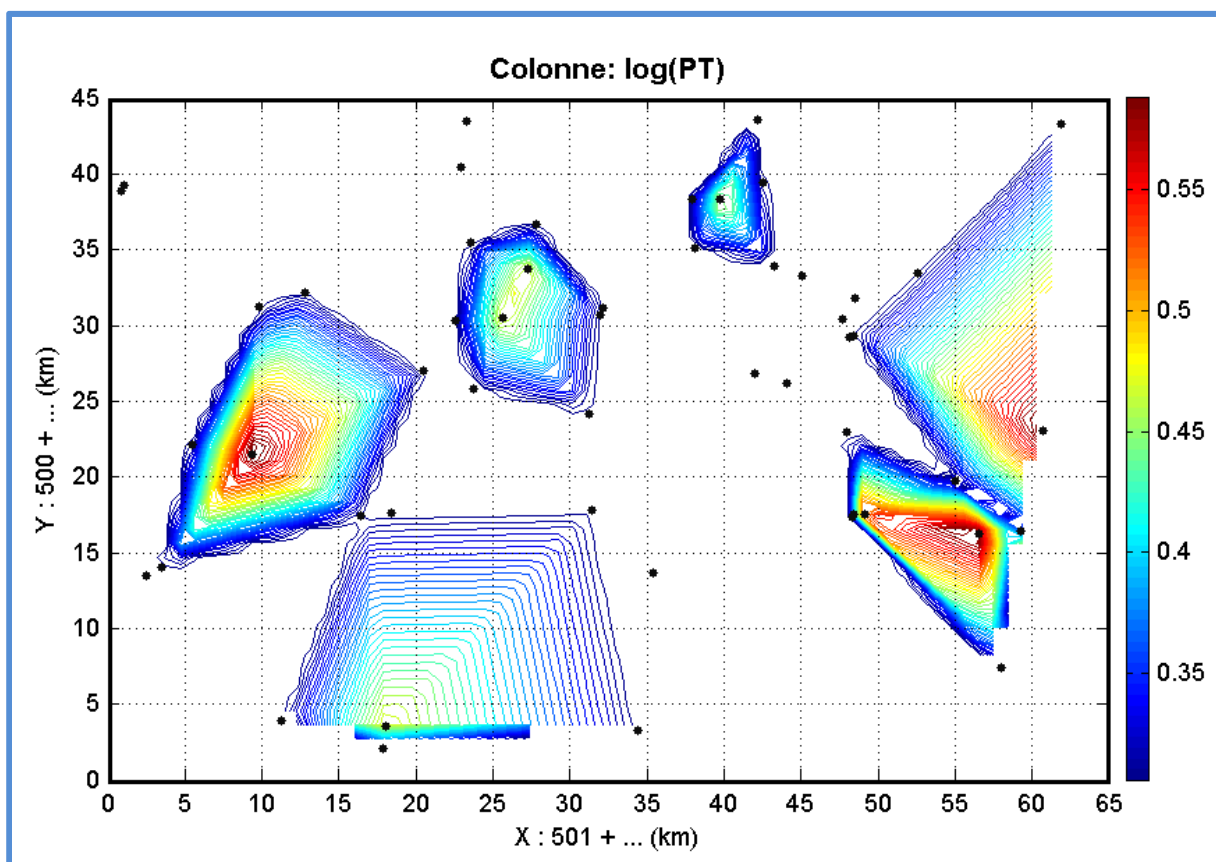
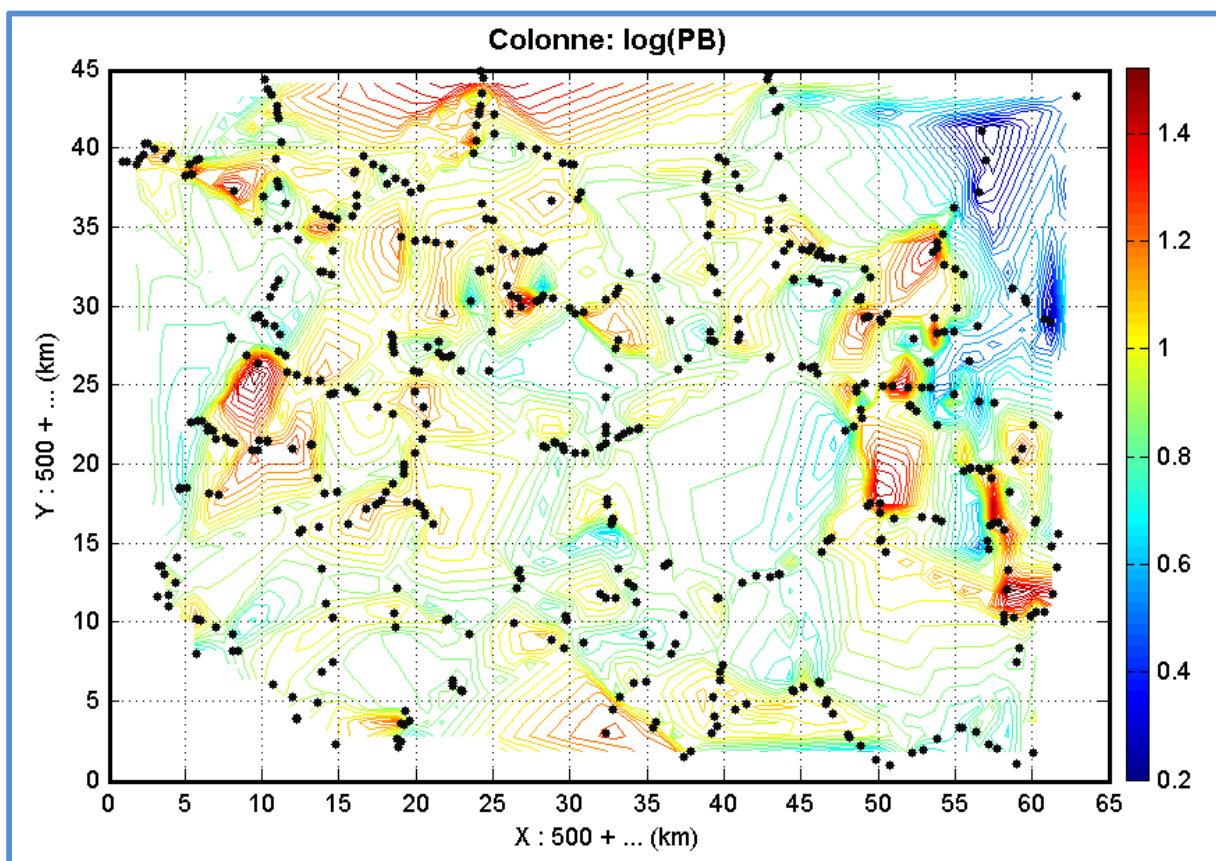


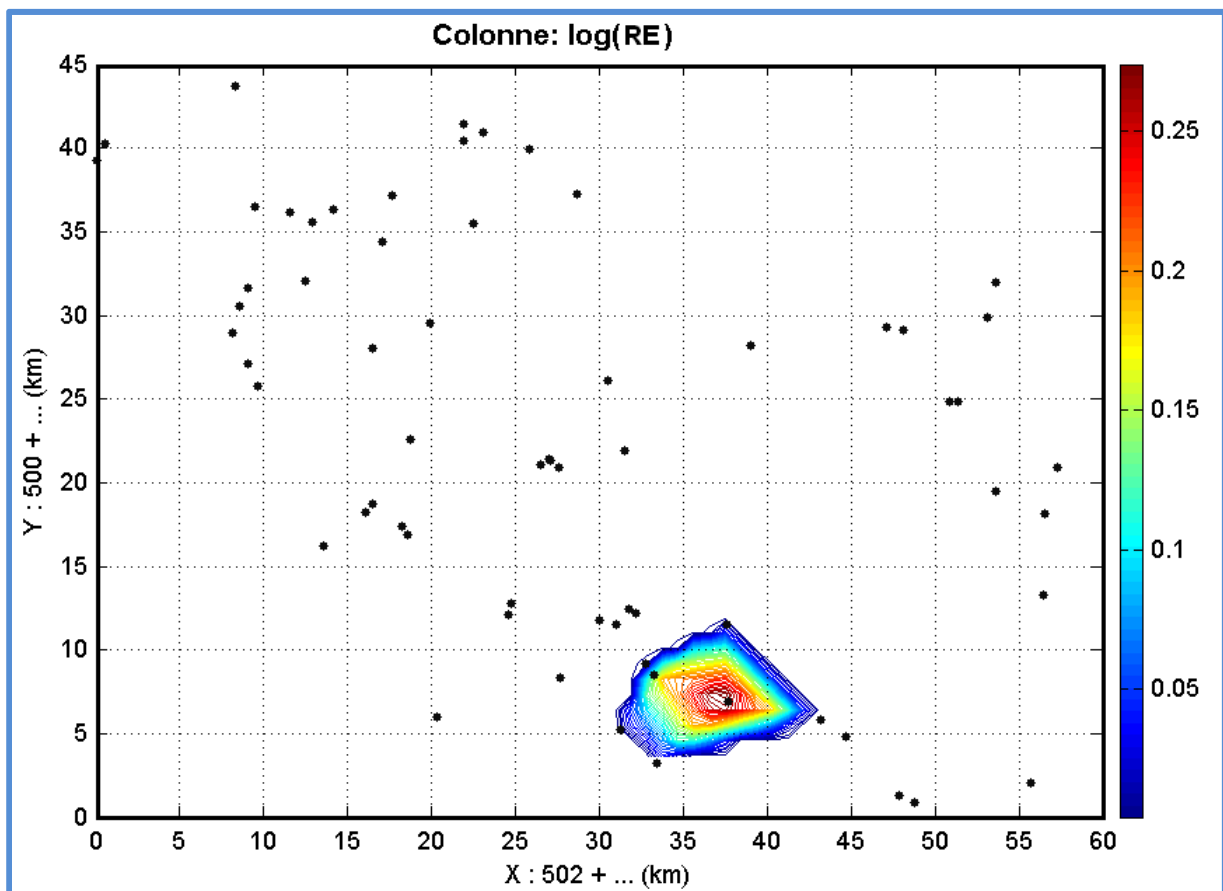
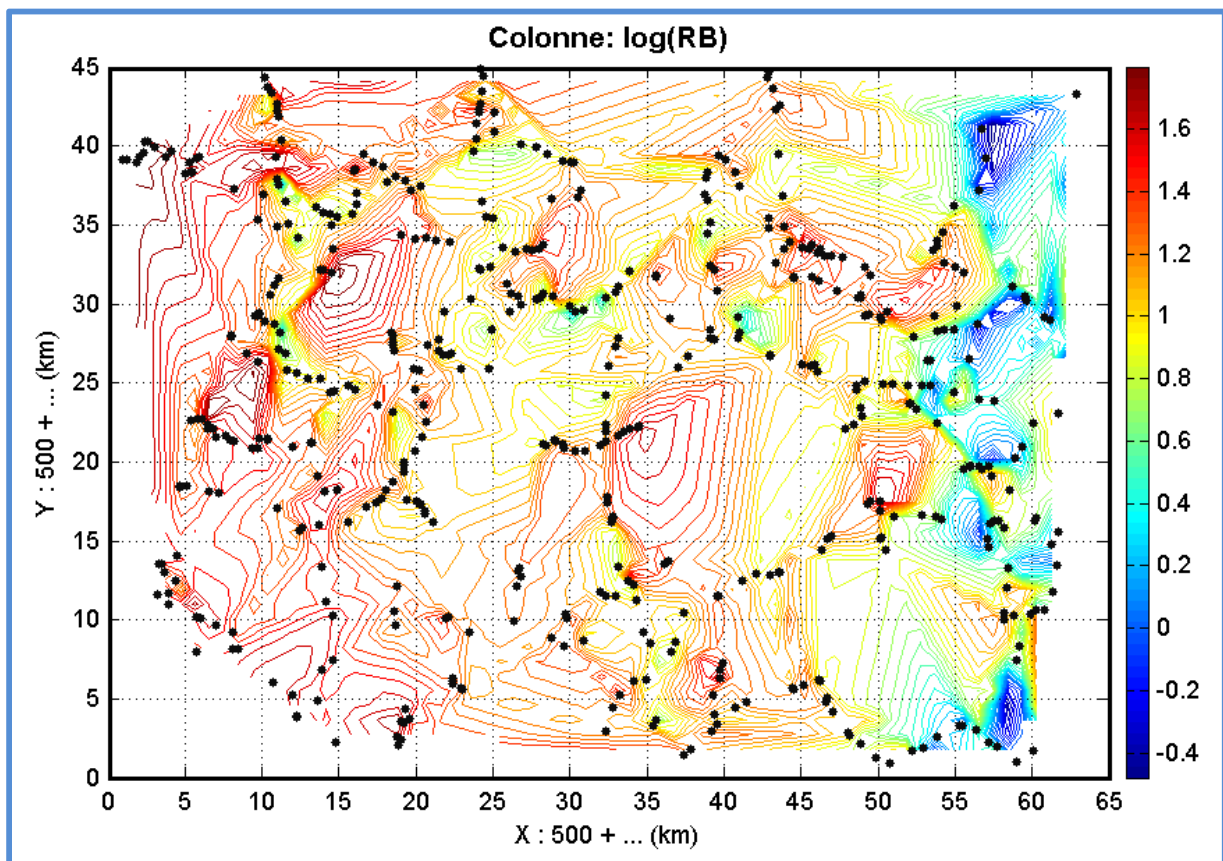


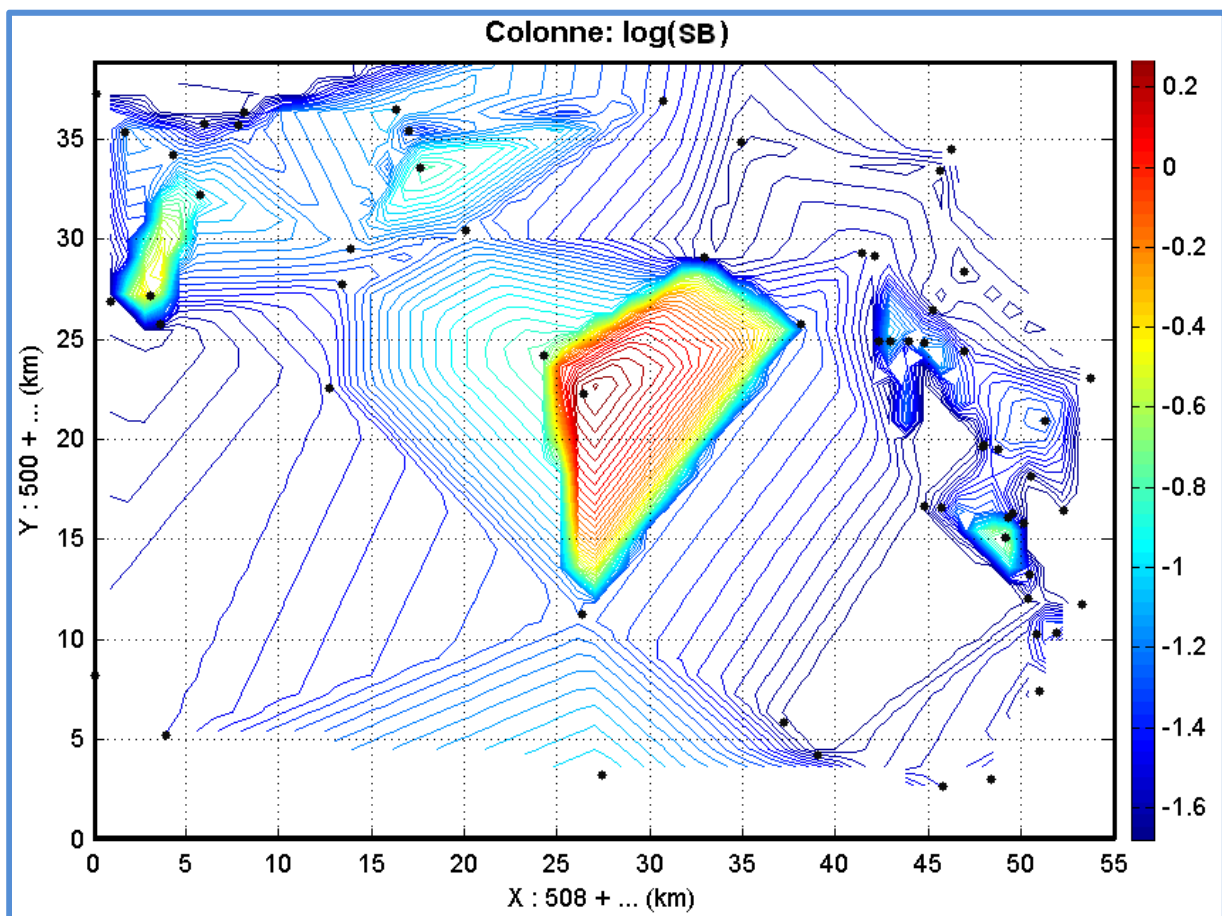
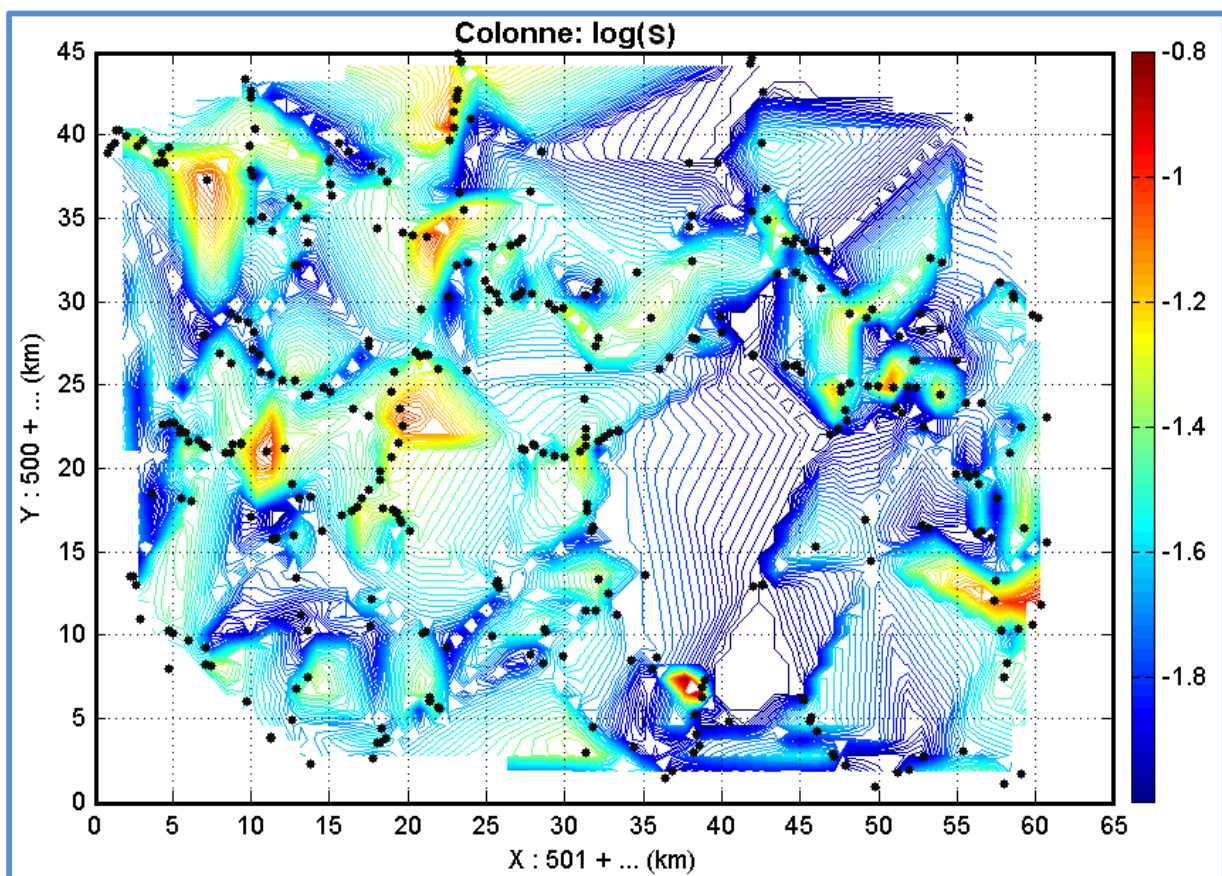




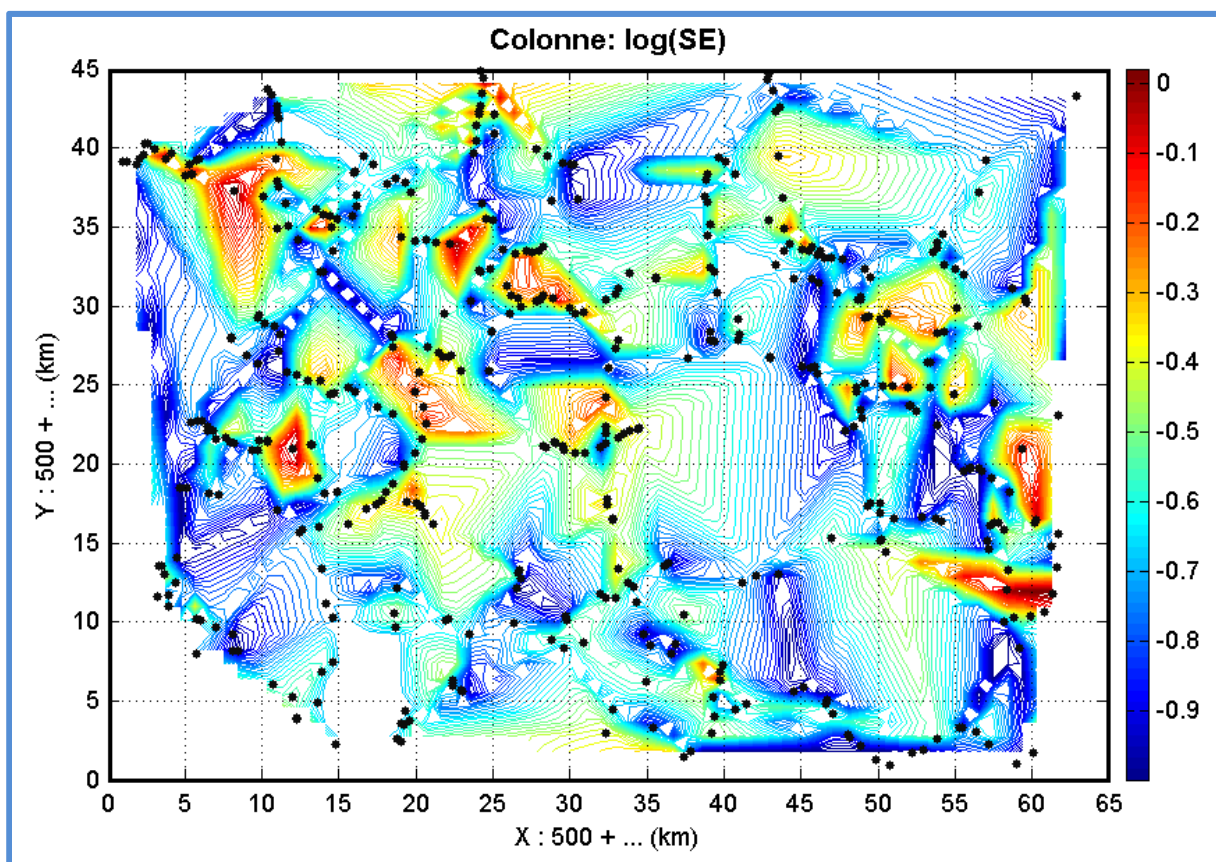
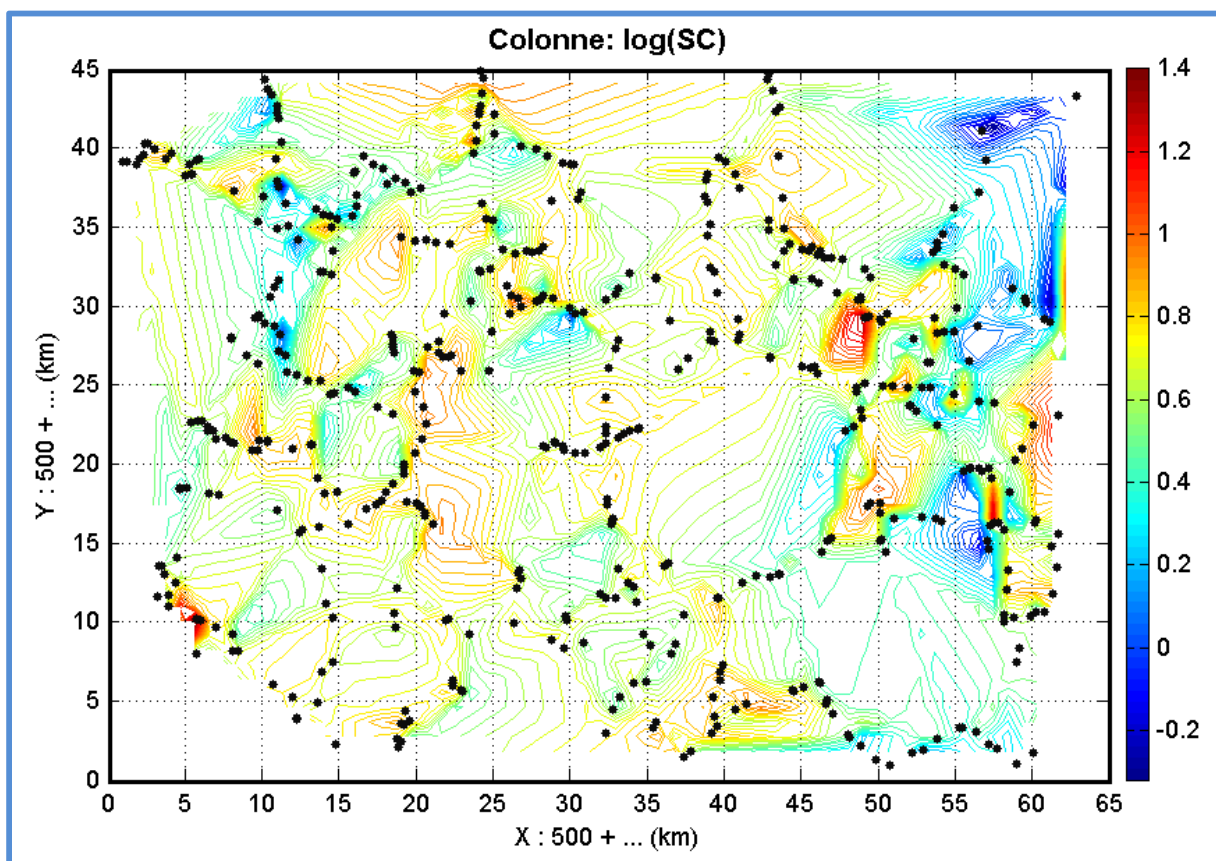


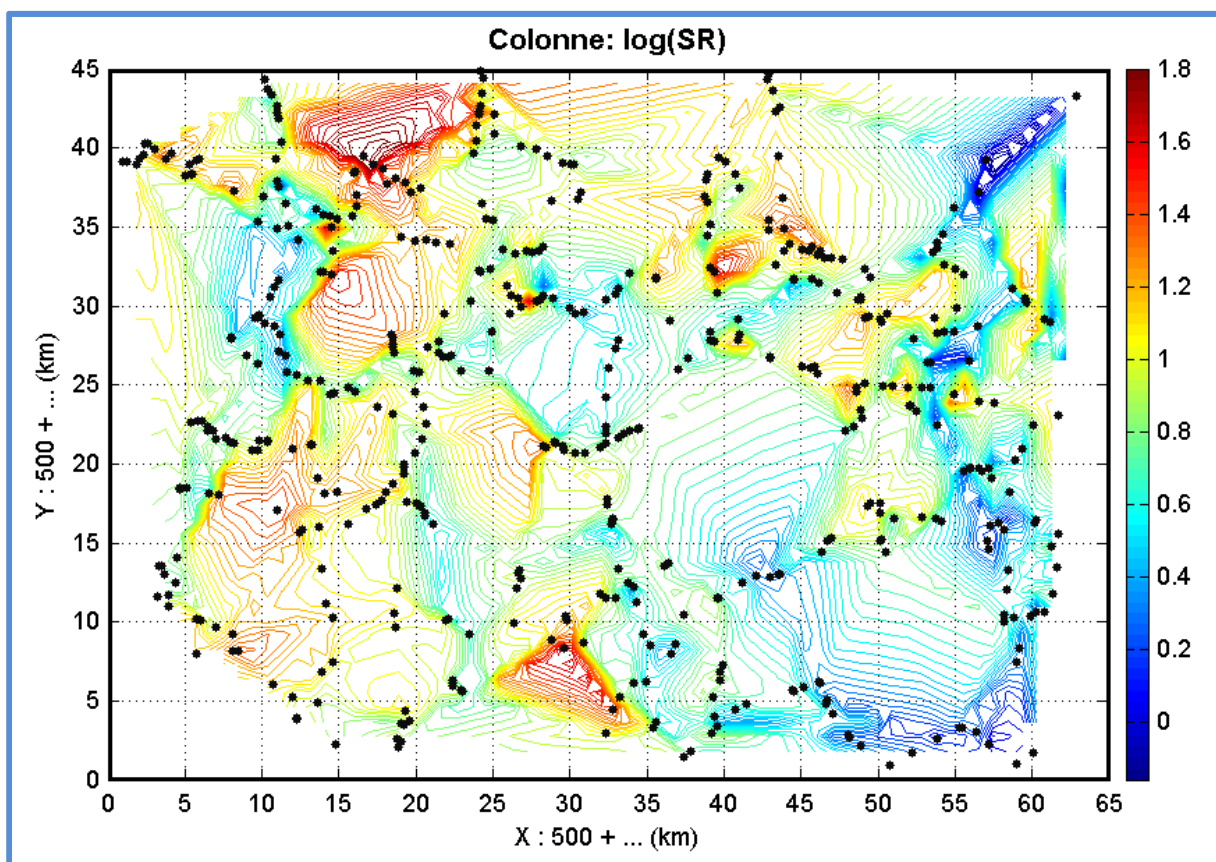
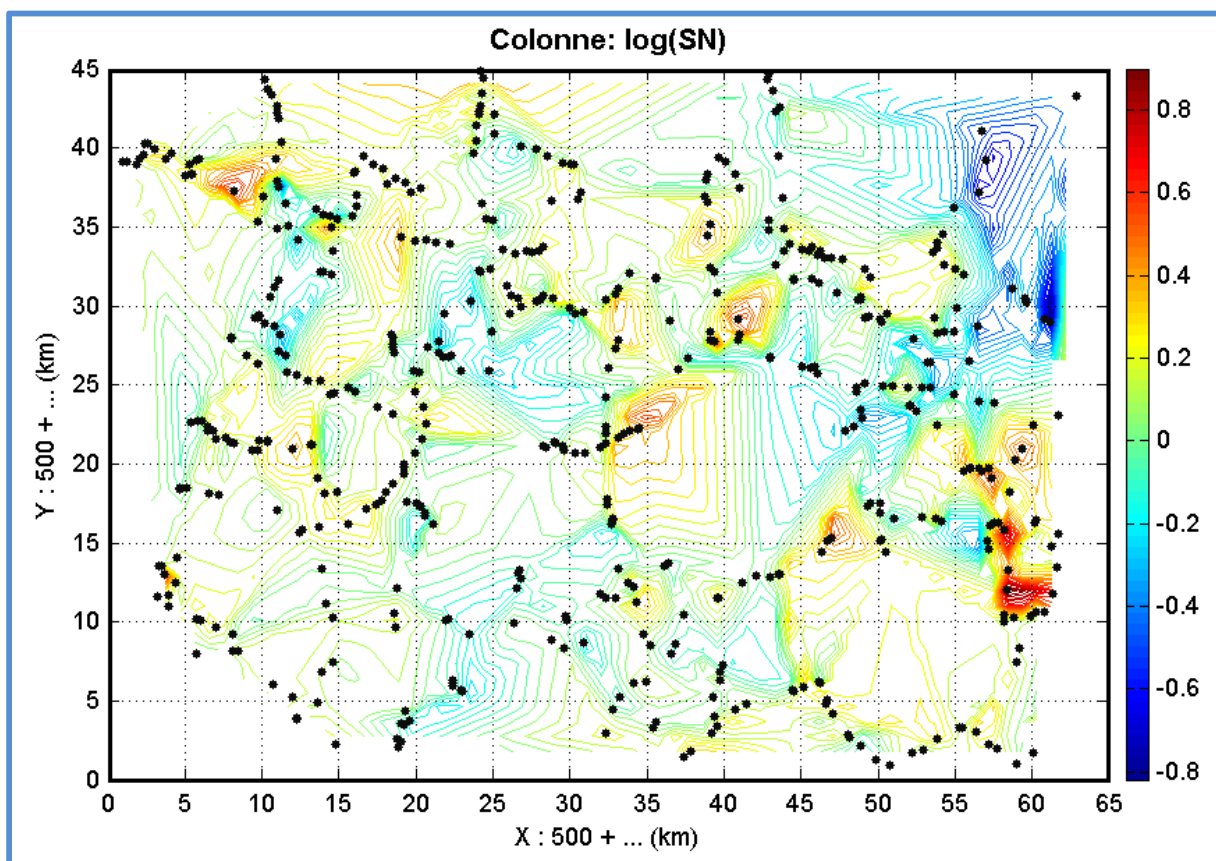




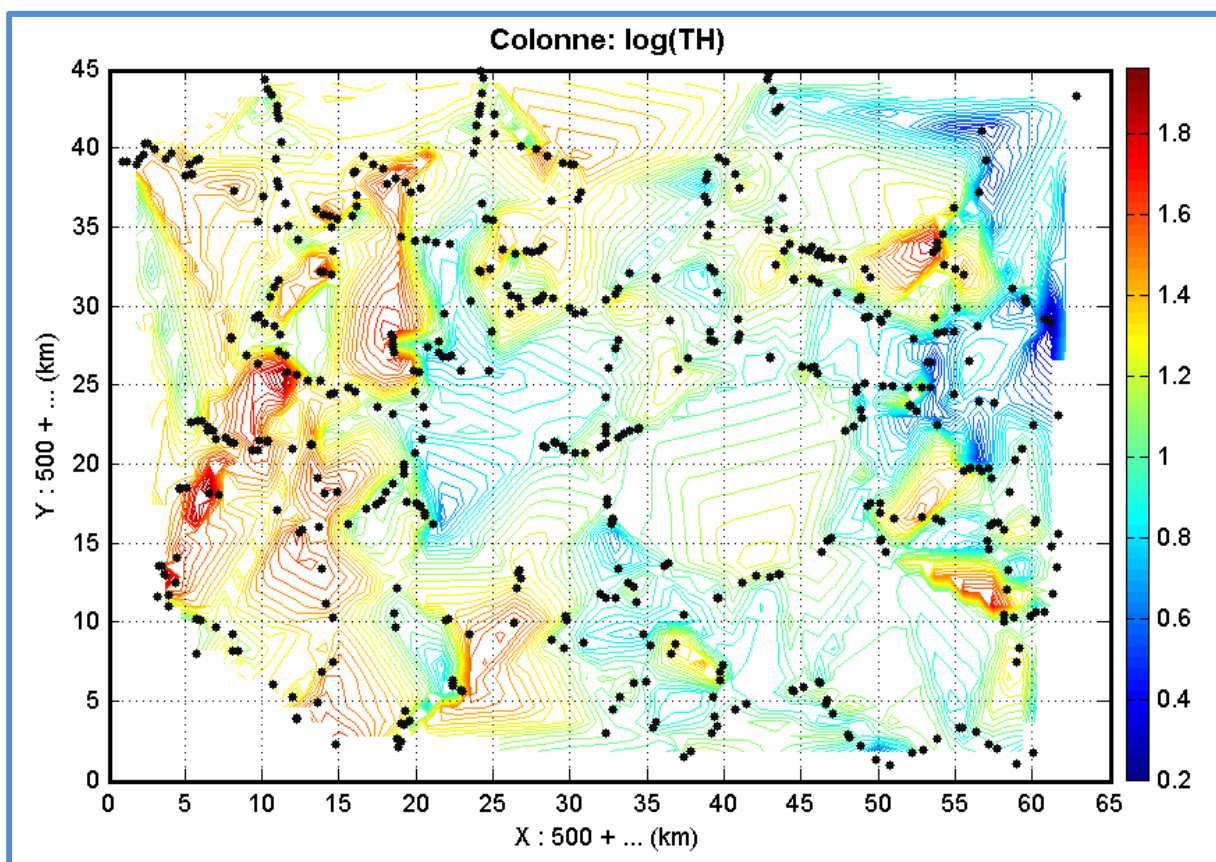
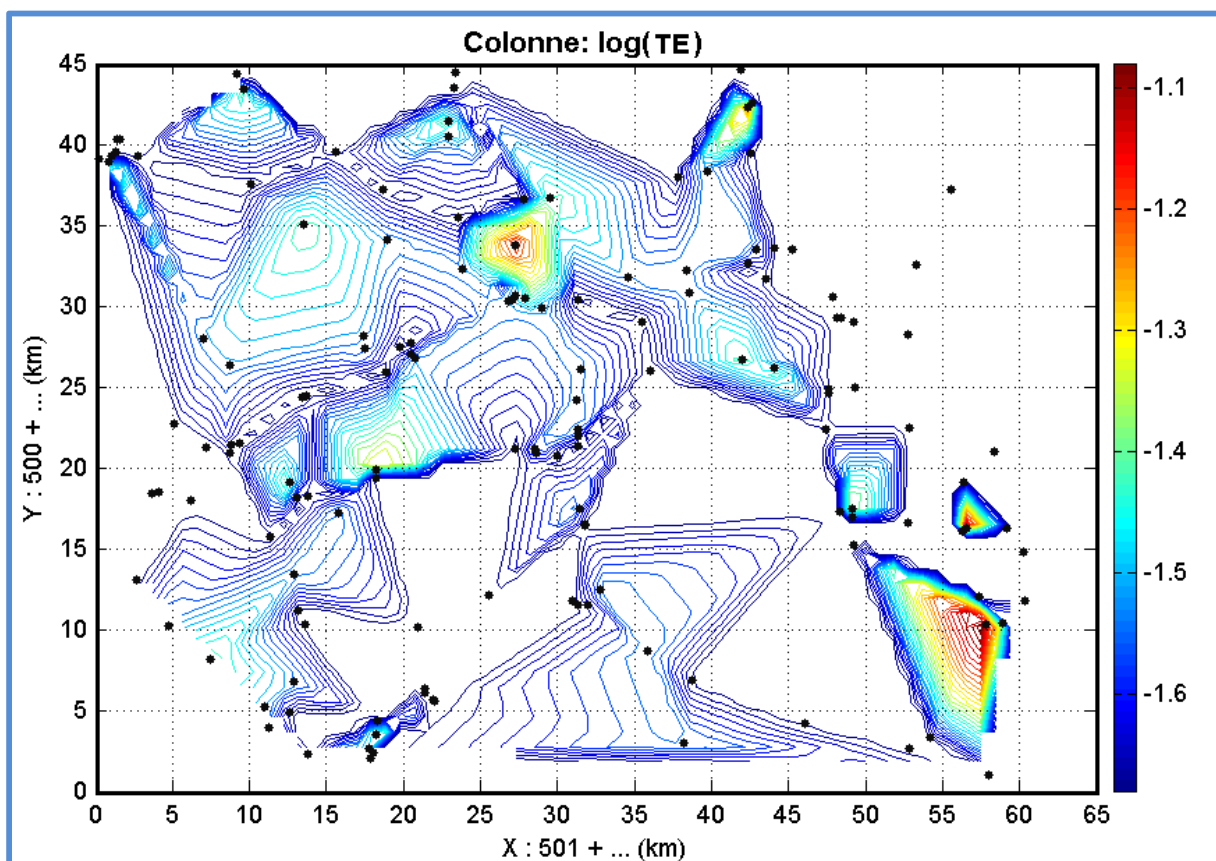


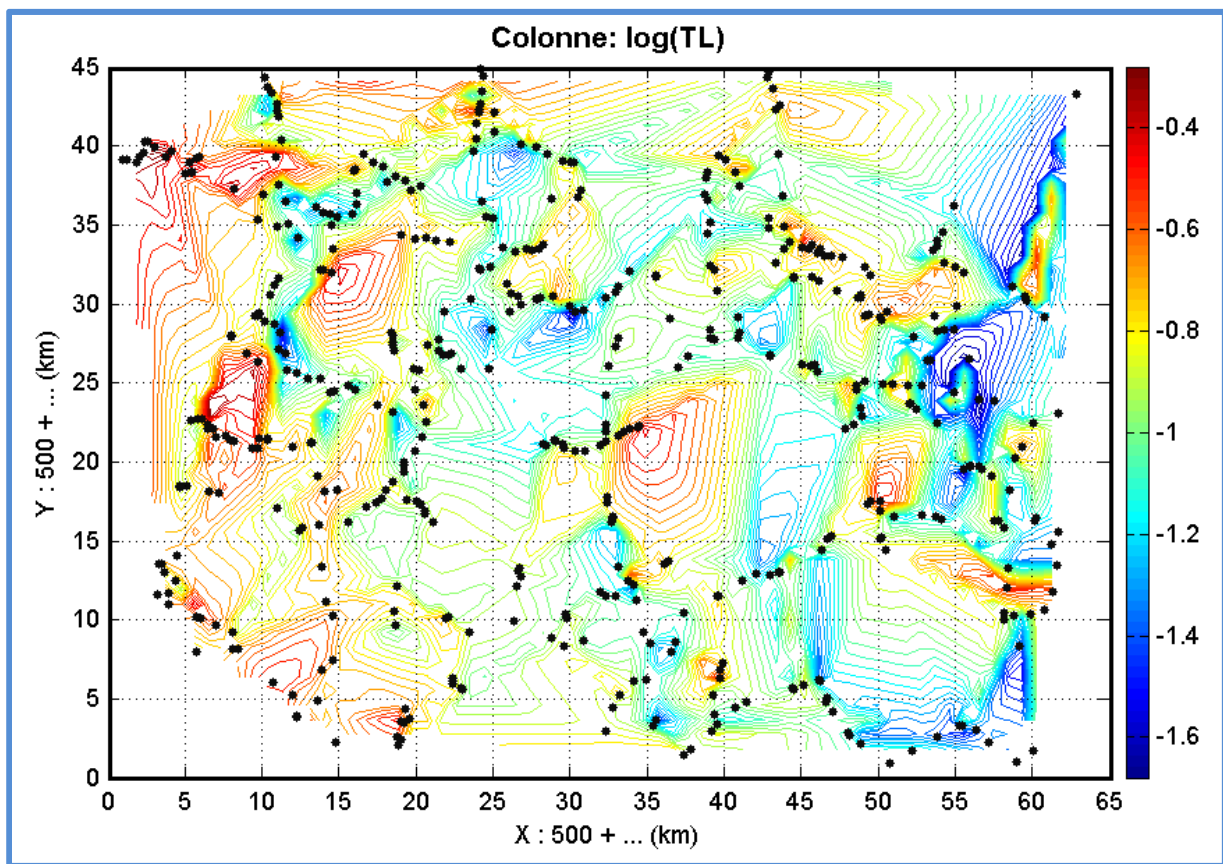
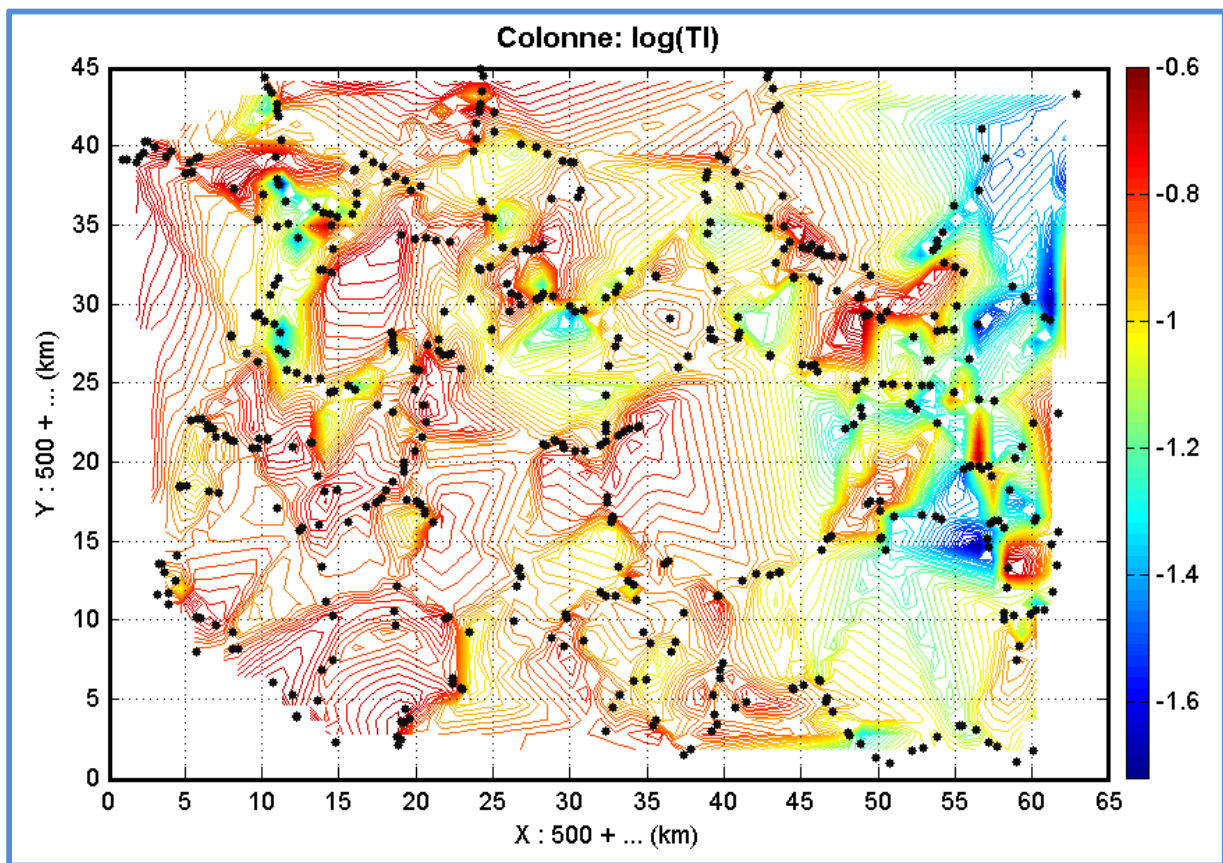




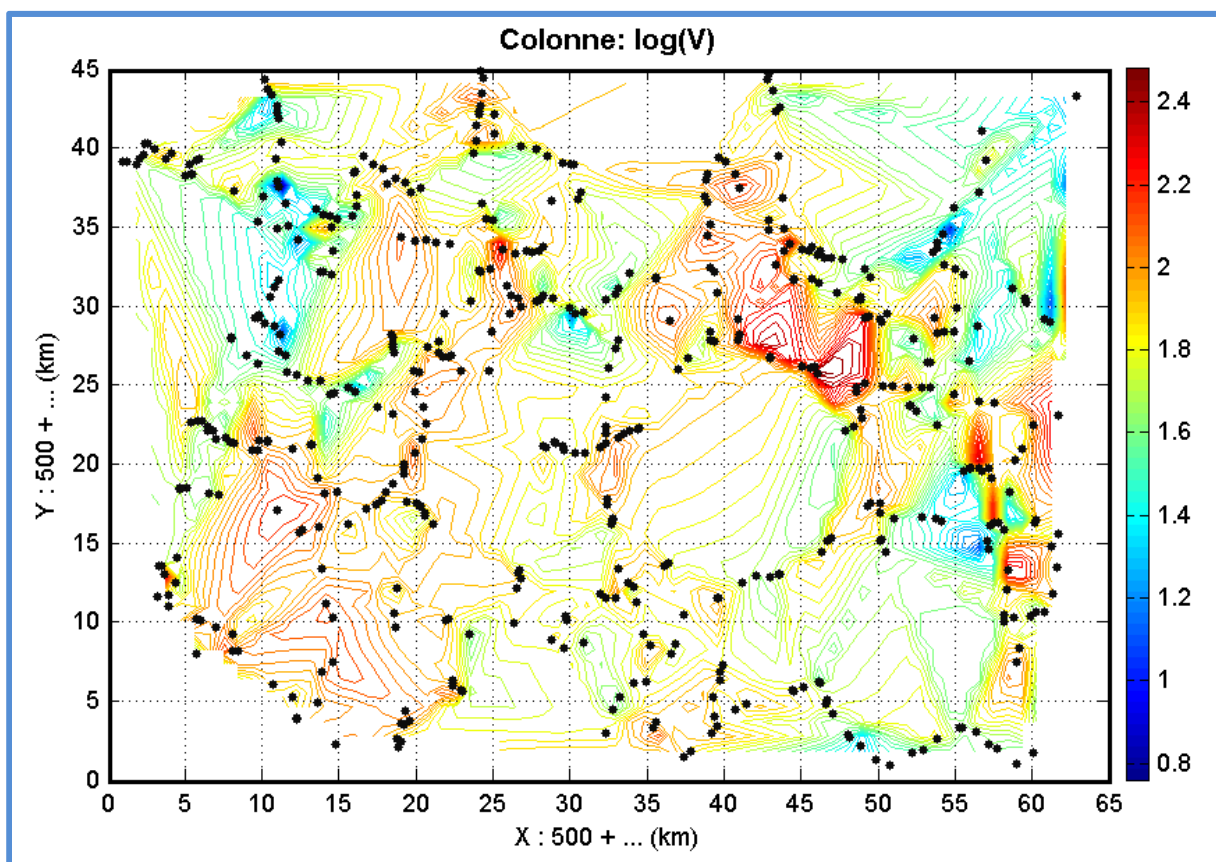
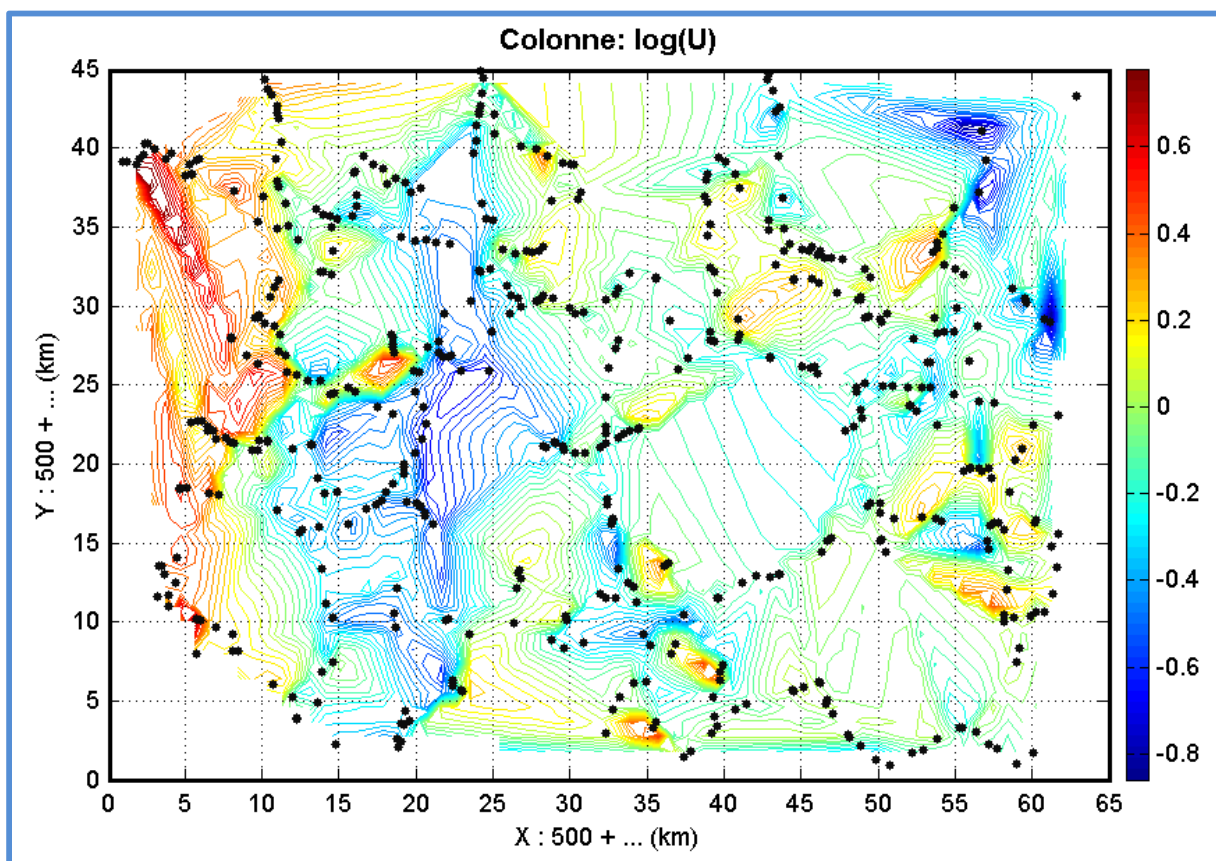


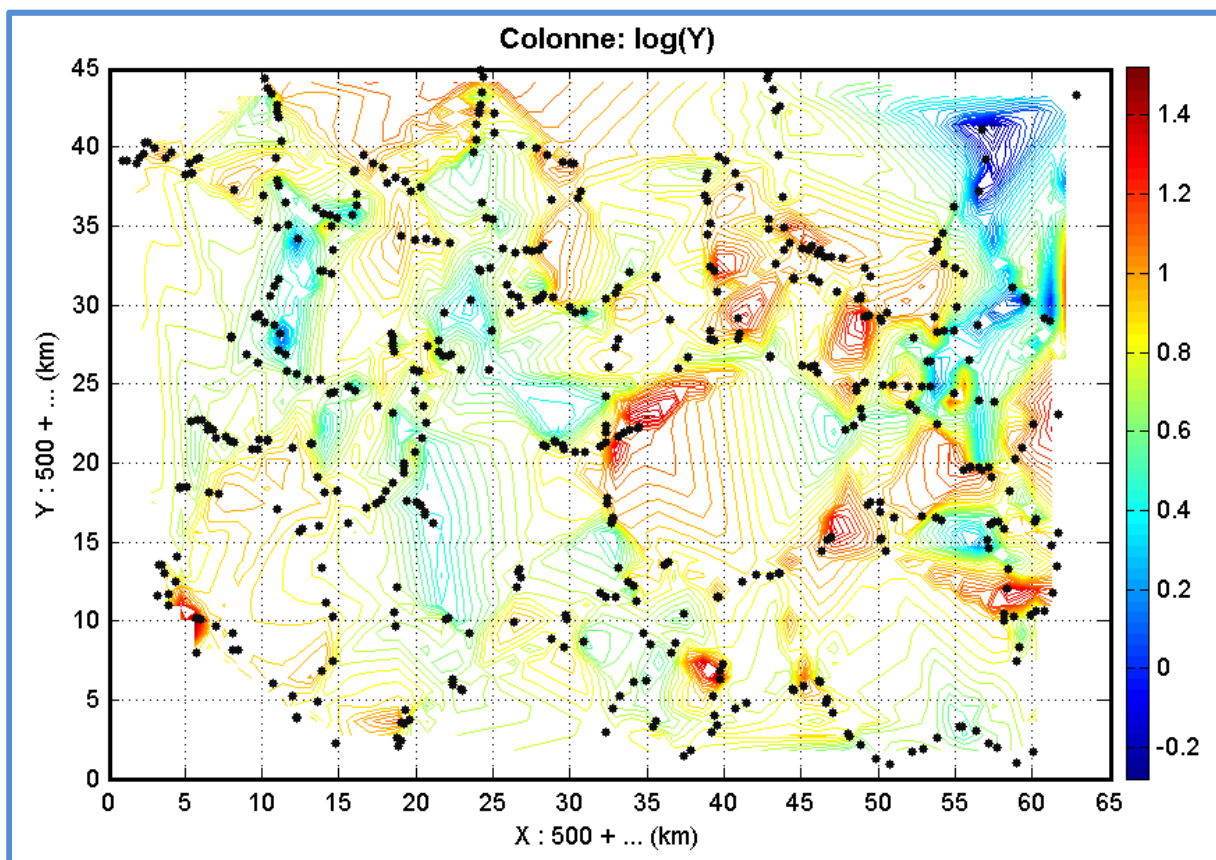
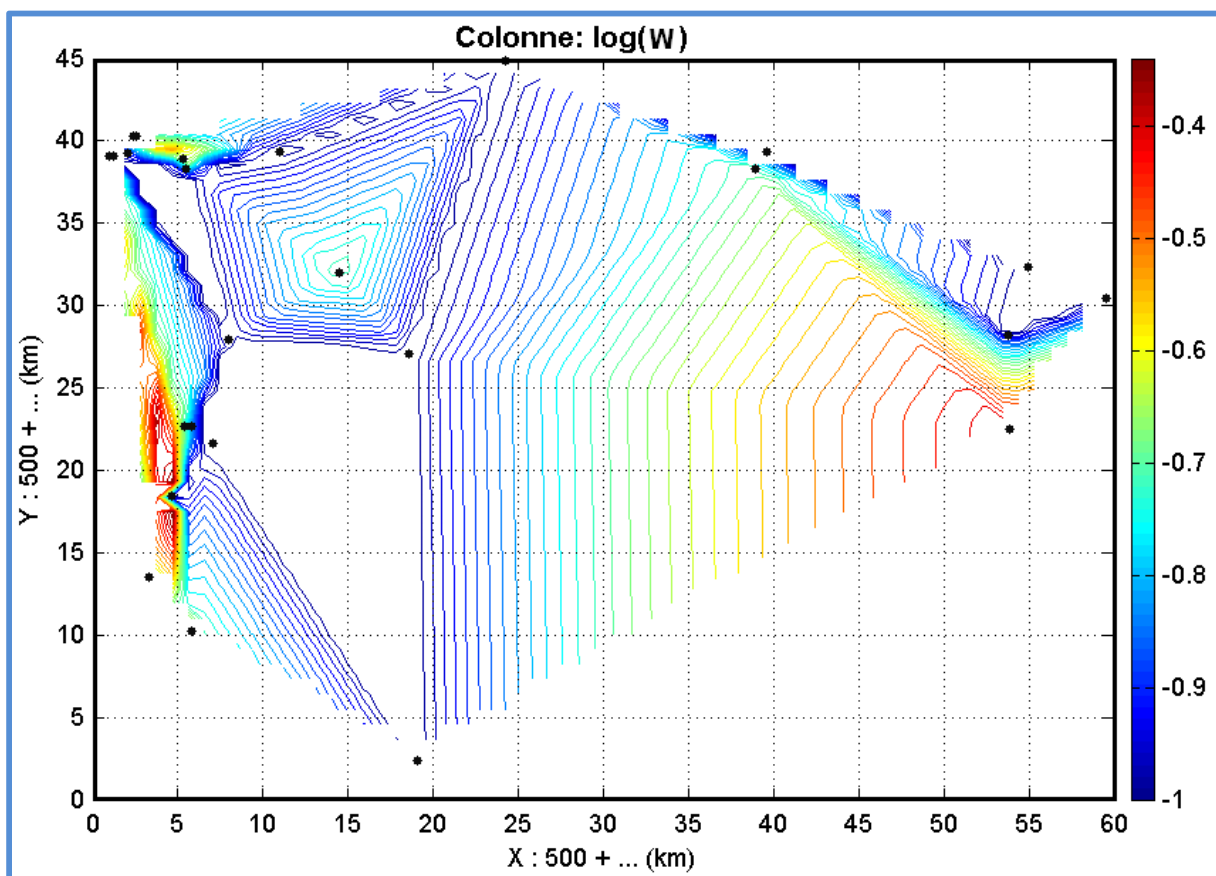


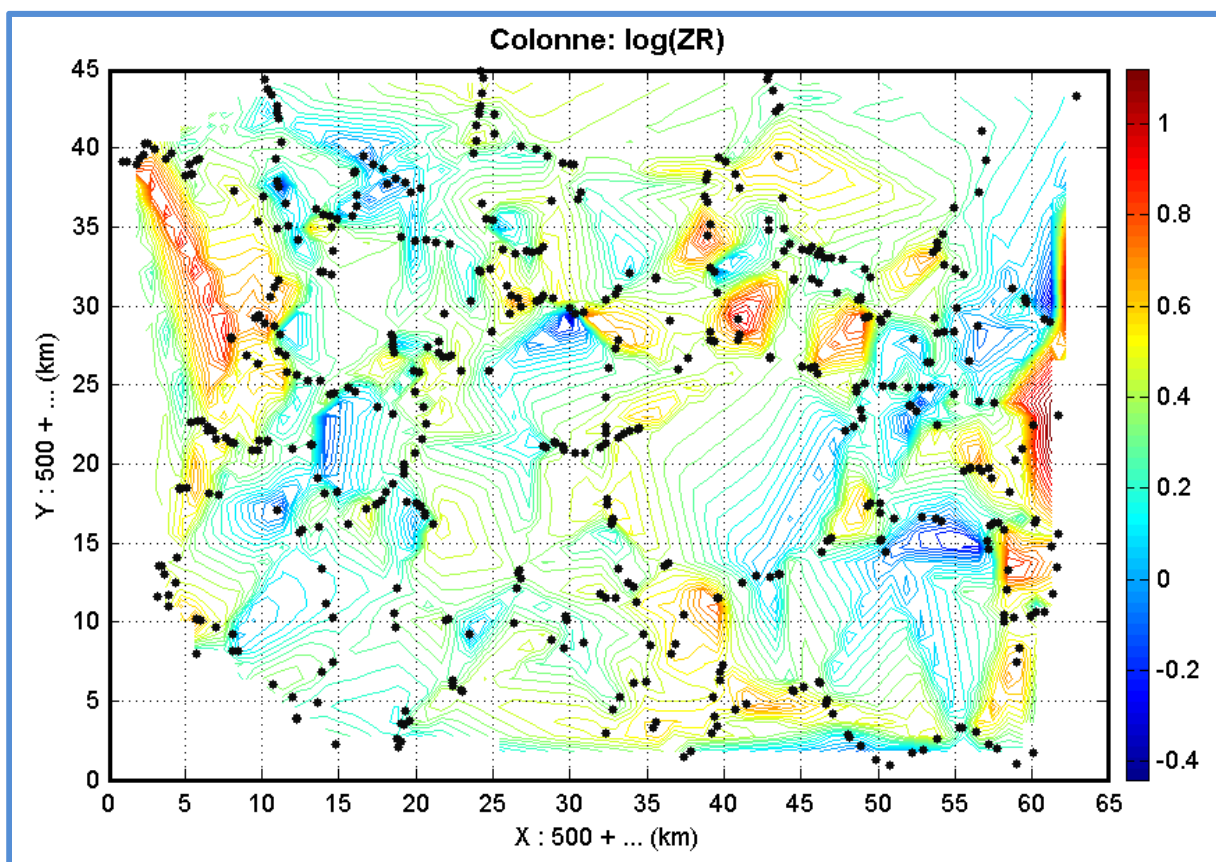
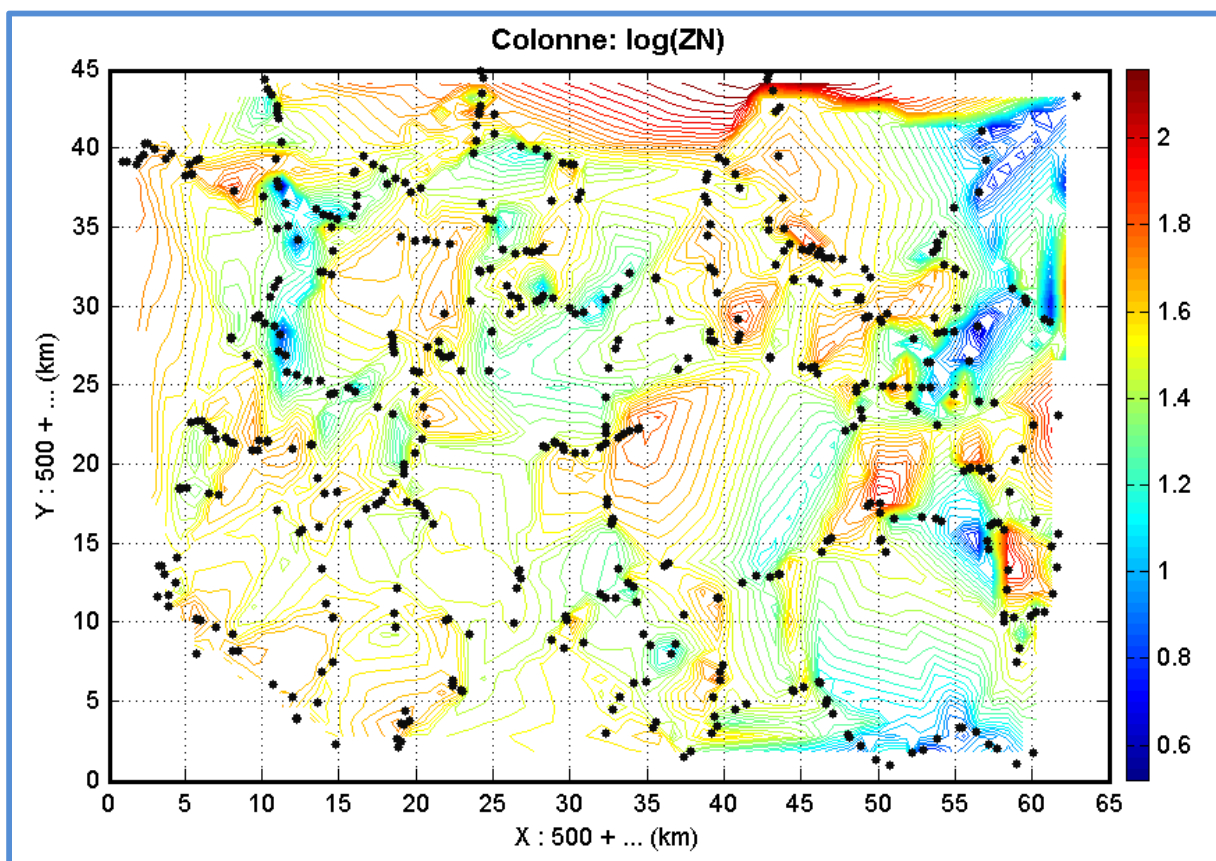














## Annexe 6: L'échelle des temps géologiques.

Les géologues ont convenu d'une nomenclature stratigraphique. La succession des dépôts a permis ainsi de créer une échelle chronologique qui divise l'histoire de la Terre en plusieurs unités qui sont, de la plus longue à la plus courte, l'ÈRE, la PÉRIODE, l'EPOQUE et l'ETAGE. Les noms choisis pour ces unités proviennent de l'histoire de la géologie, et viennent souvent du nom de sites caractéristiques de l'époque concernée.

| ÈRES               | PÉRIODES    | ÉPOQUES          | Début de l'époque (MA) |
|--------------------|-------------|------------------|------------------------|
| <b>CÉNOZOÏQUE</b>  | QUATERNAIRE | HOLOCÈNE         | 0,01                   |
|                    |             | PLÉISTOCÈNE      | 1,65                   |
|                    | NÉOGÈNE     | PLIOCÈNE         | 3,4                    |
|                    |             | MIOCÈNE          | 23,5                   |
|                    | PALÉOGÈNE   | OLIGOCÈNE        | 34                     |
|                    |             | ÉOCÈNE           | 53                     |
|                    |             | PALÉOCÈNE        | 65                     |
| <b>MÉSOZOÏQUE</b>  | CRÉTACÉ     | SUPÉRIEUR        | 96                     |
|                    |             | INFÉRIEUR        | 135                    |
|                    | JURASSIQUE  | SUPÉRIEUR (MALM) | 154                    |
|                    |             | MOYEN (DOGGER)   | 180                    |
|                    |             | INFÉRIEUR (LIAS) | 205                    |
|                    | TRIAS       | SUPÉRIEUR        | 230                    |
|                    |             | MOYEN            | 240                    |
|                    |             | INFÉRIEUR        | 245                    |
| <b>PALÉOZOÏQUE</b> | PERMIEN     | SUPÉRIEUR        | 258                    |
|                    |             | INFÉRIEUR        | 295                    |
|                    | CARBONIFÈRE | SILÉSIE          | 325                    |
|                    |             | DINANTIEN        | 360                    |
|                    | DÉVONIEN    | SUPÉRIEUR        | 375                    |
|                    |             | MOYEN            | 385                    |
|                    |             | INFÉRIEUR        | 410                    |
|                    | SILURIEN    | PRIDOLI          | 415                    |
|                    |             | LUDLOW           | 425                    |
|                    |             | WENLOCK          | 430                    |
|                    |             | LLANDOVERY       | 435                    |
|                    | ORDOVICIEN  | ASHGILL          | 445                    |

|                      |                         |           |      |
|----------------------|-------------------------|-----------|------|
|                      |                         | CARADOC   | 455  |
|                      |                         | LLANDEILO |      |
|                      |                         | LLANVIRN  | 470  |
|                      |                         | ARENIG    | 485  |
|                      |                         | TRÉMADOC  | 500  |
|                      | CAMBRIEN                | SUPÉRIEUR |      |
|                      |                         | MOYEN     |      |
|                      |                         | INFÉRIEUR | 540  |
| PROTÉROZOÏQUE        | PROTÉROZOÏQUE SUPÉRIEUR |           | 1000 |
|                      | PROTÉROZOÏQUE MOYEN     |           | 1600 |
|                      | PROTÉROZOÏQUE INFÉRIEUR |           | 2500 |
| KATARCHÉEN – ARCHÉEN |                         |           |      |

## Annexe 7: Programmation pour le logiciel de modélisation

- **Programme principal**

```

clc; clear all; close all
global A B axp p1 p2 p3 p4 p5 r1 r2 r3 r4 tr num ab aq vb z vma vmi chc
% lecture du fichier de données
nom = 'geochem_PQ53_98.xls';
[A, B] = xlsread(nom);
% fenêtre principale et axe
ss = get(0,'screensize');
figure('name','Données chimiques','numbertitle','off','menubar','none',...
    'position',[ (ss(3)-700)/2 (ss(4)-400)/2 700 400])
xi = A(:,5); yi = A(:,6); z = A(:,8);
xl = max(xi)-min(xi); yl = max(yi)-min(yi);
axp = axes('units','pixels','position',[45 40 460 460*yl/xl],'fontsize',9);
% valeurs limites
vzc = (max(z)-min(z))/200;
vma = uicontrol(gcf,'style','slider','min',mean(z)+vzc,'max',max(z),...
    'sliderstep',[1/100 0.025],'position',[45+460+15 40+460*yl/xl/2 20 460*yl/xl/2],...
    'callback','call_graphe(15)','value',max(z),'backgroundcolor','w','visible','off');
vmi = uicontrol(gcf,'style','slider','min',min(z),'max',mean(z)-vzc,...

```

```

'sliderstep',[1/100 0.025],'position',[45+460+15 40 20 460*y1/x1/2],...
'callback','call_graphe(16)','value',min(z),'backgroundcolor','w','visible','off');
% colonne à représenter
xo = 700-(110+20); yo = 342;
s1 = ""; s2 = "";
s3 = ""; s4 = ""; s5 = "";
for i = 0:10
    s1 = strvcat(s1,char(B(1,8+i))); s2 = strvcat(s2,char(B(1,19+i))); %#ok<VCAT>
    s3 = strvcat(s3,char(B(1,30+i))); s4 = strvcat(s4,char(B(1,41+i))); %#ok<VCAT>
end
for i = 0:8
    s5 = strvcat(s5,char(B(1,52+i))); %#ok<VCAT>
end
s1 = strvcat(s1,' '); s2 = strvcat(s2,' '); num = 8; %#ok<VCAT>
s3 = strvcat(s3,' '); s4 = strvcat(s4,' '); s5 = strvcat(s5,' '); %#ok<VCAT>
cadre(xo-10,yo-130,130,165)
uicontrol(gcf,'style','text','string','Colonne à représenter','position',[xo-3 yo+28 112 14])
uicontrol(gcf,'style','text','string','C_01_à_11:','position',[xo-2 yo+2 60 14])
p1 = uicontrol(gcf,'style','popup','string',s1,'position',[xo+60 yo 50 20],...
    'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(1)','value',1); yo = yo-30;
uicontrol(gcf,'style','text','string','C_12_à_22:','position',[xo-2 yo+2 60 14])
p2 = uicontrol(gcf,'style','popup','string',s2,'position',[xo+60 yo 50 20],...
    'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(2)','value',12); yo = yo-30;
uicontrol(gcf,'style','text','string','C_23_à_33:','position',[xo-2 yo+2 60 14])
p3 = uicontrol(gcf,'style','popup','string',s3,'position',[xo+60 yo 50 20],...
    'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(3)','value',12); yo = yo-30;
uicontrol(gcf,'style','text','string','C_34_à_44:','position',[xo-2 yo+2 60 14])
p4 = uicontrol(gcf,'style','popup','string',s4,'position',[xo+60 yo 50 20],...
    'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(4)','value',12); yo = yo-30;
uicontrol(gcf,'style','text','string','C_45_à_53:','position',[xo-2 yo+2 60 14])
p5 = uicontrol(gcf,'style','popup','string',s5,'position',[xo+60 yo 50 20],...
    'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(5)','value',10);
% mode de représentation
yo = yo-65;

```

```

cadre(xo-10,yo-102,130,137)
uicontrol(gcf,'style','text','string','Mode de présentation','position',[xo-2 yo+27 110 14])
r1 = uicontrol(gcf,'style','radio','string','Surfaces colorées','position',[xo yo+2 110 20],...
    'callback','call_graphe(6)','value',1);
r2 = uicontrol(gcf,'style','radio','string','Lignes d"isovaleurs','position',[xo yo-18 112 20],...
    'callback','call_graphe(7)','value',0);
r3 = uicontrol(gcf,'style','check','string','Points de mesures','position',[xo yo-42 110 20],...
    'callback','call_graphe(10)');
r4 = uicontrol(gcf,'style','check','string','Logarithme décimal','position',[xo yo-95 110 20]);
chc = uicontrol(gcf,'style','popup','string','Valeurs brutes|Anomalies % à S|Anomalies % à
S1',...
    'position',[xo yo-68 110 20],'backgroundcolor','w','callback','call_graphe(17)');
% graphe
yo = yo-113;
tr = uicontrol(gcf,'style','push','string','Tracer','position',[xo+5 yo-25 100 20],...
    'callback','call_graphe(9)');
% menu
me = uimenu(gcf,'label','&Outils');
ab = uimenu(me,'label','Afficher la &barre standard','callback','call_graphe(11)');
aq = uimenu(me,'label','&Afficher le quadrillage','callback','call_graphe(14)');
vb = uimenu(me,'label','&Visualiser les valeurs brutes','callback','call_graphe(12)');
uimenu(me,'label','&Exporter l"image','callback','call_graphe(13)','separator','on');
uimenu(me,'label','&Quitter','callback','close(gcf)','separator','on')
set(gcf,'color',get(0,'defaultuicontrolbackgroundcolor'),'resize','off')

```

- **sous programme:**

#### **Makegrid:**

```

function makegrid
global axp z qx qy
% fonction liée à prog_graphe.m
axes(axp)
hold on
ux = get(axp,'xtick'); vx = get(axp,'xlim');
uy = get(axp,'ytick'); vy = get(axp,'ylim');
ma = max(z);

```

```

for i = 1:length(ux)
    qx(i) = plot3([ux(i) ux(i)],vy,[ma ma],':k');
end
for j = 1:length(uy)
    qy(j) = plot3(vx,[uy(j) uy(j)],[ma ma],':k');
end
hold off

```

#### Cadre :

```

function cadre(xo,yo,lx,ly)
% fonction cadre(xo,yo,lx,ly):
% création d'un cadre placé à la position [xo yo lx ly];
c = get(0,'defaultuicontrolbackgroundcolor');
c1 = c-[56 48 48]/255; c1 = c1.*(c1>0);
c2 = c+[50 48 48]/255; c2 = c2.*(c2<1)+(c2>1);
uicontrol(gcf,'style','frame','units','pixels','position',[xo yo lx ly],'foregroundcolor',c1)
uicontrol(gcf,'style','frame','units','pixels','position',[xo yo-1 lx+1 1],'foregroundcolor',c2)
uicontrol(gcf,'style','frame','units','pixels','position',[xo+1 yo+ly-2 lx-2 1],'foregroundcolor',c2)
uicontrol(gcf,'style','frame','units','pixels','position',[xo+1 yo+1 1 ly-2],'foregroundcolor',c2)
uicontrol(gcf,'style','frame','units','pixels','position',[xo+lx yo-1 1 ly+1],'foregroundcolor',c2)

```

#### Call\_graphe:

```

function call_graphe(swi)
% fonction liée à prog_graphe.m
global A B axp p1 p2 p3 p4 p5 r1 r2 r3 r4 tr num pm ab vb
global x y z X Y Z aq qx qy vmi vma pmi pma C plt coul chc
warning off
switch swi
case 1
    v = get(p1,'value');
    if v~=12
        num = 8+v-1; z = A(:,num);
        [an, av] = hist(z,2e3);
        vm = find(an==max(an)); moy = max(av(vm));
        set(vma,'min',moy+1e-3,'max',max(z),'value',max(z))
        set(vmi,'min',min(z),'max',moy-1e-3,'value',min(z))
    end
end

```



```

        set(p2,'value',12); set(p3,'value',12)
        set(p4,'value',12); set(p5,'value',10)
    end
    call_graphe(8)
case 2
    v = get(p2,'value');
    if v~=12
        num = 19+v-1; z = A(:,num);
        [an, av] = hist(z,2e3);
        vm = find(an==max(an)); moy = max(av(vm));
        set(vma,'min',moy+1e-3,'max',max(z),'value',max(z))
        set(vmi,'min',min(z),'max',moy-1e-3,'value',min(z))
        set(p1,'value',12); set(p3,'value',12)
        set(p4,'value',12); set(p5,'value',10)
    end
    call_graphe(8)
case 3
    v = get(p3,'value');
    if v~=12
        num = 30+v-1; z = A(:,num);
        [an, av] = hist(z,2e3);
        vm = find(an==max(an)); moy = max(av(vm));
        set(vma,'min',moy+1e-3,'max',max(z),'value',max(z))
        set(vmi,'min',min(z),'max',moy-1e-3,'value',min(z))
        set(p1,'value',12); set(p2,'value',12)
        set(p4,'value',12); set(p5,'value',10)
    end
    call_graphe(8)
case 4
    v = get(p4,'value');
    if v~=12
        num = 41+v-1; z = A(:,num);
        [an, av] = hist(z,2e3);
        vm = find(an==max(an)); moy = max(av(vm));

```

```

        set(vma,'min',moy+1e-3,'max',max(z),'value',max(z))
        set(vmi,'min',min(z),'max',moy-1e-3,'value',min(z))
        set(p1,'value',12); set(p2,'value',12)
        set(p3,'value',12); set(p5,'value',10)
    end
    call_graphe(8)
case 5
    v = get(p5,'value');
    if v~=10
        num = 52+v-1; z = A(:,num);
        [an, av] = hist(z,2e3);
        vm = find(an==max(an)); moy = max(av(vm));
        set(vma,'min',moy+1e-3,'max',max(z),'value',max(z))
        set(vmi,'min',min(z),'max',moy-1e-3,'value',min(z))
        set(p1,'value',12); set(p2,'value',12)
        set(p3,'value',12); set(p4,'value',12)
    end
    call_graphe(8)
case 6
    set(r1,'value',1); set(r2,'value',0)
case 7
    set(r1,'value',0); set(r2,'value',1)
case 8
    v1 = get(p1,'value'); v2 = get(p2,'value');
    v3 = get(p3,'value'); v4 = get(p4,'value'); v5 = get(p5,'value');
    if v1==12&v2==12&v3==12&v4==12&v5==10 %#ok<AND2>
        set(tr,'enable','off'); set(r1,'enable','off'); set(r2,'enable','off')
        set(r3,'enable','off'); set(vb,'enable','off')
        warndlg('Aucune colonne n'est sélectionnée! Veuillez d'abord choisir une colonne
non vide!','Attention!','modal')
    else
        set(tr,'enable','on'); set(r1,'enable','on'); set(r2,'enable','on')
        set(r3,'enable','on'); set(vb,'enable','on')
    end
end

```

case 9

```
set(gcf,'pointer','watch'); drawnow
set(vma,'visible','off'); set(vmi,'visible','off')
xi = A(:,5)/1e3; yi = A(:,6)/1e3; zi = A(:,num);
nz = find(zi<=0); xi(nz) = []; yi(nz) = []; zi(nz) = []; % élimination des valeurs négatives
ou nulles
if length(xi)<5,
    cla; set(gcf,'pointer','arrow')
    title(sprintf('Colonne: %s',char(B(1,num))), 'fontweight','bold','fontsize',10)
    set(coul,'ylim',[z(1)-1e-6 z(end)+1e-6])
    msgbox(sprintf('Les valeurs sur cette colonne %s sont constantes ou
négatives!',char(B(1,num))), 'Attention','modal')
    return
end
xo = floor(min(xi)/50*50); yo = floor(min(yi)/50*50);
x = xi - xo; y = yi - yo; z = zi;
zma = get(vma,'value'); zmi = get(vmi,'value');
nz = find(z>zma|z<zmi); x(nz) = []; y(nz) = []; zi(nz) = [];
axes(axp)
xl = max(xi)-min(xi); yl = max(yi)-min(yi);
ux = [45 40 460 460*yl/xl];
pm = plot3(x,y,ones(size(x))*max(max(z)),'.','color',[0.05 0.05 0.05],'markersize',9);
if get(r3,'value')==0, set(pm,'visible','off'); else set(pm,'visible','on'); end
hold on
if get(r1,'value')==1
    xe = linspace(min(x),max(x),length(x));
    ye = linspace(min(y),max(y),length(y));
    [X,Y] = meshgrid(xe,ye); Z = griddata(x,y,zi,X,Y);
    if get(chc,'value')==1 & get(r4,'value')==1
        surface(X,Y,log10(Z))
    elseif get(chc,'value')==1 & get(r4,'value')==0
        surface(X,Y,Z)
    elseif get(chc,'value')==2
        S = mean(zi); surface(X,Y,Z-S)
```

```

elseif get(chc,'value')==3
    sigz = std(zi); moyz = mean(zi);
    S1 = moyz + 2*sigz;
    surface(X,Y,Z-S1)
end
shading interp
colormap(jet); coul = colorbar;
set(coul,'units','pixels','position',[ux(1)+ux(3)+8 ux(2) 10 ux(4)],'fontsize',8)
else
    xt = 0:5:ceil((max(xi)-xo)/5)*5; yt = 0:5:ceil((max(yi)-xo)/5)*5;
    xe = linspace(xt(1),xt(end),5*length(xt));
    ye = linspace(yt(1),yt(end),5*length(yt));
    [X,Y] = meshgrid(xe,ye); Z = griddata(x,y,zi,X,Y);
    if get(chc,'value')==1 & get(r4,'value')==1
        zi = log10(zi); Z = log10(Z);
    elseif get(chc,'value')==2
        S = mean(zi); zi = zi - S; Z = Z - S;
    elseif get(chc,'value')==3
        sigz = std(zi); moyz = mean(zi);
        S1 = moyz + 2*sigz;
        zi = zi - S1; Z = Z - S1;
    end
    uN = linspace(min(zi),max(zi),30); up = sprintf('%e',uN(2)-uN(1));
    upd = str2num(up(1:end-5)); upe = str2num(up(end-3:end)); %#ok<ST2NM>
    du = round(upd/2)*2; du = du*10^upe;
    u = sprintf('%e',mean(zi));
    ud = str2num(u(1:end-5)); ue = str2num(u(end-3:end)); %#ok<ST2NM>
    ub = round(ud/10)*10; ub = ub*10^ue;
    levg = ub-du:-du:min(zi); levd = ub:du:max(zi);
    lev = [fliplr(levg) levd];
    [C plt] = contour(X,Y,Z,lev);
    colormap(jet); coul = colorbar;
    set(coul,'units','pixels','position',[ux(1)+ux(3)+8 ux(2) 10 ux(4)],'fontsize',8)

```

```

%
set(plt,'Showtext','on','linewidth',1,'TextStep',get(plt,'LevelStep')*2,'LabelSpacing',288)
%      txt = clabel(C,plt); set(txt,'BackgroundColor','w','fontsize',8)
end
hold off
view(0,90); xlabel(sprintf('X : %d + ... (km)',xo)); ylabel(sprintf('Y : %d + ... (km)',yo))
if get(chc,'value')==1&get(r4,'value')==1
    title(sprintf('Colonne: log(%s)',char(B(1,num))), 'fontweight','bold','fontsize',10)
elseif get(chc,'value')==1&get(r4,'value')==0
    title(sprintf('Colonne: %s',char(B(1,num))), 'fontweight','bold','fontsize',10)
elseif get(chc,'value')==2
    title([sprintf('Colonne: %s',char(B(1,num))) ' \rightarrow Anomalies par rapport à
S'], 'fontweight','bold','fontsize',10)
elseif get(chc,'value')==3
    title([sprintf('Colonne: %s',char(B(1,num))) ' \rightarrow Anomalies par rapport à
S1'], 'fontweight','bold','fontsize',10)
end
set(axp,'xlim',[0 ceil((max(xi)-xo)/5)*5],'ylim',[0 ceil((max(yi)-xo)/5)*5],'position',[45
40 460 460*yl/xl],...
    'xtick',0:5:ceil((max(xi)-xo)/5)*5,'ytick',0:5:ceil((max(yi)-xo)/5)*5,'box','on')
set(aq,'enable','on'); if strcmp(get(aq,'checked'),'on'), makegrid; end
set(gcf,'pointer','arrow')
case 10
    v = get(r3,'value');
    if v==0, set(pm,'visible','off'); else set(pm,'visible','on'); end
case 11
    domymenu('menubar','toggletoolbar',gcbf)
    if strcmp(get(ab,'checked'),'on')
        set(ab,'checked','off')
    else
        set(ab,'checked','on')
    end
case 12
    lz = length(z); axes(axp)

```



```

if lz>0
    plot(1:lz,z,'*-', 'markersize',2); xlim([0 lz])
    hold on
    ma = get(vma,'value'); mi = get(vmi,'value');
    pma = plot([0 lz],[ma ma],':r','erasemode','xor');
    pmi = plot([0 lz],[mi mi],':m','erasemode','xor');
    title(sprintf('Colonne: %s',char(B(1,num))), 'fontweight','bold','fontsize',10)
    xlabel('numéro'); hold off
    set(vma,'visible','on'); set(vmi,'visible','on'); set(aq,'enable','off')
end
case 13
%     [fi,re] = uiputfile(...
%         {'*.tif ','figure uniquement (*.tif)'; ...
%         '*.jpg ','figure uniquement (*.jpg)'; ...
%         '*.bmp ','toute la fenêtre (*.bmp)'}}, ...
%         'Choisir le nom du fichier image','*.tif');
[fi,re] = uiputfile(...
    {'*.tif ','figure uniquement (*.tif)'; ...
    '*.jpg ','figure uniquement (*.jpg)'; ...
    '*.bmp ','toute la fenêtre (*.bmp)'}}, ...
    'Choisir le nom du fichier image');
if ~isequal(fi,0)&~isequal(re,0) %#ok<AND2>
    if strcmp(get(vma,'visible'),'off')
        set(gcf,'PaperUnits','centimeters','PaperType','a4letter','PaperOrientation','portrait',...
            'PaperPosition',[0.1 0.1 14.7 10.3])
    else
        set(gcf,'PaperUnits','centimeters','PaperType','a4letter','PaperOrientation','portrait',...
            'PaperPosition',[0.1 0.1 13.7 10.3])
    end
    nom = [re fi];
    [re, na, ex] = fileparts(nom);
    if isempty(ex), msgbox('Fichier non enregistré! Veuillez préciser l"extension du
fichier!','Attention!','modal'); return; end
    if strcmp(ex,'.tif')|strcmp(ex,'.tiff')|strcmp(ex,'.TIF')|strcmp(ex,'.TIFF') %#ok<OR2>

```

```

        print(gcf,'-dtiff',[re '\ ' na])
        elseif strcmp(ex,'.bmp')|strcmp(ex,'.BMP')|strcmp(ex,'.bmp')|strcmp(ex,'.BMP')
%#ok<OR2>
        print(gcf,'-dbitmap',[re '\ ' na])
        elseif strcmp(ex,'.jpg')|strcmp(e,'.jpeg')|strcmp(e,'.JPG')|strcmp(e,'.JPEG')
%#ok<OR2>
        print(gcf,'-djpeg',[re '\ ' na])
        else
            msgbox('Fichier non enregistré! Extension non prise en
charge!','Attention!','modal'); return
        end
    end
case 14
    if strcmp(get(aq,'checked'),'on')
        set(aq,'checked','off'); set(qx,'visible','off'); set(qy,'visible','off')
    else
        set(aq,'checked','on'); makegrid
    end
case 15
    v = get(vma,'value'); set(pma,'ydata',[v v])
case 16
    v = get(vmi,'value'); set(pmi,'ydata',[v v])
case 17
    v = get(chc,'value');
    if v>1, set(r4,'enable','off','value',0); else, set(r4,'enable','on'); end
end

```

**Annexe 8:** Métallotecte majeur et minéralisations exprimées pour les anomalies.

| OBJECTID | EASTING | NORTHING | Elements anomaux positifs       | Métallotecte majeur et minéralisations exprimées                                 | Abbreviation                   |
|----------|---------|----------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1        | 515956  | 538426   | B,                              | Néant                                                                            |                                |
| 2        | 516044  | 538548   | Ce,La,                          | Terres rares                                                                     | TR                             |
| 3        | 516094  | 536990   | Sr,                             | Strontium                                                                        | Sr                             |
| 4        | 516177  | 536318   |                                 | Néant                                                                            |                                |
| 5        | 530838  | 529635   | Al,Ga, Hf, Hg,Zr,               | Fluide épithermal : corindon, polymétallique non ferreux et or (?),              | FE: C, <i>PNF et Or(?)</i>     |
| 6        | 524220  | 544898   | Al,Ba,Be,Ce,Ga,La,Pb,Sr,Ti,W,Zn | Fluide épithermal : corindon, terre rares, polymetalliques non ferreux et or (?) | FE: C, <i>TR, PNF et Or(?)</i> |
| 7        | 530327  | 529552   |                                 | Néant                                                                            |                                |
| 8        | 529937  | 529857   |                                 | Néant                                                                            |                                |
| 9        | 518154  | 537702   | Ca,P,Sr,Th                      | Fluide mésothermale : apatite                                                    | FM:Ap                          |
| 10       | 517372  | 517404   | Pt                              | PGE / PGM                                                                        | PGE/M                          |
| 11       | 518629  | 538114   | Ca,P,Sr,Th                      | Fluide mésothermale : apatite                                                    | FM:Ap                          |
| 12       | 517250  | 538968   | Ba,Ca,Ce,La,P,Sr                | Fluide épithermal : terres rares, apatite et or (?)                              | FE: <i>TR, Ap et Or(?)</i>     |
| 13       | 519276  | 537782   |                                 | Néant                                                                            |                                |
| 14       | 528925  | 530458   | Al,Cd,Mg,Se,Te                  | Corindon, fluide                                                                 | C, <b>F</b>                    |
| 15       | 524344  | 544445   | Al,Ga,Hg,Se                     | Corindon, fluide épithermal                                                      | C, <b>FE</b>                   |
| 16       | 516760  | 517171   | Al,Hg                           | Corindon, fluide épithermal                                                      | C, <b>FE</b>                   |

|    |        |        |                                  |                                                                       |                            |
|----|--------|--------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 17 | 524295 | 543494 | Pt                               | PGE / PGM                                                             | PGE/M                      |
| 18 | 517812 | 538667 | Ca,P                             | Circulation mésothermale :<br>apatite                                 | CM: <i>Ap</i>              |
| 19 | 524325 | 544383 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 20 | 516589 | 539502 | Ca,Ce,La,P,Sr                    | Fluide épithermal : terres<br>rares, apatite                          | FE: <i>TR, Ap</i>          |
| 21 | 515554 | 516197 | Re                               | PGE / PGM                                                             | PGE/M                      |
| 22 | 528254 | 530661 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 23 | 517732 | 517687 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 24 | 524173 | 542671 | Ba,Ce,Nb,Tl,Zn                   | Fluide épithermal :<br>niobiotantalite, polymétallique<br>non ferreux | FE: N, <i>PNF</i>          |
| 25 | 520739 | 527432 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 26 | 520265 | 537448 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 27 | 519649 | 537202 | B,Re                             | PGE / PGM                                                             | PGE/M                      |
| 28 | 525882 | 531265 |                                  | Néant                                                                 |                            |
| 29 | 523688 | 539631 | B,                               | Néant                                                                 |                            |
| 30 | 523875 | 540454 | Al,B,Ce,Fe,Ga,Pb, Pt, Re,S,Sc,Se | Fluide hypothermal :<br>corindon, BMS, PGE/PGM,<br>terres rares       | FH: C, <i>BMS,PGE/M,TR</i> |
| 31 | 523884 | 541407 | B,Re,S,Te                        | Fluide hypothermel :<br>PGE/PGM                                       | FH: <i>PGE/M</i>           |
| 32 | 524106 | 542171 | B,La                             | Néant                                                                 |                            |
| 38 | 524530 | 535495 | Al,B,Pt,Re                       | Fluide hypothermel :<br>PGE/PGM                                       | FH: <i>PGE/M</i>           |
| 41 | 502396 | 540281 | As, B,CsK,Li,Rb,Tl,U,W           | Fluide hypo/mésothermal<br>ou hydrothermalites : pierres,<br>uranium  | FH/M ou HT: <i>P, U</i>    |

|    |        |        |                            |                                                                               |                                |
|----|--------|--------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 42 | 502299 | 539536 | Cs,K,Li,Rb,Tl,U            | Fluide hypo/mésothermal<br>ou hydrothermalites : pierres,<br>uranium          | FH/M ou HT: <i>P, U</i>        |
| 43 | 502058 | 539283 | B,Cs, K,Li,Pt,Rb,Re,Tl,U,W | Fluide hypo/mésothermal<br>ou hydrothermalites : pierres,<br>uranium, PGE/PGM | FH/M ou HT: <i>P, U, PGE/M</i> |
| 44 | 501841 | 538925 | Cs,K,Li,Pt,Rb,Te,Tl,U,Zr   | Fluide hypo/mésothermal<br>ou hydrothermalites : pierres,<br>uranium, PGE/PGM | FH/M ou HT: <i>P, U, PGE/M</i> |
| 45 | 513904 | 513410 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 46 | 513663 | 515982 | Mg                         | Néant                                                                         |                                |
| 47 | 526155 | 530695 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 48 | 526108 | 529482 | Al                         | Corindon                                                                      | C                              |
| 49 | 519948 | 520665 | Al,Ga                      | Corindon                                                                      | C                              |
| 50 | 519173 | 520011 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 51 | 519238 | 519851 | Te                         | Fluide hypo/mésothermal                                                       | <b>FH/M</b>                    |
| 52 | 519181 | 519339 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 53 | 518460 | 518735 | Re                         | PGE / PGM                                                                     | PGE/M                          |
| 54 | 518064 | 518223 | B,Re                       | PGE / PGM                                                                     | PGE/M                          |
| 55 | 528020 | 533510 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 56 | 524897 | 528406 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 59 | 524088 | 542321 | Al,B,Ba,Ce,Ga,S,Sr         | Fluide épithermal :<br>corindon, sulfures                                     | FE: C,S                        |
| 68 | 505774 | 539237 | La,Th,U                    | Fluide méso/épithermal :<br>terres rares                                      | FM/E: <i>TR</i>                |
| 69 | 526777 | 529988 |                            | Néant                                                                         |                                |
| 70 | 527823 | 530326 | Ba,Ce,Pb,Sr                | Fluide épithermal :                                                           | FE: <i>PNF</i>                 |



|    |        |        |                                                        |                                                                                                         |                              |
|----|--------|--------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|    |        |        |                                                        | polymétallique non ferreux                                                                              |                              |
| 71 | 527890 | 530337 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 72 | 528053 | 530418 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 73 | 501216 | 539126 | Ba,Cs,K,Li,Mg,Rb,Tl,U,W                                | Fluide épithermal ou<br>épithermalites : pierres, uranium                                               | FE ou Etes: <i>P,U</i>       |
| 74 | 500957 | 539093 | As,B,Ba,Cs,K,Li,Mg,Rb,Ti,Tl,W                          | Fluide épithermal ou<br>épithermalites : pierres, uranium                                               | FE ou Etes: <i>P,U</i>       |
| 75 | 505882 | 539334 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 76 | 508200 | 537253 | Al,Ba,Bc,Cd,Ce,Ga,Hg,La,Li,Mg,Nb,Pb,S,Se,Sn,Ti,Tl,U,Zn | Fluide épithermal :<br>corindon, pierres, terres rares,<br>métaux rares, polymétalliques<br>non ferreux | FE: <i>C,P,TR,MR,PNF</i>     |
| 77 | 510073 | 536938 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 78 | 511503 | 536485 | Re                                                     | Néant                                                                                                   |                              |
| 79 | 514134 | 511191 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 80 | 527518 | 533365 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 81 | 527155 | 533481 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 82 | 525663 | 533539 | Fe,V                                                   | Néant                                                                                                   |                              |
| 83 | 524171 | 532182 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 84 | 524831 | 532304 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 85 | 524097 | 532214 |                                                        | Néant                                                                                                   |                              |
| 86 | 523572 | 530312 | Pt                                                     | PGE / PGM                                                                                               | PGE/M                        |
| 88 | 526604 | 530475 | B,Cr,Cu,Hf,Pb,Pt,Sc,Ti,Zr                              | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM, chromite,<br>polymétalliques non ferreux,<br>métaux rares              | FH: <i>PGE/M, Cr, PNF,MR</i> |
| 89 | 505278 | 538932 | W,                                                     | Néant                                                                                                   |                              |

|     |        |        |                                                                   |                                                                                            |                              |
|-----|--------|--------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 90  | 505362 | 538382 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 91  | 505473 | 538301 | Al,B,Ba,Be,Ce,Cs,Ga,Hg,K,Li,Mg,Nb,Pb,Rb,Se,Tl,W                   | Fluide épithermal :<br>corindon, pierres, métaux rares,<br>polymétalliques non ferreux     | FE: C, <i>P,MR,PNF</i>       |
| 92  | 520701 | 522579 | Al,B,Fe,Ga,Nb,Re,S,Se                                             | Fluide hypothermal :<br>corindon,, BMS, PGE/PGM                                            | FH: C, <i>BMS,PGE/M</i>      |
| 93  | 520359 | 521552 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 94  | 505061 | 538272 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 95  | 504143 | 539705 | B,Rb                                                              | Néant                                                                                      |                              |
| 96  | 503717 | 539298 | Al,B,Ba,Be,Cd,Ce,Co,Cs,Ga,Hg,K,Li,Mn,Mo,Nb,Pb,Rb,S,Sc,Se,Sr,Ti,Tl | Fluide hypothermal :<br>corindon, pierres,<br>polymétalliques non ferreux,<br>métaux rares | FH: C, <i>P,PNF,MR</i>       |
| 97  | 503032 | 539927 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 98  | 521876 | 529540 | As,Ca,Re                                                          | Néant                                                                                      |                              |
| 169 | 514584 | 510270 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 170 | 519967 | 534098 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 171 | 511029 | 542660 | B                                                                 | Néant                                                                                      |                              |
| 172 | 510585 | 543377 | Cs,K,Li,Mg,Rb,Te                                                  | Fuide : pierres                                                                            | F: <i>P</i>                  |
| 173 | 510334 | 543685 | Re                                                                | PGE / PGM                                                                                  | PGE/M                        |
| 174 | 510132 | 544367 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 175 | 526400 | 533319 | B,                                                                | Néant                                                                                      |                              |
| 176 | 521498 | 527006 | Co,Fe,Hf,Pt,Sc,V,Zr                                               | Fuide hypothermal :<br>PGE/PGM, BMS, pierres ou<br>métaux rares                            | FH: <i>PGE/M,BMS,P ou MR</i> |
| 177 | 521454 | 527718 |                                                                   | Néant                                                                                      |                              |
| 178 | 513576 | 519060 | Te,Th                                                             | Néant                                                                                      |                              |

|     |        |        |                            |                                                   |              |
|-----|--------|--------|----------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
| 179 | 518760 | 502622 | K,Mg,Rb,Ti                 | Pierres                                           |              |
| 180 | 519031 | 503548 | Cu,K,La,Mg, Mo,Pt,Rb,Ti,Tl | BMS, PGE/PGM, métaux rares,                       | BMS,PGE/M,MR |
| 181 | 519306 | 504375 | K,Mg                       | Néant                                             |              |
| 182 | 514100 | 518175 | K,Mg,Na,Th                 | Néant                                             |              |
| 183 | 512283 | 503894 | Pt                         | PGE / PGM                                         | PGE/M        |
| 184 | 512291 | 503818 | K,Mg,Rb,Ti                 | Néant                                             |              |
| 185 | 513575 | 504871 |                            | Néant                                             |              |
| 186 | 514790 | 502292 | Th                         | Néant                                             |              |
| 187 | 511954 | 505239 | As                         | Néant                                             |              |
| 188 | 513863 | 506799 | Ca,P                       | Néant                                             |              |
| 189 | 514561 | 507429 |                            | Néant                                             |              |
| 192 | 522088 | 526796 |                            | Néant                                             |              |
| 193 | 521723 | 526750 |                            | Néant                                             |              |
| 194 | 511255 | 540355 |                            | Néant                                             |              |
| 195 | 510948 | 542239 |                            | Néant                                             |              |
| 200 | 509680 | 526307 | Cs,K,Pb,Rb,Th,Tl, U,       | Fluide méso/épithermal :<br>pierres, métaux rares | FM/E:P,MR    |
| 201 | 518522 | 523125 |                            | Néant                                             |              |
| 205 | 530926 | 520706 | B                          | Néant                                             |              |
| 206 | 509842 | 521444 | Rb,Sc,Th,Tl, V,            | Néant                                             |              |
| 207 | 511048 | 537552 |                            | Néant                                             |              |
| 208 | 510946 | 537881 |                            | Néant                                             |              |
| 209 | 522380 | 506299 |                            | Néant                                             |              |

|     |        |        |                       |                                                |         |
|-----|--------|--------|-----------------------|------------------------------------------------|---------|
| 210 | 522406 | 506117 |                       | Néant                                          |         |
| 211 | 522418 | 506306 |                       | Néant                                          |         |
| 212 | 522936 | 505654 |                       | Néant                                          |         |
| 213 | 510722 | 506036 | K,Rb,Tl               | Néant                                          |         |
| 214 | 508436 | 508130 | Ca,P,Te               | Néant                                          |         |
| 215 | 508106 | 508184 | Ca,Na,P,V             | Néant                                          |         |
| 216 | 522220 | 533907 | Al,B,Ga,Hg,Nb,S,Se    | Néant                                          |         |
| 217 | 521254 | 534002 |                       | Néant                                          |         |
| 218 | 520700 | 534166 | Ba,Co,K,Mg            | Néant                                          |         |
| 219 | 508971 | 526869 |                       | Néant                                          |         |
| 221 | 519193 | 503506 | K,Mg,Rb,Te            | Néant                                          |         |
| 222 | 523051 | 505573 |                       | Néant                                          |         |
| 223 | 519603 | 503794 | Na                    | Néant                                          |         |
| 225 | 510356 | 521413 |                       | Néant                                          |         |
| 226 | 510327 | 521479 | Pt                    | PGE / PGM                                      | PGE/M   |
| 227 | 512014 | 520986 | Al,B,Ce,Ga,Hg,Nb,S,Se | Fluide mésothermal :<br>corindon, terres rares | FM:C,TR |
| 228 | 513120 | 521203 |                       | Néant                                          |         |
| 229 | 513278 | 521236 |                       | Néant                                          |         |
| 230 | 506986 | 509685 |                       | Néant                                          |         |
| 231 | 506023 | 510113 | Cs,K,Li,Rb,Ti,Tl      | Pierres, métaux rares;                         | P,MR    |
| 232 | 509353 | 520887 |                       | Néant                                          |         |
| 233 | 509720 | 520911 | Th                    | Néant                                          |         |

|     |        |        |                 |                                                 |               |
|-----|--------|--------|-----------------|-------------------------------------------------|---------------|
| 237 | 507964 | 527940 | U,W,Zr          | Néant                                           |               |
| 238 | 503908 | 510989 | Cs,Li           | Néant                                           |               |
| 540 | 509732 | 535329 |                 | Néant                                           |               |
| 541 | 511078 | 531624 | Re              | PGE / PGM                                       | PGE/M         |
| 542 | 510820 | 531215 | Pt              | PGE / PGM                                       | PGE/M         |
| 543 | 510537 | 530574 | Re              | PGE / PGM                                       | PGE/M         |
| 544 | 509778 | 529334 | U,Zr            | Fluide : uranium, métaux rares                  | F:U,MR        |
| 99  | 520165 | 525777 |                 | Néant                                           |               |
| 100 | 519965 | 524578 | B               | Néant                                           |               |
| 101 | 502542 | 540285 | Cs,K,Rb,Re,Tl,W | Fluide hypo-mésothermal : métaux rares, PGE/PGM | FH/M:MR,PGE/M |
| 102 | 513543 | 536165 | Re              | PGE/PGM                                         | PGE/M         |
| 103 | 520496 | 523604 | S               | Néant                                           |               |
| 105 | 524714 | 525858 | P               | PGE/PGM                                         | PGE/M         |
| 106 | 522891 | 525912 | B               | Néant                                           |               |
| 107 | 513792 | 532174 | Pt              | PGE/PGM                                         | PGE/M         |
| 108 | 513803 | 532195 | B,Th            | Néant                                           |               |
| 109 | 512332 | 534200 | B               | Néant                                           |               |
| 110 | 511724 | 535089 |                 | Néant                                           |               |
| 112 | 512954 | 525271 | B               | Néant                                           |               |
| 113 | 512260 | 525594 | B               | Néant                                           |               |
| 118 | 526645 | 513073 |                 | Néant                                           |               |
| 119 | 511613 | 525767 | Re,Th,U         | Fluide hypothermal :                            | FH:PGE/M      |



|     |        |        |             |                                               |                     |
|-----|--------|--------|-------------|-----------------------------------------------|---------------------|
|     |        |        |             | PGE/PGM                                       |                     |
| 120 | 511515 | 526835 |             | Néant                                         |                     |
| 121 | 511086 | 527143 | B,Re,Sb     | PGE/PGM                                       | PGE/M               |
| 122 | 530847 | 508694 | B           | Néant                                         |                     |
| 123 | 519408 | 517580 | B,Pt        | PGE/PGM                                       | PGE/M               |
| 124 | 522313 | 526826 | B           | Néant                                         |                     |
| 128 | 526394 | 509896 |             | Néant                                         |                     |
| 129 | 520238 | 517368 | Re          | PGE/PGM                                       | PGE/M               |
| 130 | 520281 | 517332 |             | Néant                                         |                     |
| 131 | 520526 | 516893 | Hg,Re,Se,Sr | Fluide hypo/mésothermal :<br>PGE/PGM          | FH/M: <i>PGE/M</i>  |
| 132 | 520585 | 516743 |             | Néant                                         |                     |
| 133 | 521121 | 516203 |             | Néant                                         |                     |
| 134 | 529682 | 510372 |             | Néant                                         |                     |
| 135 | 511174 | 528175 |             | Néant                                         |                     |
| 136 | 510780 | 528736 |             | Néant                                         |                     |
| 137 | 510156 | 528916 | Re,Zr       | Fluide hypothermal :<br>métaux rares, PGE/PGM | FH: <i>MR,PGE/M</i> |
| 139 | 520068 | 517506 | Se          | Néant                                         |                     |
| 140 | 529640 | 508318 | Ba,P,Re,Sr  | Fluide hypo/mésothermal :<br>PGE/PGM          | FH/M: <i>PGE/M</i>  |
| 141 | 526736 | 513246 |             | Néant                                         |                     |
| 142 | 526779 | 512786 | Re          | PGE/PGM                                       | PGE/M               |
| 143 | 528466 | 521088 | Re          | PGE/PGM                                       | PGE/M               |

|     |        |        |                                            |                                                                                             |                         |
|-----|--------|--------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 144 | 530342 | 520712 |                                            | Néant                                                                                       |                         |
| 145 | 529582 | 520892 | Mg,Re                                      | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 146 | 529536 | 521158 | Mo                                         | Néant                                                                                       |                         |
| 147 | 529081 | 521330 | Re                                         | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 148 | 528988 | 521438 | Re                                         | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 149 | 528289 | 521170 | Ca,P                                       | Néant                                                                                       |                         |
| 150 | 528791 | 508853 |                                            | Néant                                                                                       |                         |
| 151 | 526563 | 512128 | Re                                         | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 152 | 529757 | 510144 | Ca,Mg,P                                    | Néant                                                                                       |                         |
| 153 | 524312 | 536512 |                                            | Néant                                                                                       |                         |
| 154 | 528215 | 533758 | K,Mg,Pt,Te                                 | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM                                                             | FH: <i>PGE/M</i>        |
| 155 | 514828 | 518248 | Th                                         | Néant                                                                                       |                         |
| 156 | 519033 | 534387 | B,Ga,Re                                    | Néant                                                                                       |                         |
| 157 | 514525 | 535008 | Al,B,Ba,Ce,Ga,Hg,In,La,Mo,P,Pb,Sn,Sr,Te,Ti | Fluide épithermal :<br>corindon, terres rares,<br>polymétalliques non ferreux,              | FE:C, <i>TR,PNF</i>     |
| 158 | 519042 | 502402 | B,Cd,Cu,K,Mg,Mn,Mo,Rb,Te,Tl,W,Zn           | Fluide épithermal :<br>corindon, terres rares,<br>polymétalliques non ferreux,              | FE:C, <i>TR,PNF</i>     |
| 159 | 518845 | 502057 | B,Pt                                       | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 160 | 524995 | 535396 |                                            | Néant                                                                                       |                         |
| 161 | 514907 | 535531 | Re                                         | PGE/PGM                                                                                     | PGE/M                   |
| 162 | 513969 | 535795 | Al,B,Ga,Hf,Hg,In,Nb,Pb,Sc,Se,Ti,Zr         | Fluide épithermal :<br>corindon, terres rares,<br>polymétalliques non ferreux,<br>columbite | FE:C, <i>TR,PNF,Cbt</i> |

|     |        |        |                            |                                                          |                |
|-----|--------|--------|----------------------------|----------------------------------------------------------|----------------|
| 163 | 516127 | 536308 | Re                         | PGE/PGM                                                  | PGE/M          |
| 164 | 516147 | 536346 | B                          | Néant                                                    |                |
| 165 | 515849 | 535714 |                            | Néant                                                    |                |
| 166 | 514412 | 535702 | Th                         | Néant                                                    |                |
| 167 | 510932 | 539306 | Cs,K,Li,Mg,Nb,Rb,Ti,Tl,W   | Fluide hypo-mésothermal :<br>métaux rares, columbite (?) | FH/M:MR,Cbt(?) |
| 168 | 511037 | 541855 |                            | Néant                                                    |                |
| 239 | 505762 | 510229 | Ba,Be,Cd,Hf,In,Li,Sc,U,W,Y | Fluide méso/épithermal :<br>pierres, métaux rares        | FM/E:P,MR      |
| 240 | 508099 | 509238 | Ca,P                       | Néant                                                    |                |
| 241 | 507892 | 521408 |                            | Néant                                                    |                |
| 242 | 508144 | 521293 |                            | Néant                                                    |                |
| 243 | 521961 | 510109 |                            | Néant                                                    |                |
| 244 | 512386 | 515697 | Th                         | Néant                                                    |                |
| 245 | 510957 | 517070 | Ca,P,Sr,V                  | Néant                                                    |                |
| 246 | 507170 | 518009 | Ca,P                       | Néant                                                    |                |
| 247 | 506589 | 518162 | Th,U                       | Néant                                                    |                |
| 248 | 505130 | 518477 |                            | Néant                                                    |                |
| 249 | 504640 | 518411 | U,W                        | Néant                                                    |                |
| 250 | 504668 | 518459 | Cs,W                       | Néant                                                    |                |
| 251 | 507044 | 521616 | Cs,Tl,W                    | Néant                                                    |                |
| 252 | 506509 | 522136 | Pt                         | PGE/PGM                                                  | PGE/M          |
| 253 | 505796 | 522697 | Cs,U,W                     | Néant                                                    |                |
| 261 | 517514 | 523563 |                            | Néant                                                    |                |

|     |        |        |                    |                                       |           |
|-----|--------|--------|--------------------|---------------------------------------|-----------|
| 262 | 511000 | 534853 |                    | Néant                                 |           |
| 263 | 518714 | 512158 |                    | Néant                                 |           |
| 264 | 518715 | 512141 |                    | Néant                                 |           |
| 265 | 507607 | 521674 | U                  | Néant                                 |           |
| 267 | 505703 | 508001 |                    | Néant                                 |           |
| 268 | 504421 | 512521 | Th                 | Néant                                 |           |
| 269 | 503665 | 513020 | Cr,Fe,Ga,Sn,Th,V   | Fluide hypothermal :<br>chromite, BMS | FH:Cr,BMS |
| 270 | 504496 | 514044 | Pt,U               | PGE/PGM                               | PGE/M     |
| 271 | 503484 | 513510 | Pt,TH              | PGE/PGM                               | PGE/M     |
| 272 | 503266 | 513520 | Cs,W               | Néant                                 |           |
| 273 | 503240 | 511627 |                    | Néant                                 |           |
| 274 | 505357 | 522665 |                    | Néant                                 |           |
| 275 | 505357 | 522660 | W                  | Néant                                 |           |
| 276 | 506078 | 522704 | Cs,K,Li,Mg,Rb,Tl,U | Fluide hypo/mésothermal :<br>pierres  | FH/M:P    |
| 281 | 512643 | 515811 |                    | Néant                                 |           |
| 282 | 506504 | 522334 | Cs,Li,Tl           | Néant                                 |           |
| 283 | 506801 | 522109 |                    | Néant                                 |           |
| 284 | 522346 | 505987 | Re                 | PGE/PGM                               | PGE/M     |
| 285 | 523457 | 509226 |                    | Néant                                 |           |
| 286 | 522090 | 510169 |                    | Néant                                 |           |
| 287 | 518579 | 510516 |                    | Néant                                 |           |
| 288 | 518677 | 509657 |                    | Néant                                 |           |

|     |        |        |                                  |                                                   |                  |
|-----|--------|--------|----------------------------------|---------------------------------------------------|------------------|
| 289 | 503938 | 511666 |                                  | Néant                                             |                  |
| 383 | 516009 | 524565 |                                  | Néant                                             |                  |
| 384 | 515617 | 524870 |                                  | Néant                                             |                  |
| 385 | 514414 | 524353 |                                  | Néant                                             |                  |
| 386 | 514596 | 533523 |                                  | Néant                                             |                  |
| 387 | 514677 | 524445 |                                  | Néant                                             |                  |
| 388 | 513777 | 525289 | Al,Hg                            | Fluide épithermal :<br>corindon, or (?)           | FE:C,Or(?)       |
| 389 | 512963 | 525285 | Sn                               | Néant                                             |                  |
| 390 | 508038 | 527996 |                                  | Néant                                             |                  |
| 482 | 518515 | 527355 | B,Se                             | Néant                                             |                  |
| 486 | 527832 | 539953 | Re                               | PGE/PGM                                           | PGE/M            |
| 487 | 526841 | 540091 |                                  | Néant                                             |                  |
| 488 | 530263 | 538991 | La                               | Néant                                             |                  |
| 489 | 530473 | 536707 | B,Te                             | Néant                                             |                  |
| 490 | 525091 | 542153 |                                  | Néant                                             |                  |
| 551 | 514514 | 532027 | Be,Ca,Cu,K,Mg,Na,P,Rb,Re,Sr,Tl,W | Fluide hypo/mésothermal :<br>pierres, PGEPGM, BMS | FH/M:P,PGE/M,BMS |
| 552 | 513987 | 532195 | Th                               | Néant                                             |                  |
| 553 | 530021 | 538978 |                                  | Néant                                             |                  |
| 554 | 529537 | 539011 |                                  | Néant                                             |                  |
| 555 | 509776 | 529400 |                                  | Néant                                             |                  |
| 556 | 509685 | 529289 | Hf,U,Zr                          | Fluide méso/épithermal :<br>métaux rares          | FM/E:MR          |



|     |        |        |             |                                           |             |
|-----|--------|--------|-------------|-------------------------------------------|-------------|
| 557 | 509576 | 529215 |             | Néant                                     |             |
| 559 | 518402 | 528180 | Th          | Néant                                     |             |
| 560 | 519849 | 525903 |             | Néant                                     |             |
| 562 | 530687 | 537212 | Re          | PGE/PGM                                   | PGE/M       |
| 563 | 528815 | 536632 | Pt          | PGE/PGM                                   | PGE/M       |
| 564 | 525047 | 540914 | Re          | PGE/PGM                                   | PGE/M       |
| 566 | 518483 | 528036 | Re          | PGE/PGM                                   | PGE/M       |
| 567 | 518455 | 527615 |             | Néant                                     |             |
| 568 | 528478 | 539480 | B,Ce,La,U   | Néant                                     |             |
| 576 | 518569 | 527076 | La,Th,U,W   | Néant                                     |             |
| 37  | 546099 | 525757 | B,Fe,V      | Néant                                     |             |
| 60  | 545650 | 526116 | B,Fe,Hg,V   | Néant                                     |             |
| 63  | 542958 | 526810 | Pt,V        | PGE/PGM                                   | PGE/M       |
| 64  | 545059 | 526150 | Te          | Néant                                     |             |
| 65  | 545051 | 526193 | Cr,Cu,Pt,V  | Fluide hypothermal :<br>chromite, PGE/PGM | FH:Cr,PGE/M |
| 66  | 545839 | 526187 |             | Néant                                     |             |
| 87  | 543029 | 526693 | Te          | Néant                                     |             |
| 190 | 536452 | 529036 |             | Néant                                     |             |
| 191 | 539362 | 527731 | As,Cd,Na,Sn | Néant                                     |             |
| 196 | 558964 | 501023 |             | Néant                                     |             |
| 197 | 533111 | 527844 |             | Néant                                     |             |
| 198 | 532995 | 527284 |             | Néant                                     |             |

|     |        |        |                                    |                                                                               |                             |
|-----|--------|--------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 199 | 532279 | 524184 | B,Cr,Ni,Pt                         | PGE/PGM, BMS, chromite                                                        | PGE/M ,BMS,Cr               |
| 202 | 532300 | 522353 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 203 | 532283 | 521327 | B,Co,Cr, Cu,NI                     | BMS, chromite                                                                 | BMS,Cr                      |
| 204 | 531982 | 521016 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 220 | 532492 | 526077 | Re                                 | PGE/PGM                                                                       | PGE/M                       |
| 224 | 532304 | 521897 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 234 | 559155 | 508326 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 235 | 558972 | 507451 | Hf,Pt                              | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM                                               | FH: <i>PGE/M</i>            |
| 236 | 560048 | 501702 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 538 | 557527 | 516272 | Co,Cr,Cu,Fe,Ga,In,Mo,Pb,Pt,Sc,Te,V | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM, BMS, chromite,<br>polymétallique non ferreux | FH: <i>PGE/M,BMS,Cr,PNF</i> |
| 545 | 539684 | 511529 |                                    | Néant                                                                         |                             |
| 546 | 539529 | 511510 | Hf,Na,Zr                           | Fluide méso-épihermal :<br>métaux rares                                       | FM/E: <i>MR</i>             |
| 111 | 539292 | 505263 | B                                  | Néant                                                                         |                             |
| 114 | 550979 | 524893 | B,Cd,Co,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb,S,Sc,Se,ZN  | Fluide hypothermal : BMS,<br>chromite, polymétallique non<br>ferreux          | FH: <i>BMS,Cr,PNF</i>       |
| 115 | 550303 | 524936 | B                                  | Néant                                                                         |                             |
| 116 | 549128 | 525109 | V                                  | Néant                                                                         |                             |
| 117 | 548610 | 524861 | B,CR                               | Chromite                                                                      | Cr                          |
| 125 | 553369 | 524843 | RE                                 | PGE/PGM                                                                       | PGE/M                       |
| 126 | 552821 | 524857 | RE                                 | PGE/PGM                                                                       | PGE/M                       |
| 127 | 551952 | 524867 | B,Co,Fe,Pb,S,Se                    | Fluide hypothermal : BMS,                                                     | FH: <i>BMS,PNF</i>          |

|     |        |        |                                           |                                                                                      |                     |
|-----|--------|--------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|     |        |        |                                           | polymétallique non ferreux                                                           |                     |
| 255 | 539551 | 503405 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 256 | 539756 | 506300 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 257 | 539878 | 507282 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 258 | 539699 | 506882 | Be,Ce,Cs,Cu,La,Mg,Mo,Rb,Re,S,Se,Tl,U,Y,Zn | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM, BMS,<br>polymétallique non ferreux,<br>métaux rares | FH:PGE/M,BMS,PNF,MR |
| 259 | 537853 | 501848 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 260 | 537393 | 501443 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 266 | 539311 | 505210 | Na                                        | Néant                                                                                |                     |
| 277 | 546927 | 515294 | Be,Cd,Sn,Y                                | Néant                                                                                |                     |
| 278 | 541443 | 504835 | Hf                                        | Néant                                                                                |                     |
| 279 | 539170 | 502955 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 290 | 556392 | 503011 | As                                        | Néant                                                                                |                     |
| 291 | 553734 | 516568 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 292 | 555237 | 503291 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 293 | 532321 | 530396 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 294 | 532950 | 530734 | Pt                                        | PGE/PGM                                                                              | PGE/M               |
| 295 | 533857 | 532065 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 296 | 535552 | 531778 |                                           | Néant                                                                                |                     |
| 297 | 561308 | 511763 | Be,Cd,Ce,Ga,Hg,In,Mo,Nb,Pb,S,Se,Sn,Y      | Fluide hypothermal :<br>pierres, columbite,<br>polymétalliques non ferreux           | FH:P,Cbt,PNF        |
| 298 | 561587 | 513443 |                                           | Néant                                                                                |                     |

|     |        |        |                                         |                                                                           |                     |
|-----|--------|--------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 299 | 561272 | 514818 | Co                                      | Néant                                                                     |                     |
| 301 | 533171 | 531129 | Pt                                      | PGE/PGM                                                                   | PGE/M               |
| 302 | 551031 | 516538 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 303 | 532736 | 516428 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 304 | 532780 | 516523 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 305 | 532422 | 517820 | Pt                                      | PGE/PGM                                                                   | PGE/M               |
| 306 | 532411 | 517425 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 307 | 550198 | 528984 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 308 | 552332 | 527937 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 309 | 560274 | 516427 | Fe,Pt,Se                                | Fluide hypothermique : BMS,<br>PGE/PGM                                    | FH:BMS,PGE/M        |
| 310 | 560160 | 516284 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 311 | 548650 | 530383 | Pt                                      | PGE/PGM                                                                   | PGE/M               |
| 312 | 549124 | 529247 | Co,Cu,Fe,Ga,Hf,Mn,Pb,Pt,Re,Sc,Ti,V,Y,Zr | Fluide hypothermique : BMS<br>(?), polymétallique non ferreux,<br>PGE/PGM | FH:BMS(?),PNF,PGE/M |
| 313 | 535576 | 531749 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 314 | 549316 | 517301 | Cu,Pt,Sc                                | Fluide hypothermique : BMS,<br>PGE/PGM                                    | FH:BMS,PGE/M        |
| 315 | 555502 | 503296 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 316 | 557296 | 516070 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 317 | 559906 | 510349 | As,Bi                                   | Néant                                                                     |                     |
| 318 | 560270 | 510674 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 319 | 554123 | 516389 |                                         | Néant                                                                     |                     |
| 320 | 557136 | 502216 |                                         | Néant                                                                     |                     |

|     |        |        |                                                      |                                                                                                               |                                 |
|-----|--------|--------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 321 | 561707 | 515580 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 322 | 560799 | 510635 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 323 | 550091 | 516897 | La                                                   | Néant                                                                                                         |                                 |
| 324 | 550200 | 515256 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 325 | 552811 | 516672 | La                                                   | Néant                                                                                                         |                                 |
| 326 | 532330 | 511477 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 327 | 531987 | 511766 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 328 | 531963 | 511755 | Re                                                   | PGE/PGM                                                                                                       | PGE/M                           |
| 329 | 532991 | 511500 | Re                                                   | PGE/PGM                                                                                                       | PGE/M                           |
| 330 | 550482 | 514453 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 331 | 550165 | 515176 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 332 | 550113 | 517493 | Ba,Be,Co,Cr,Cu,K,Li,Mg,Mo,Na,Ni,Pb,Pt,Rb,Sc,Te,Tl,Zn | Fluide hypothermal et fluide épiothermal : chromite, BMS, PGE/PGM, métaux rares, polymétalliques non ferreux, | FH et<br>FE:Cr,BMS,PGE/M,MR,PNF |
| 333 | 549455 | 517505 | B,Pt                                                 | PGE/PGM                                                                                                       | PGE/M                           |
| 334 | 549387 | 529307 | Pb,Pt                                                | Polymétallique non ferreux, PGE/PGM                                                                           | PNF,PGE/M                       |
| 335 | 550094 | 529149 | Ag,Au,Re,U                                           | Néant                                                                                                         |                                 |
| 337 | 552468 | 523305 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 341 | 548582 | 524592 | La,Na,S,Y                                            | Néant                                                                                                         |                                 |
| 343 | 556769 | 519507 | B,Hf,In,Sn,Zr                                        | Fluide hypo/mésothermal : métaux rares                                                                        | FH/M:MR                         |
| 345 | 548436 | 522394 |                                                      | Néant                                                                                                         |                                 |
| 348 | 555914 | 519680 | Be                                                   | Pierres                                                                                                       |                                 |



|     |        |        |                                           |                                                                                           |                     |
|-----|--------|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 352 | 553842 | 522492 | W                                         | Néant                                                                                     |                     |
| 356 | 554900 | 528374 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 357 | 544534 | 531658 | Fe                                        | Néant                                                                                     |                     |
| 358 | 545741 | 531732 | B                                         | Néant                                                                                     |                     |
| 359 | 547297 | 530826 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 360 | 553209 | 526469 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 361 | 553408 | 526459 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 362 | 544500 | 531685 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 363 | 546156 | 531422 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 364 | 554269 | 532570 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 365 | 554981 | 532317 | B,W                                       | Néant                                                                                     |                     |
| 370 | 593523 | 540836 | As,B,Cu,Fe,Ga,Hf,In,Pt,S,Sc,Sn,V,Zr       | Fluide hypothermique : BMS, PGE/PGM, métaux rares                                         | FH:BMS,PGE/M,MR     |
| 371 | 547849 | 522063 | B                                         | Néant                                                                                     |                     |
| 379 | 533727 | 512476 | K,Rb,Re,Tl                                | Fluide hypothermique : PGE/PGM, métaux rares                                              | FH:PGE/M,MR         |
| 380 | 558467 | 513245 | Cu,Hf,Re,Ti,V,Zn,Zr                       | Fluide hypothermique : PGE/PGM, métaux rares, polymétalliques non ferreux                 | FH:PGE/M,MR,PNF     |
| 381 | 558346 | 512051 | As,B,Be,Ce,Fe,Ga,Hg,In,Mo,Nb,Pb,S,Se,Sn,Y | Fluide hypothermique : pierres, BMS, polymétalliques non ferreux, columbite, terres rares | FH:P,BMS,PNF,Cbt,TR |
| 382 | 558793 | 510296 | Te                                        | Néant                                                                                     |                     |
| 391 | 533172 | 513374 |                                           | Néant                                                                                     |                     |
| 392 | 552233 | 501741 |                                           | Néant                                                                                     |                     |

|     |        |        |                                           |                                                                              |                     |
|-----|--------|--------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 393 | 547076 | 504222 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 394 | 549899 | 501258 | Re                                        | PGE/PGM                                                                      | PGE/M               |
| 395 | 553811 | 502643 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 396 | 548886 | 502176 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 397 | 548176 | 502666 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 398 | 546138 | 506205 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 399 | 546692 | 505108 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 400 | 546238 | 506092 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 401 | 558527 | 518184 | Re                                        | PGE/PGM                                                                      | PGE/M               |
| 402 | 536884 | 508643 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 403 | 536603 | 507998 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 405 | 561157 | 529007 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 406 | 559561 | 530451 | Ag,Ba,Cd,Co,Mn,Ni,Tl,W                    | Fluide épithermal : métaux nobles                                            | FE:MN               |
| 407 | 558709 | 531135 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 408 | 559609 | 530182 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 409 | 560761 | 529201 | B                                         | Néant                                                                        |                     |
| 410 | 561715 | 523042 | B,Cd,Co,Cr,Cu,Fe,Hf,Mn,Ni,Pt,Sc,V,Y,Zn,Zr | Fluide hypothermal : métaux rares, PGE/PGM, polymétalliques non ferreux, BMS | FH:MR,PGE/M,PNF,BMS |
| 411 | 560037 | 522494 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 412 | 557543 | 523868 | B                                         | Néant                                                                        |                     |
| 413 | 556508 | 523918 |                                           | Néant                                                                        |                     |
| 414 | 554958 | 524435 | B,Ba,Co,Cu,Fe,Mn,Na,Sr,Y                  | Fluide hypothermal : BMS                                                     | FH:BMS              |

|     |        |        |                              |                                                          |               |
|-----|--------|--------|------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------|
| 415 | 554932 | 524440 |                              | Néant                                                    |               |
| 416 | 548064 | 502893 |                              | Néant                                                    |               |
| 417 | 546648 | 504817 | Re                           | PGE/PGM                                                  | PGE/M         |
| 418 | 552968 | 501916 |                              | Néant                                                    |               |
| 419 | 550764 | 500916 | Ag,Au,Pd,Re                  | PGE/PGM, argent, or                                      | PGE/M,Ag,Or   |
| 420 | 535239 | 508522 | Re                           | PGE/PGM                                                  | PGE/M         |
| 421 | 532298 | 502934 |                              | Néant                                                    |               |
| 422 | 532804 | 504496 | Sr                           | Néant                                                    |               |
| 423 | 534425 | 522207 | Cd,K,Rb,Tl                   | Fluide hypothermal :<br>métaux rares                     | FH:MR         |
| 424 | 534445 | 522268 | Cd,In,Li,Sb,Sn,Y,Zn          | Fluide hypo/mésothermaal<br>: métaux rares               | FH/M:MR       |
| 425 | 557694 | 502016 | Re                           | PGE/PGM                                                  | PGE/M         |
| 426 | 557834 | 516277 | Nb,Sn                        | Néant                                                    |               |
| 427 | 558156 | 515818 | Ga,Hf,In,Mo,Pb,Sn,Zn         | Fluide hypo-mésothermal :<br>polymétalliques non ferreux | FH/M:PNF      |
| 431 | 553819 | 522469 |                              | Néant                                                    |               |
| 436 | 548874 | 523439 |                              | Néant                                                    |               |
| 437 | 552096 | 523692 |                              | Néant                                                    |               |
| 440 | 557200 | 519679 |                              | Néant                                                    |               |
| 442 | 552070 | 523692 |                              | Néant                                                    |               |
| 445 | 557352 | 519081 | Be,Bi,Mo,Na,Sn               | Fluide hypo/mésothermal :<br>pierres                     | FH/M:P        |
| 446 | 548939 | 522921 | Cr,Pt                        | Chromite, PGE/PGM                                        | Cr,PGE/M      |
| 449 | 556018 | 519719 | Be,Cd,Fe,Hf,In,Mn,P,Sn,Zn,Zr | Fluide hypothermal :                                     | FH:MR,P,PGE/M |

|     |        |        |                      |                                                          |             |
|-----|--------|--------|----------------------|----------------------------------------------------------|-------------|
|     |        |        |                      | métaux rares, pierres, PGE/PGM                           |             |
| 453 | 541012 | 537453 | Fe                   | Néant                                                    |             |
| 454 | 539055 | 528390 |                      | Néant                                                    |             |
| 455 | 539580 | 530822 |                      | Néant                                                    |             |
| 456 | 555589 | 519519 | Re, Y                | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM                          | FH:PGE/M    |
| 457 | 559321 | 520949 | In, Na, Re, Se, Sn   | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM                          | FH:PGE/M    |
| 458 | 543320 | 532596 | Ce, La, V            | Néant                                                    |             |
| 459 | 543917 | 533494 |                      | Néant                                                    |             |
| 460 | 555085 | 529859 | Re                   | PGE/PGM                                                  | PGE/M       |
| 461 | 538795 | 537976 | Cr, Ni               | Chromite, BMS                                            | Cr, BMS     |
| 462 | 538932 | 538305 | B, Cr, Pt, W         | Fluide hypothermal :<br>chromite, PGE/PGM                | FH:Cr,PGE/M |
| 463 | 539631 | 539369 | W                    | Néant                                                    |             |
| 464 | 553790 | 528243 | Co, Mn, Pb, W        | Fluide hypo/mésothermal :<br>polymétalliques non ferreux | FH/M:PNF    |
| 465 | 556419 | 528677 |                      | Néant                                                    |             |
| 466 | 553693 | 529263 |                      | Néant                                                    |             |
| 467 | 539378 | 532156 | Ca, Cd, Cu, P, Sr, Y | Fluide : BMS                                             | F:BMS       |
| 468 | 539082 | 532439 |                      | Néant                                                    |             |
| 469 | 538929 | 534447 | Fe, Hf, Zr           | Fluide hypo/mésothermal :<br>métaux rares                | FH/M:MR     |
| 470 | 539080 | 535122 | B, Pt                | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM                          | FH:PGE/M    |
| 471 | 538889 | 536556 | Mn                   | Néant                                                    |             |

|     |        |        |            |                                 |              |
|-----|--------|--------|------------|---------------------------------|--------------|
| 472 | 558879 | 520265 |            | Néant                           |              |
| 473 | 538727 | 536921 |            | Néant                           |              |
| 474 | 555923 | 526472 |            | Néant                           |              |
| 475 | 554295 | 528367 |            | Néant                           |              |
| 476 | 540116 | 539089 |            | Néant                           |              |
| 477 | 540740 | 538325 | B,Cr,Ni,Pt | Chromite, BMS,<br>PGE/PGM       | Cr,BMS,PGE/M |
| 478 | 555575 | 531948 | B,La,Re    | Fluide hypothermal :<br>PGE/PGM | FH:PGE/M     |
| 479 | 542910 | 534832 |            | Néant                           |              |
| 480 | 542109 | 512961 |            | Néant                           |              |
| 481 | 534163 | 512200 | Re         | PGE/PGM                         | PGE/M        |
| 483 | 534740 | 509188 | Re         | PGE/PGM                         | PGE/M        |
| 484 | 534950 | 506195 | B          | Néant                           |              |
| 485 | 533252 | 505240 | B,Re       | PGE/PGM                         | PGE/M        |
| 547 | 539578 | 511545 | Re         | PGE/PGM                         | PGE/M        |
| 548 | 537418 | 510457 |            | Néant                           |              |
| 549 | 536412 | 513677 | Pt         | PGE/PGM                         | PGE/M        |
| 550 | 532680 | 516207 |            | Néant                           |              |
| 558 | 541200 | 512483 |            | Néant                           |              |
| 561 | 534124 | 506107 |            | Néant                           |              |
| 565 | 535603 | 503634 |            | Néant                           |              |
| 569 | 546720 | 515160 | B          | Néant                           |              |
| 570 | 546375 | 514388 |            | Néant                           |              |



|     |        |        |                              |                                                         |            |
|-----|--------|--------|------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|
| 571 | 543554 | 513034 | Cd,Ga,In,Sn,Tl,Y,ZN,         | Fluide hypo/mésothermal :<br>terres rares, métaux rares | FH/M:TR,MR |
| 572 | 543631 | 512982 |                              | Néant                                                   |            |
| 573 | 543019 | 512882 |                              | Néant                                                   |            |
| 574 | 536083 | 513558 | Mo                           | Néant                                                   |            |
| 575 | 535437 | 503265 | Cu,Pt,Re,U                   | BMS, PGE/PGM                                            | BMS,PGE/M  |
| 580 | 539100 | 527829 |                              | Néant                                                   |            |
| 585 | 536994 | 525956 |                              | Néant                                                   |            |
| 586 | 537682 | 526658 |                              | Néant                                                   |            |
| 589 | 540901 | 529125 | Be,Cd,Fe,Ga,Hf,In,Sn,Y,Zn,Zr | Fluide hypo-mésothermal :<br>pierres, métaux rares      | FH/M:P,MR  |
| 590 | 540988 | 528208 | Re                           | PGE/PGM                                                 | PGE/M      |
| 591 | 544430 | 505690 |                              | Néant                                                   |            |
| 592 | 544490 | 505627 | Na                           | Néant                                                   |            |
| 593 | 539339 | 504023 |                              | Néant                                                   |            |
| 594 | 540728 | 504416 |                              | Néant                                                   |            |
| 595 | 540867 | 527822 |                              | Néant                                                   |            |
| 596 | 545201 | 505865 | Re                           | PGE/PGM                                                 | PGE/M      |
| 611 | 533101 | 521626 | Be,Cd,In,Y                   | Fluide : pierres                                        | F:P        |
| 614 | 534336 | 511227 |                              | Néant                                                   |            |
| 621 | 533513 | 521902 | Mo,Re                        | PGE/PGM                                                 | PGE/M      |
| 622 | 533874 | 522083 |                              | Néant                                                   |            |
| 784 | 557110 | 515129 | Sb                           | Néant                                                   |            |
| 785 | 557185 | 514599 |                              | Néant                                                   |            |

|      |        |        |                                     |                                                                               |                  |
|------|--------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 786  | 556586 | 519756 | Hf,Ti,V,Zn, Zr                      | Fluide hypo/mésothermal :<br>métaux rares                                     | FH/M:MR          |
| 787  | 558181 | 510448 | Ce,La,Th,U,Y                        | Fluide méso-épithermal :<br>terres rares                                      | FM/E:TR          |
| 788  | 558164 | 510057 |                                     | Néant                                                                         |                  |
| 802  | 556773 | 541042 |                                     | Néant                                                                         |                  |
| 803  | 557007 | 539183 | Cr,Ni                               | Chromite, BMS                                                                 | Cr,BMS           |
| 843  | 554877 | 536216 |                                     | Néant                                                                         |                  |
| 844  | 554241 | 534510 | Nb                                  | Columbite                                                                     | Cbt              |
| 852  | 553816 | 534024 | Nb,Pb,Th                            | Columbite, polymétalliques<br>non ferreux                                     | Cbt,PNF          |
| 854  | 553836 | 533702 | Nb                                  | Columbite                                                                     | Cbt              |
| 855  | 553608 | 533427 | Hf,Nb,Pb,Pt,Th,U                    | Fluide hypothermal :<br>columbite, PGE/PGM,<br>polymétalliques non ferreux    | FH:Cbt,PGE/M,PNF |
| 857  | 556549 | 537226 |                                     | Néant                                                                         |                  |
| 867  | 562903 | 543306 | Pt                                  | PGE/PGM                                                                       | PGE/M            |
| 1143 | 543523 | 539468 | Co,Cr,Cu,Ni,Pt                      | Chromite, BMS,<br>PGE/PGM                                                     | Cr,BMS,PGE/M     |
| 1147 | 543774 | 536817 |                                     | Néant                                                                         |                  |
| 1150 | 543870 | 534880 | B,Be,Cd,Ce,Cu,La,Sr,Y,Zn            | Fluide hypothermal :<br>pierres, métaux rares, terres<br>rares,               | FH:P,MR,TR       |
| 1151 | 546235 | 533501 | Al,Ba,Be,Li,Mg,Sc,Y,Zn              | Fluide méso/épithermal :<br>corindon, pierres,<br>polymétalliques non ferreux | FM/E:C,P,PNF     |
| 1155 | 543635 | 542550 | Ni                                  | BMS                                                                           | BMS              |
| 1156 | 545683 | 533770 | Al,B,Ba,Be,Cd,K,Li,Mg,Rb,Ti,Tl,Y,Zn | Fluide hypothermal et<br>fluide épithermal : métaux rares,                    | FH et FE:MR,PNF  |

|      |        |        |         |                                         |              |
|------|--------|--------|---------|-----------------------------------------|--------------|
|      |        |        |         | polymétalliques non ferreux,<br>pierres |              |
| 1160 | 543176 | 543612 | Pt      | PGE/PGM                                 | PGE/M        |
| 1162 | 543393 | 542275 | Te      | Néant                                   |              |
| 1164 | 542844 | 544317 |         | Néant                                   |              |
| 1170 | 542866 | 544650 | Mn,Zn   | Polymétalliques non<br>ferreux          | PNF          |
| 1171 | 550547 | 529505 | Cd      | Néant                                   |              |
| 1197 | 545523 | 533453 | B       | Néant                                   |              |
| 1205 | 546487 | 533065 |         | Néant                                   |              |
| 1208 | 546970 | 533022 |         | Néant                                   |              |
| 1212 | 548872 | 530431 |         | Néant                                   |              |
| 1213 | 545051 | 533596 |         | Néant                                   |              |
| 1217 | 548847 | 530533 |         | Néant                                   |              |
| 1218 | 546021 | 533263 | Pt      | PGE/PGM                                 | PGE/M        |
| 1220 | 549516 | 531771 | Pt      | PGE/PGM                                 | PGE/M        |
| 1221 | 542891 | 535423 |         | Néant                                   |              |
| 1236 | 544216 | 533925 | Fe,Pt,V | BMS (?), PGE/PGM                        | BMS(?),PGE/M |
| 1240 | 547675 | 532997 |         | Néant                                   |              |
| 1242 | 549151 | 532311 |         | Néant                                   |              |

## TABLE DES MATIERES

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| SOMMAIRE .....                                                                   | i    |
| LISTE DES FIGURES .....                                                          | v    |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                         | vii  |
| LISTE DES ACRONYMES .....                                                        | viii |
| LISTE DES ANNEXES .....                                                          | x    |
| REMERCIEMENTS .....                                                              | 1    |
| INTRODUCTION.....                                                                | 2    |
| PARTIE I : PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D’ETUDE ..                | 4    |
| CHAPITRE I: PROBLEMATIQUE, CONTEXTE PHYSIQUE DE LA ZONE D’ETUDE.....             | 5    |
| 1.1.    Exposé des problématiques .....                                          | 5    |
| 1.2.    Contexte physique de la zone d’étude.....                                | 5    |
| 1.2.1.    Localisation de la zone d’étude .....                                  | 5    |
| 1.2.2.    Contexte climatique et de végétation .....                             | 7    |
| 1.2.3.    Orographie et hydrographie .....                                       | 11   |
| 1.2.4.    Économie.....                                                          | 16   |
| 1.2.5.    Historiques des travaux .....                                          | 16   |
| PARTIE II : QUELQUES TECHNIQUES DE PROSPECTION ET LES DONNEES GEOCHIMIQUES. .... | 18   |
| CHAPITRE II : QUELQUES TECHNIQUES DE PROSPECTION .....                           | 19   |
| 2.1.    Prospection géochimique .....                                            | 19   |
| 2.2.    Prospection directe .....                                                | 19   |
| 2.3.    Prospection alluvionnaire .....                                          | 20   |
| 2.3.1.    Caractères généraux des gîtes alluvionnaires .....                     | 20   |
| 2.3.2.    Mode de formation des gîtes secondaires.....                           | 20   |
| 2.3.2.1.    Erosion (Altération) .....                                           | 20   |
| 2.3.2.1.1.    L’altération mécanique .....                                       | 21   |

|                                                                                                                            |                                                                                             |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2.1.2.                                                                                                                 | L'altération chimique (météorisation chimique) .....                                        | 22 |
| 2.3.2.1.3.                                                                                                                 | L'altération biologique .....                                                               | 24 |
| 2.3.2.1.4.                                                                                                                 | L'altération liée aux activités humaines .....                                              | 24 |
| 2.3.2.2.                                                                                                                   | Transport.....                                                                              | 24 |
| 2.3.2.3.                                                                                                                   | Dépôt .....                                                                                 | 25 |
| 2.3.3.                                                                                                                     | Mode de dépôt .....                                                                         | 25 |
| 2.3.4.                                                                                                                     | Types de minéraux rencontrés dans les alluvions .....                                       | 28 |
| 2.3.5.                                                                                                                     | Règles de prélèvement des échantillons .....                                                | 29 |
| 2.3.6.                                                                                                                     | Remarques sur la pratique de la prospection alluviale .....                                 | 30 |
| 2.4.                                                                                                                       | Les données géochimiques.....                                                               | 30 |
| PARTIE III : LES DIFFERENTES CARTES, LA ZONE D'ETUDE DANS SON<br>CONTEXTE NATIONAL ET TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITALE ..... |                                                                                             | 32 |
| CHAPITRE III: DESCRIPTION DU LOGICIEL .....                                                                                |                                                                                             | 33 |
| 3.1.                                                                                                                       | Description du logiciel de modélisation.....                                                | 33 |
| 3.2.                                                                                                                       | Illustration du fonctionnement du logiciel de modélisation.....                             | 37 |
| 3.2.1.                                                                                                                     | Les données à traiter .....                                                                 | 37 |
| 3.2.2.                                                                                                                     | Visualisation graphique des données à traiter .....                                         | 37 |
| 3.2.3.                                                                                                                     | Résultats et discussions .....                                                              | 39 |
| CHAPITRE IV: LA ZONE D'ETUDE DANS SON CONTEXTE NATIONAL .....                                                              |                                                                                             | 40 |
| CHAPITRE V: LES DIFFERENTES CARTES OBTENUES.....                                                                           |                                                                                             | 42 |
| 5.1.                                                                                                                       | Comment obtenir les différentes cartes de géochimie.....                                    | 42 |
| 5.2.                                                                                                                       | Méthode d'élaboration de cartes géochimiques d'interprétation .....                         | 42 |
| CHAPITRE VI: TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITALE.....                                                                           |                                                                                             | 44 |
| PARTIE IV : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.....                                                                               |                                                                                             | 47 |
| CHAPITRE VII : GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.....                                                                            |                                                                                             | 48 |
| 7.1.                                                                                                                       | Les roches parasédimentaires et métavolcaniques (et les équivalents<br>métamorphiques)..... | 48 |
| 7.1.1.                                                                                                                     | Complexe du Mangoro .....                                                                   | 48 |
| 7.1.1.1.                                                                                                                   | Groupe de Vondrozo .....                                                                    | 48 |



|                                                                        |                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1.2.                                                                 | Complexe du Masora.....                                          | 49 |
| 7.1.2.1.                                                               | Groupe de Vohilava.....                                          | 49 |
| 7.1.3.                                                                 | Groupe d'Ambatolampy .....                                       | 50 |
| 7.1.4.                                                                 | Complexe de Manampotsy .....                                     | 51 |
| 7.1.4.1.                                                               | Formation d'Andasibe .....                                       | 51 |
| 7.1.4.2.                                                               | Groupe d'Ampasary .....                                          | 52 |
| 7.1.5.                                                                 | Groupe de Mananjary .....                                        | 54 |
| 7.2.                                                                   | Les roches plutoniques (et les équivalents métamorphiques) ..... | 57 |
| 7.2.1.                                                                 | Suite d'Imorona-Itsindro .....                                   | 57 |
| 7.2.1.1.                                                               | Subsuite d'Angavo-Ankazobe .....                                 | 57 |
| 7.2.2.                                                                 | Suite de Kiangara.....                                           | 57 |
| 7.2.2.1.                                                               | Subsuite de Kianjavato .....                                     | 57 |
| 7.2.3.                                                                 | Suite d'Ambalavao .....                                          | 58 |
| CHAPITRE VIII : METAMORPHISME .....                                    |                                                                  | 59 |
| 8.1.                                                                   | Métamorphisme rétrograde .....                                   | 60 |
| 8.2.                                                                   | Résumé du métamorphisme. ....                                    | 60 |
| PARTIE V : INTERPRETATION DES DIFFERENTES CARTES.....                  |                                                                  | 62 |
| CHAPITRE IX : INTERPRETATION DES CARTES ET RESULTATS.....              |                                                                  | 63 |
| 9.1.                                                                   | Les modèles métallogéniques.....                                 | 63 |
| 9.1.1.                                                                 | L'affiliation au magmatisme ultrabasique .....                   | 63 |
| 9.1.2.                                                                 | L'affiliation Non Rigoureuse.....                                | 65 |
| 9.1.3.                                                                 | Complexants et indicateurs de la température. ....               | 66 |
| 9.1.4.                                                                 | Eléments Majeurs, Mineurs .....                                  | 68 |
| 9.1.5.                                                                 | Eléments Rares .....                                             | 70 |
| 9.1.6.                                                                 | Métaux Rares .....                                               | 71 |
| 9.1.7.                                                                 | Terres Rares .....                                               | 72 |
| 9.2.                                                                   | Cartes de synthèse .....                                         | 74 |
| PARTIE VI : PROSPECTIVES, PERSPECTIVES GEOCHIMIQUES DE LA REGION ..... |                                                                  | 87 |

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| CHAPITRE X : PROSPECTIVITE DE LA REGION .....            | 88   |
| 10.1.            Plan technique .....                    | 88   |
| 10.2.            Plan économique .....                   | 88   |
| 10.3.            Plan social .....                       | 88   |
| CHAPITRE XI : PERSPECTIVE GEOCHIMIQUE DE LA REGION ..... | 90   |
| CONCLUSION .....                                         | 92   |
| BIBLIOGRAPHIES .....                                     | a    |
| WEBOGRAPHIES.....                                        | c    |
| AUTRES .....                                             | d    |
| LISTE DES ANNEXES .....                                  | e    |
| TABLE DES MATIERES .....                                 | pppp |

**TITRE :** Valorisation des informations de géochimie des sédiments de ruisseaux. Applications sur les feuilles PQ53 d’Ifanadiana-kianjavato (Sud-Est de Madagascar).

**RESUME :**

Le cadre d’étude se trouve dans la région de Vatovavy, en vue de la valorisation des informations de géochimie des sédiments de ruisseaux des feuilles P53 d’Ifanadiana et Q53 de Kianjavato. Ces zones ont été étudiées dans les années 50 mais beaucoup de points n’ont pas été étudiés ce qui a amené le PGRM à y conduire des études complémentaires de géologie structurale, de prélèvements d’échantillons géochimiques de sédiments de ruisseaux, de traitement d’image satellitale pour apporter des éléments géologiques de compréhension des indications géochimiques pour en dégager des modèles métallogéniques. Les résultats obtenus sont relativement intéressants et des zones favorables aux minéralisations ont été identifiées. Il reste maintenant à passer à l’exploration, dernière étape avant l’exploitation.

**Mots-clés :** Ifanadiana, Kianjavato, PGRM, géochimie, modèles métallogéniques, anomalies, minéralisation, sédiments de ruisseaux.

**ABSTRACT:**

*This theoretical study using the PGRM’s stream-sediment results within Vatovavy Zone was led for understanding the minerals resources opportunities at up-stream of positive sampling points. This area was already prospected during former programs and the authors didn’t include some geological topics like structural geology. So, PGRM has recently carry out geological mapping that allows to update the knowledge relative to the mechanism of the various mineralizations. At the end of this study, some interesting results were got and few good opportunities area were defined. We strongly incite for leading more detailed exploratory programs. May be one or more of the mineral indications that we have revealed would be developed to deposits to be mined later.*

**Keywords:** Ifanadiana, Kianjavato, PGRM, geochemistry, metallogenic model, anomaly, mineralization, streams sediments.

Encadreur

Dr RAKOTOMANANA Dominique

Impétrant :

RAMILJAONA Rija Malala

Tél : +261 34 18 801 92

Email : [rijamalala@gmail.com](mailto:rijamalala@gmail.com)

Lot 206 Faneva Ankadivory Talatamaty Tana 105