

Contribution de la méthode Electre Tri à la hiérarchisation des gisements de carrières de roches massives entre Port-Bergé et Djangoa

Ralijaona H.¹, Rasolomanana E.^{1,2*}, Rakoto H.^{2,3}, Rasolomamonjy J.^{1,4}

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

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

3 Société de Géophysique pour le Développement de Madagascar, Tsarahonenana Antananarivo

4 Bureau National de Gestion des Risques et Catastrophes, Antanimora Antananarivo

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

Résumé- Cette étude est axée sur l'application d'une méthode d'Analyse MultiCritères (AMC) d'aide à la décision dans la hiérarchisation de gisements de roches massives. Les méthodes AMC permettent d'évaluer un ensemble d'actions potentielles sur un ensemble de critères prédéfinis et d'agrèger les évaluations pour tous ces critères avec l'objectif de les classer, de les trier, ou de les ranger de la meilleure à la moins bonne. Sur les vingt trois gisements qui ont été identifiés afin d'approvisionnements en matériaux la réhabilitation de la RN6, quatorze ont été retenus pour évaluation. Six critères de hiérarchisation : le volume du gisement, la distance par rapport à la RN6, l'aménagement de l'accès au site, l'épaisseur de la couche stérile, la résistance à la fragmentation et à l'attrition ont été définis pour l'évaluation. L'agrégation des évaluations est réalisée grâce à une méthode de surclassement, la méthode Electre Tri, relatif aux problématiques multicritères de classement.

La mise en œuvre de Electre Tri est réalisée avec l'outil de développement Matlab v.6.1. Electre Tri affecte les sites dans des classes suivant la procédure optimiste et celle pessimiste. La robustesse des classements obtenus est évaluée à travers une analyse de sensibilité.

Mots clés- RN6, carrières de roches massives, AMC, Electre Tri, aide à la décision, MatLab

1- Introduction

La mise en place ou la réhabilitation d'infrastructures routières nécessite l'utilisation de matériaux. Ces matériaux sont pour la plupart produits à partir des roches et sols courants. Des travaux de prospection de roches massives ont été effectués en vue d'en produire pour les travaux de réhabilitation de la RN6 entre Port-Bergé (PK0) et Djangoa (PK290). Ces travaux de prospection ont été menés dans une première étape dans le but d'inventorier tous les sites de carrières de roches massives susceptibles d'être exploités puis dans le but de les caractériser.

La décision de l'exploitation d'une carrière de roches massives est cependant fonction de nombreux paramètres. D'une part, ces matériaux doivent se conformer à des normes spécifiques liées à la nature même des roches et au potentiel du site et, d'autre part, à des facteurs plutôt liés au coût et donc d'ordre économique. L'ensemble de ces facteurs doit être pris en considération. C'est dans ce contexte que cette étude visant à la hiérarchisation de ces carrières de roches massives a été faite. Il s'agit de mettre en œuvre une méthode d'aide à la décision, la méthode Electre Tri qui fait partie du lot des méthodes d'analyses multicritères basée sur la comparaison deux à deux des sites par la construction d'indicateurs reflétant l'intérêt des critères retenus et d'essayer d'en déduire la fiabilité des résultats proposés.

2- Cadre géographique

La région de la Sofia se trouve sur la côte Nord-Ouest de Madagascar. Elle appartient à la Province Autonome de Mahajanga. S'étendant entre 14° et 17° latitude Sud et 47° et 49° longitude Est, elle constitue un vaste territoire couvrant une superficie de 52.504 km² soit environ 8,5% de la Grande Ile et 33,4% de la Province. Le Chef lieu de la région, Antsohihy se situe à près de 440 km environ de Mahajanga, sur la RN6 qui va vers Antsiranana.

La région (ex-préfecture d'Antsohihy) est composée de 7 districts : Antsohihy, Analalava, Mampikony, Bealanana, Port-Bergé, Befandriana, Mandritsara. La région de la Sofia comprend 92 communes dont 5 urbaines (5 chefs-lieux des Sous-Préfectures) et 87 rurales. La sous-préfecture de

Mandritsara, avec ses 22 communes, est la plus grande de la région; la plus petite est celle de Mampikony, avec seulement 5 communes.

Les paramètres physiques et agro-écologiques font état de deux sous-ensembles régionaux : la zone des Hauts Plateaux du Nord et la zone basse du Nord Ouest. Quatre des sous-préfectures (Antsohihy, Port-Bergé, Analalava, Mampikony) appartiennent à la zone agro-écologique du Nord-Ouest, et 3 (Mandritsara, Befandriana nord et Bealanana) constituant les Hauts-Plateaux du Nord.

Ces travaux de prospection étaient axés dans une première étape, à l'inventaire des carrières de roches massives susceptibles d'être exploitées économiquement mais aussi disposant de volume rocheux suffisants, se trouvant entre Port-Bergé et Ambanja. Les résultats de cette étape sont présentés dans la figure suivante :

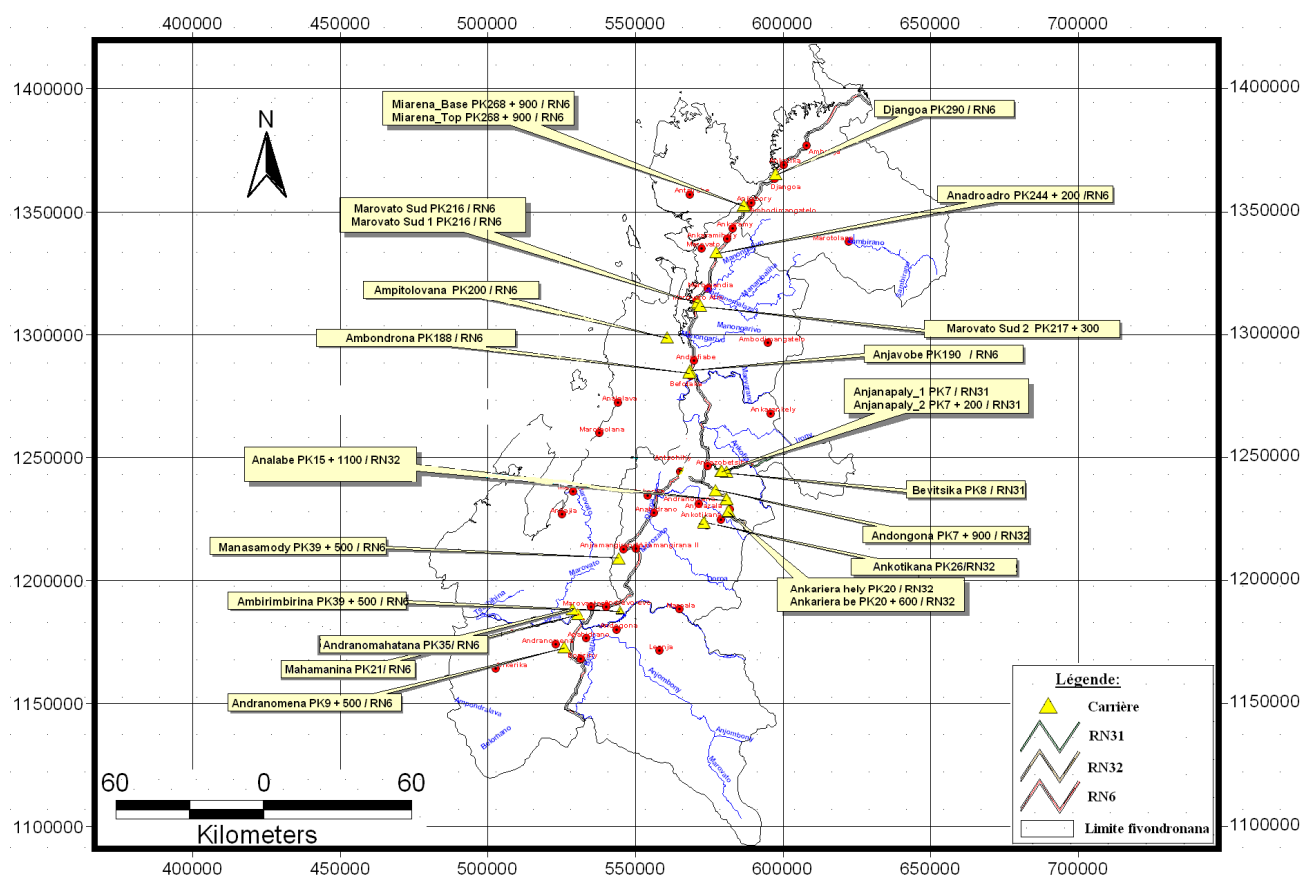


Figure 1- Carte de situation

3- Contexte géologique

La région de Sofia qui s'étend sur la côte Nord-Ouest de Madagascar dans le bassin sédimentaire de Mahajanga constitue le cadre d'étude. Dans cette partie, on rencontre principalement les formations sédimentaires du système Karoo datant du Carbonifère supérieur au Jurassique. On y rencontre essentiellement des formations continentales où les formations marines constituent seulement des intercalations locales et inégales. Ce bassin sédimentaire s'étale du NE au SW en formant un arc concave.

Le Karoo est peu développé dans cette région. Le premier groupe de la série est la Sakoa, d'âge Carbonifère supérieur à Permien moyen. Néanmoins, ce groupe est absent de la région de la Sofia mais présent dans les fossés tectoniques. Ensuite la Sakamena, d'âge Permien supérieur à Trias moyen, repose en discordance sur la Sakoa par l'intermédiaire d'un conglomérat d'origine torrentielle. Elle est en grande partie continentale, en revanche, dans l'extrême Nord, elle est

entièrement marine. Ce groupe est notamment présent dans le Nord du Bassin de Majunga, au Nord d'Antsohihy entre les rivières de Maevarano et d'Anjingo.

Le groupe de l'Isalo, d'âge Trias supérieur à Jurassique moyen, constitue la partie terminale de la série, affleure tout le long de la bordure orientale du bassin. L'ensemble de ces séries Karoo discordent sur le socle cristallin Précambrien constitué de migmatites, de migmatite granitoïde et de gneiss.

Les failles longitudinales et les fissures engendrées sans doute par la séparation de l'Inde et de Madagascar, ont favorisé les épanchements basaltiques et les intrusions volcaniques (syénite et trachyte) à partir du Crétacé moyen et supérieur. On retrouve ces affleurements tout le long de la RN6 à partir de Port-Bergé jusqu'à Ambanja (

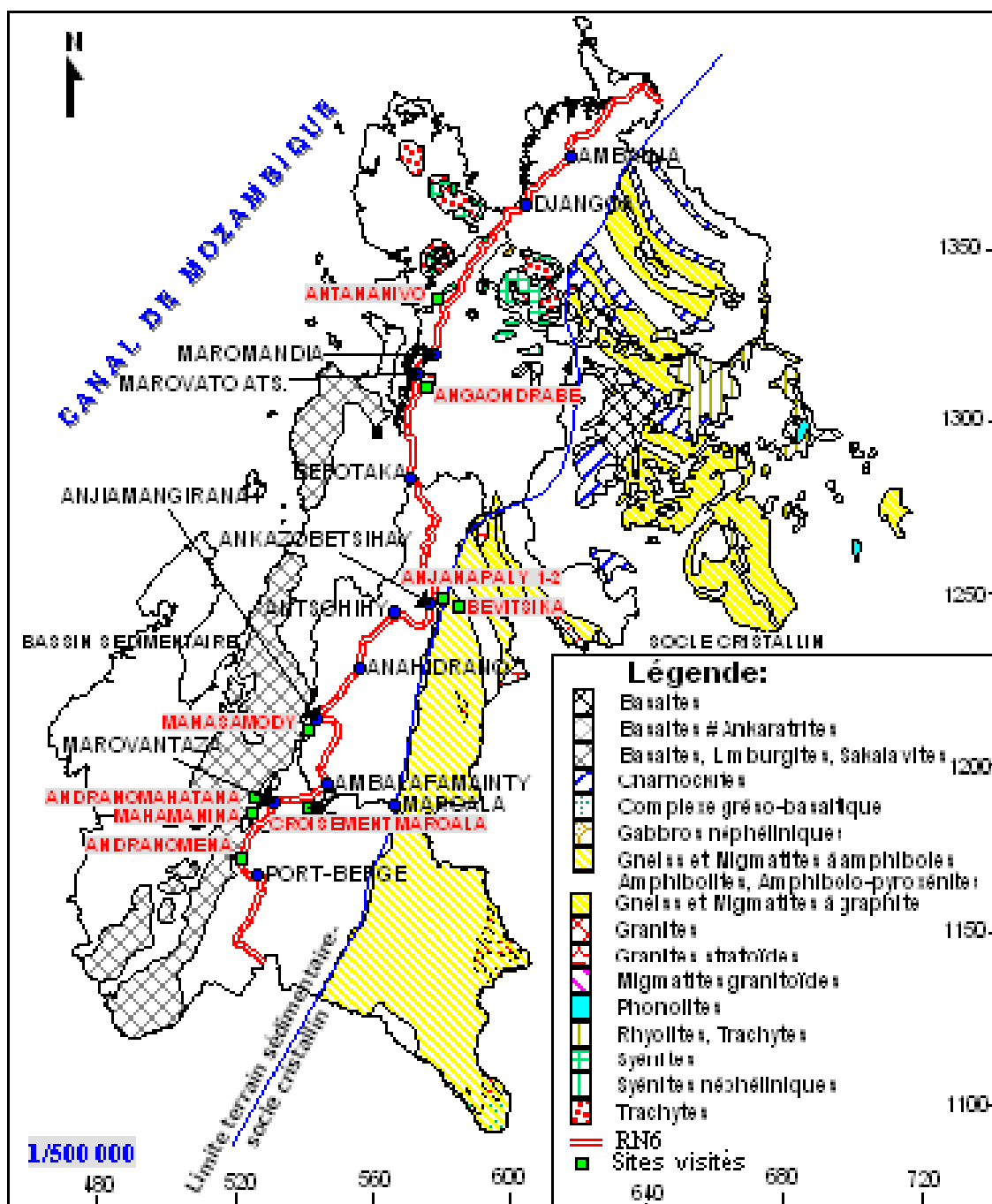


Figure 2- Carte géologique du Nord-Ouest de Madagascar

4- Caractéristiques des roches

- **Basalte**

C'est une roche magmatique, effusive, noire (mésocrate à mélanocrate) microlitique, à verre abondant et en général non bulleuse comportant des plagioclases et des clinopyroxènes, accompagnés selon le cas d'olivine, d'hypersthène, de magnétite, d'ilménite : il peut s'y ajouter en faible pourcentage, soit du quartz, soit des feldspathoïdes et localement du cuivre.

C'est une roche de dureté variable selon le degré de cristallisation et qui est parfois associée à des tufs de projection ou cinérite (plateau basaltique d'Antanimena). Parmi les variétés, on peut distinguer : la sakalavite (basalte quartzique à 10% de quartz), le labradorite (à plus de 50% d'Andésite). D'une manière générale les épaisseurs des épanchements basaltiques sont très variables, elles varient de 35m à 100m entre les rivières Sofia-Loza (Manasamody, Antsohiy-Analalava).

- **Syénite**

C'est une roche magmatique, effusive, équivalente des trachytes grenus, blanchâtres, plus souvent rosée à rouge (hololeucrate à leucocrate) avec comme minéral essentiel ($\geq 60\%$) du feldspath alcalin (orthose, anorthose, microcline) et un peu de biotite et de hornblende.

- **Syénite néphélinique (ou Syénite feldspathoïdique)**

C'est une roche magmatique, effusive, grenue, blanchâtre, grise rosée (hololeucocrate à leucocrate) avec des feldspaths alcalins (souvent microcline perthitique) et des feldspathoïdes, néphéline, le plus souvent.

- **Trachyte**

C'est une roche magmatique effusive, grenue, équivalent de la syénite, blanchâtre, grise, gris-verdâtre (leucocrate) microlitique et fluidale (structure trachytique) peu ou pas porphyrique, constituée de sanidine (en microlites ou en phénocristaux limpides et craquelés), d'anorthose, d'albite, avec biotite et amphibole plus rares, à mesostase vitreuse ou crypto cristalline peu abondante. Les épaisseurs des intrusions volcaniques sont de l'ordre de 5m à 20m.

- **Calcaire**

C'est une roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50% de calcite CaCO_3 et bien souvent de fossiles d'où leur importance en stratigraphie. Le calcaire a de nombreuses applications pratiques (pierres de construction, fabrication de chaux et de ciment, réservoir d'eau, ...).

- **Migmatite**

La migmatite est un mélange de roches de type granite et gneiss, à grain grossier et à foliation souvent peu marquée ou confuse, avec quartz, microcline et oligoclase, myrmékites fréquentes, et selon le cas biotite, muscovite, andalousite, sillimanite, cordiérite, grenat. Ces roches sont à la limite des roches métamorphiques catazonales et des roches magmatiques, et leur genèse est liée à une anatexie (fusion) partielle.

- **Granite**

Le granite est une roche magmatique, plutonique, effusive, grenue, de teinte claire (blanche, grise, rosée, rouge, hololeucocrate à leucocrate) avec les minéraux essentiels suivants constituants 80% de la roche : quartz xénomorphe interstitiel, feldspath alcalin (orthose, microcline) et plagioclase (albite, oligoclase) subautomorphe. Les minéraux secondaires et accessoires sont très variés : mica, amphibole, pyroxène (rare), apatite, zircon, tourmaline, cordiérite.

L'altération des granites dépend essentiellement de celle des feldspaths (kaolinisation). Ce qui permet une désagrégation de la roche et conduit à la formation d'une arène granitique. L'altération débute le plus souvent dans les fissures et les diaclases et isole de grosses boules de granite qui

peuvent subsister au sein d'une arène, ou si celle-ci est déblayée, pouvant s'entasser pour constituer des chaos granitiques.

Tableau 1- Caractéristiques récapitulatives des carrières retenues (Source Rapport SGDM)

	Repérage	Accès		Nature	Dureté		Volume
		Longueur (km)	Aménagement		LA	MDE	
1	Andranomena	3	OK	Basalte	13	20	67600
2	Mahanina	4	OK Buses à prévoir	Basalte	16	16	262000
3	Manasamody	4	OK	Basalte	12	21	284900
4	Analabe	0,75	OK	Migmatite gneiss et granite	32		104450
5	Anjanapaly I	0,05	Facile	Migmatite et gneiss	39		74400
6	Anjanapaly II	0,15	Facile	Migmatite et gneiss	32	17	93600
7	Bevitsika	0,2	Facile	Migmatite et gneiss	38	22	135000
8	Ambondrona- Befotaka	0,5	OK	Calcaire gréseux			106500
9	Ampitolovana- Andaveno	17	3 km	Basalte			46500
10	Anadroadro	0	Facile	Syénite	16	6	85600
11	Miarena	4	OK À reprendre	Syénite			243000
12	Djangoa	2	OK	Calcaire			69250

- **Gneiss**

Le gneiss est une roche métamorphique du métamorphisme général, le plus souvent, à grain moyen à grossier, à foliation souvent nette caractérisée par des lits généralement de teinte sombre, riches en minéraux ferromagnésiens (micas, amphiboles) alternant avec des lits clairs (blancs, gris, rosés) de quartz et de feldspaths. La structure est lépido-nématoblastique pour les lits sombres et granoblastique pour les lits clairs. Les minéraux autres que quartz, feldspaths et micas peuvent être très variés et on les mentionne dans la dénomination des gneiss : gneiss à grenat, à sillimanite, à cordiérite, à jadéite.... Selon l'aspect, on distingue aussi des variétés : gneiss granitoïde à grain grossier et à foliation peu marquée ; gneiss rubané à lits sombres et clairs réguliers et bien tranchés ; gneiss œillé à lentilles ovoïdes (1-5cm) constituées par des porphyroblastes de feldspath ou des amas granoblastiques quartz-feldspath. Sur les 23 carrières étudiées, douze d'entre elles ont été retenues et sont présentées avec leurs caractéristiques dans le tableau suivant :

5- Les méthodes de type Electre

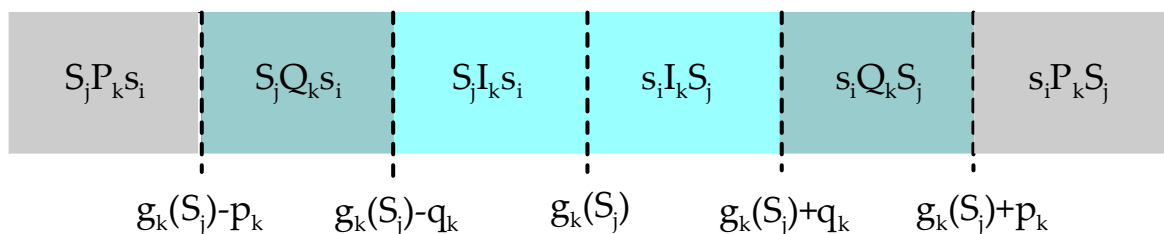
Il s'agit de méthodes de surclassement c'est-à-dire basée sur des comparaisons deux à deux des actions. Ces méthodes ont été développées par B. Roy et ses collaborateurs du LAMSADE. Six méthodes de type Electre ont été développées à savoir : Electre I présentée pour la première fois en 1968 et qui relève de la problématique de choix, Electre II qui date de 1972 et problématique de choix, Electre III qui date de 1977, problématique de rangement, Electre IV date de 1982 problématique de rangement, Electre IS qui date de 1985 problématique de choix. Cette méthode est une généralisation de la méthode Electre I qui relève aussi de la problématique de choix et enfin, Electre Tri qui relève de la problématique de tri.

- **Comparaisons des sites**

L'ensemble des comparaisons, sur chaque critère d'évaluation avec l'introduction des deux seuils q_k et p_k , entre les performances d'un site s_i et les sites de référence S_1, S_2, S_3 fournit une réponse partielle à l'entrée d'un site dans une classe j . Ces comparaisons sont définies de la manière suivante (Figure 16):

- si $\left|g_k(s_i) - g_k(S_j)\right|$ est inférieure à q_k , on considère que cette différence n'est pas significative et que $g_k(s_i)$ et $g_k(S_j)$ sont pratiquement équivalentes : on dira alors que le site s_i et le site de référence bas de la classe j , S_j , sont indifférents (I_k) du point de vue du critère g_k ($s_i I_k S_j$),
- si $\left|g_k(s_i) - g_k(S_j)\right|$ est supérieure à p_k , on considère que cette différence est significative : dans le cas où $g_k(s_i)$ est supérieure à $g_k(S_j)$, on dira que le site s_i est strictement préféré à S_j , pour le critère g_k ($s_i P_k S_j$); dans le cas inverse, S_j est strictement préféré à s_i ($S_j P_k s_i$),
- comme le seuil de concordance p_k n'est pas égal au seuil de discordance q_k , l'intervalle entre ces deux valeurs représentent une ambiguïté dans laquelle le caractère de préférence d'un site de gisement de carrière est présumé être plus élevé sans que la différence $\left|g_k(s_i) - g_k(S_j)\right|$ puisse être jugée véritablement significative. On dira que s_i est faiblement préféré (Q_k) à S_j que pour le critère g_k ($s_i Q_k S_j$); S_j est faiblement préféré à s_i dans le cas inverse ($S_j Q_k s_i$);
- l'introduction du seuil de veto v_k permet de refuser toute préférence d'un site s_i par rapport à un site de référence S_j où le contraire dans le cas où $\left|g_k(s_i) - g_k(S_j)\right|$ est strictement supérieure à v_k .

L'ensemble de ces comparaisons a été traduit à travers les indices de concordance et de discordance définis ci-dessus.



La considération de toutes ces comparaisons globalement sur l'ensemble des critères permet de juger de l'affectation ou non d'un site s_i dans une classe d'affectation j . Pour cela, le degré de crédibilité $\sigma(s_i, S_j)$ est comparé à un seuil de crédibilité sc . Trois situations sont alors possibles et seules possibles :

- l'indifférence :
 $\sigma(s_i, S_j) \geq sc$ et $\sigma(S_j, s_i) \geq sc \Rightarrow s_i IS_j$
- la préférence stricte (s_i est strictement préféré à S_j ou l'inverse)

$$\sigma(s_i, S_j) \geq sc \text{ et } \sigma(S_j, s_i) < sc \Rightarrow s_i PS_j \quad \sigma(S_j, s_i) \geq sc \text{ et } \sigma(s_i, S_j) < sc \Rightarrow S_j Ps_i$$

- l'incomparabilité
 $\sigma(s_i, S_j) < sc$ et $\sigma(S_j, s_i) < sc \Rightarrow s_i RS_j$.

Les comparaisons du degré de crédibilité avec le seuil de crédibilité permettent de déterminer la classe d'affectation j dans laquelle un site s_i doit être affecté suivant deux procédures d'affectation proposées par la méthode Electre Tri :

- la procédure d'affectation pessimiste
- la procédure d'affectation optimiste

La procédure d'affectation pessimiste consiste à affecter un site s_i à une classe j , si :

- $s_i PS_j$
- et si $S_{j-1} Ps_i$ ou $S_{j-1} Rs_i$

ou

- si $s_i IS_j$
- et si $S_{j-1} Ps_i$.

La procédure d'affectation optimiste consiste à affecter un site s_i à une classe j , si :

- d'une part : $s_i PS_j$, ou $s_i IS_j$, ou $s_i RS_j$ et d'autre part
- et si $S_{j-1} Ps_i$.

De par la manière dont elles sont dirigées, ces deux procédures d'affectation mènent à deux classements. La procédure pessimiste aura tendance à affecter les sites à des classes inférieures. Et la procédure optimiste aura tendance à affecter les sites à des classes d'affectation supérieures par rapport au classement de la procédure pessimiste.

Une figure résumant la démarche d'utilisation de Electre Tri est donnée ci-après :

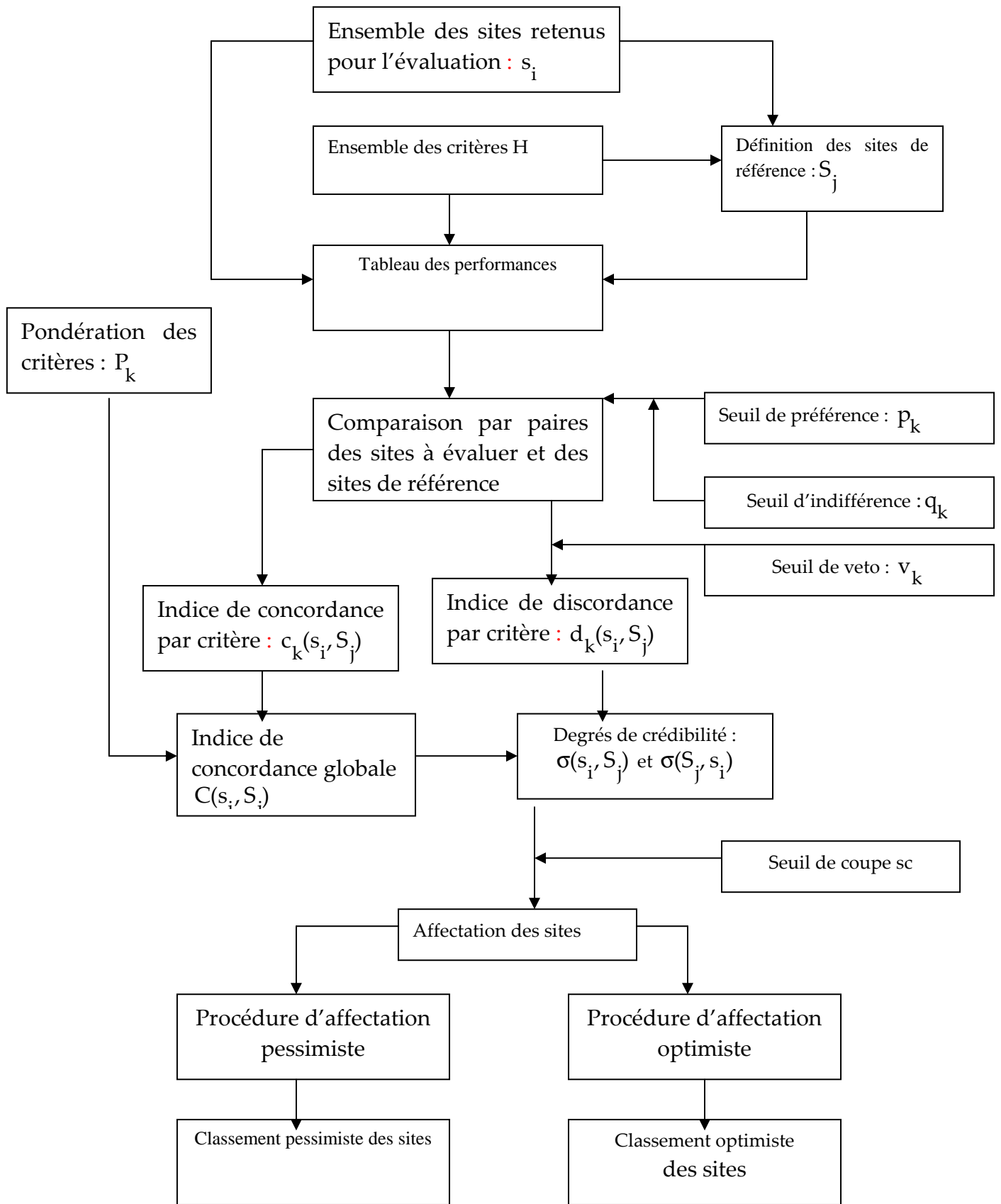


Figure 3 – Démarche d'utilisation de Electre Tri

Les résultats de la mise en œuvre de Electre Tri sont présentés sous forme de tableaux. Le Tableau 2 donne les résultats issus de la procédure d'affectation optimiste tandis que le Tableau 3 donne les résultats issus de la procédure d'affectation pessimiste. Le Tableau 4 donne la valeur des degrés de crédibilité du surclassement.

Tableau 2- Classement optimiste des sites de carrières de roches massives

Classe d'affectation	sc=0,63	sc=0,70	sc=0,75	sc=0,80	sc=0,90
Classe 1	Mahamanina Manasamody Andogona Miarena	Mahamanina Manasamody Andogona Miarena	Mahamanina Manasamody Miarena	Mahamanina Manasamody Miarena	Mahamanina Manasamody Analabe Miarena
Classe 2	Andranomena Analabe Anjanapaly I Anjanapaly II Bevitsika Anadroadro Djangoa	Andranomena Ambirimbirina Analabe Anjanapaly I Bevitsika Anadroadro Djangoa	Andranomena Ambirimbirina Andogona Analabe Anjanapaly I Bevitsika Ampitolovana Anadroadro Djangoa	Andranomena Ambirimbirina Andogona Analabe Anjanapaly I Bevitsika Ampitolovana Anadroadro Djangoa Marovato Sud	Andranomena Ambirimbirina Andogona Anjanapaly I Anjanapaly II Bevitsika Ampitolovana Anadroadro Djangoa Marovato Sud
Classe 3	Ambirimbirina Ampitotolovana	Anjanapaly II Ampitotolovana	Anjanapaly II	Anjanapaly II	
Classe 4	Marovato Sud	Marovato Sud	Marovato Sud		

Si on considère le cas du site s_3 (Ambirimbirina) avec $sc=0.63$. En procédant par la méthode optimiste décrite plus haut, ce site est affecté à la classe 3. En effet, lors de la comparaison de ce site au profil bas de la classe 3 (S_3), le degrés de crédibilité $\sigma(s_3, S_3)$ est égal à $0.5300 < 0.63$, et $\sigma(S_3, s_3)$ est égal à $0.4428 < 0.63$: s_3 est incomparable avec S_3 , il peut donc être affecté en classe 3 du fait du choix de la procédure optimiste. Si on poursuit la comparaison, la comparaison avec le profil bas de la classe 2 (S_2), le degrés de crédibilité $\sigma(s_3, S_2)$ est égal à $0.000 < 0.63$ et $\sigma(S_2, s_3)$ est égal à $0.6725 > 0.63$: s_3 ne peut pas donc rentrer en classe 2. Il en est de même avec la comparaison du site s_3 avec le profil bas de la classe 1 (S_1) ; le degrés de crédibilité $\sigma(s_3, S_1)$ est égal à $0.000 < 0.63$ et $\sigma(S_1, s_3)$ est égal à $0.9500 > 0.63$: s_3 ne peut pas donc rentrer en classe 1. Finalement, s_3 est affecté en classe 3.

Par contre, la mise en œuvre de la procédure pessimiste conduit à l'affectation du site s_3 en classe 4. Lors de la comparaison de ce site au profil bas de la classe 1 (S_1), le degrés de crédibilité $\sigma(s_3, S_1)$ est égal à $0.000 < 0.63$ et $\sigma(S_1, s_3)$ est égal à $0.9500 > 0.63$: s_3 ne peut pas rentrer en classe 1. Si on poursuit la comparaison avec le profil bas de la classe 2 (S_2), le degrés de crédibilité $\sigma(s_3, S_2)$ est égal à $0.000 < 0.63$ et $\sigma(S_2, s_3)$ est égal à $0.6725 > 0.63$: s_3 ne peut pas rentrer en classe 2. Pour finir, s_3 est comparé à S_3 ; $\sigma(s_3, S_3)$ est égal à $0.5300 < 0.63$, et $\sigma(S_3, s_3)$ est égal à

$0.4428 < 0.63$: s_3 est incomparable avec S_3 , il ne peut pas donc être affecté en classe 3 compte tenu du fait de la procédure pessimiste. Finalement il est affecté en classe 4.

Tableau 3- Classement pessimiste des sites de carrières de roches massives

Classe d'affectation	Sc=0,63	sc=0,70	sc=0,75	sc=0,80	sc=0,90
Classe 1	Mahamanina Manasamody Andogona Miarena	Mahamanina Manasamody Andogona Miarena	Mahamanina Manasamody Miarena	Mahamanina Manasamody Miarena	Mahamanina Miarena
Classe 2	Andranomena Analabe Anjanapaly I Anjanapaly II Bevitsika Anadroadro Djangoa	Analabe Anjanapaly I Bevitsika	Andogona Analabe Anjanapaly I Bevitsika	Andogona Analabe Anjanapaly I Bevitsika	Manasamody Andogona Analabe Anjanapaly I Anjanapaly II Bevitsika
Classe 3	Ampitotolovana	Andranomena Anjanapaly II Anadroadro Djangoa	Andranomena Anjanapaly II Anadroadro Djangoa	Andranomena Anjanapaly II Marovato Sud Anadroadro Djangoa	Andranomena Anadroadro Djangoa
Classe 4	Ambirimbirina Marovato Sud	Ambirimbirina Ampitotolovana Marovato Sud	Ambirimbirina Ampitotolovana Marovato Sud	Ambirimbirina Ampitotolovana	Ambirimbirina Ampitotolovana Marovato Sud

Le site s_3 est affecté en classe 3 pour la procédure optimiste et affecté en classe 4 pour la procédure pessimiste. La mise en œuvre de Electre Tri donne donc deux résultats sur la classe à attribuer à chaque site.

6- Analyse de robustesse

Pour vérifier la robustesse du classement obtenu, il est nécessaire d'effectuer des analyses de sensibilité au changement de valeur du seuil de crédibilité sc et des différents seuils (de discordance, de concordance, et de veto). De nouveaux classements ont été déduits :

- en faisant varier q_1 et q_2 dans l'intervalle [4; 15];
- en faisant varier p_1 dans l'intervalle [17; 30];
- en faisant varier p_2 dans l'intervalle [18; 31];
- en faisant varier q_3 dans l'intervalle [1; 5];
- en faisant varier p_3 dans l'intervalle [2; 10];
- en faisant varier q_6 dans l'intervalle [10; 50];
- en faisant varier p_6 dans l'intervalle [50; 100];
- en faisant varier les valeurs du seuil de crédibilité sc ;
- en faisant varier les seuils de veto v_1 dans l'intervalle [30;40], v_2 dans [20;34], v_3 dans [10;15] et v_6 dans l'intervalle [100;200].

Tableau 4- Degrés de crédibilité $\sigma(s_i, S_j)$ et $\sigma(S_j, s_i)$

$\sigma(s_i, S_j)$ $\sigma(S_j, s_i)$	S_3	S_2	S_1
s_1	1.0000 0.3910	0.6300 0.6600	0.0000 0.9500
s_2	1.0000 0.0000	1.0000 0.0000	1.0000 1.0000
s_3	0.5300 0.4428	0.0000 0.6725	0.0000 0.9500
s_4	1.0000 0.0000	1.0000 0.0000	0.8050 0.6062
s_5	1.0000 0.0006	1.0000 0.2975	0.7095 0.9250
s_6	1.0000 0.2225	0.8335 0.5600	0.0000 0.9000
s_7	1.0000 0.5556	0.9500 0.9000	0.0000 0.9500
s_8	1.0000 0.8750	0.6485 0.9000	0.0000 0.9500
s_9	1.0000 0.1316	1.0000 0.6100	0.0414 0.9500
s_{10}	0.6382 0.2684	0.0462 0.7100	0.0000 0.9500
s_{11}	0.1521 0.7750	0.0000 0.8000	0.0000 0.9500
s_{12}	1.0000 0.0834	0.6300 0.4200	0.0000 0.9250
s_{13}	0.9500 0.0000	0.9500 0.0012	0.9500 1.0000
s_{14}	1.0000 0.1029	0.6300 0.3700	0.0000 0.9250

Considérons l'analyse de robustesse sur le seuil de crédibilité sc et prenons le cas du site s_1 dans une classification par la procédure pessimiste. Soit $sc = 0,63$, on constate que $\sigma(s_1, S_1)=0,00 < 0,63$ (Tableau 13) et $\sigma(S_1, s_1)=0,95 > 0,63$: s_1 ne peut rentrer en classe 1. En comparant s_1 à la limite d'entrée en classe 2, on constate que $\sigma(s_1, S_2)=0,6 = sc$ et $\sigma(S_2, s_1)=0,66$: s_1 rentre donc en classe 2 du fait du choix de la procédure d'affectation pessimiste. Soit $sc=0,75$, on constate que $\sigma(s_1, S_1)=0,00 < 0,75$ et $\sigma(S_1, s_1)=0,95 > 0,75$: s_1 ne peut pas rentrer en classe 1. En comparant s_1 à la limite d'entrée en classe 2, on constate que $\sigma(s_1, S_2)=0,6 < 0,75$ et $\sigma(S_2, s_1)=0,66 < 0,75$: s_1 ne peut pas rentrer en classe 2 du fait du choix de la procédure pessimiste. En continuant la comparaison avec la limite d'entrée en classe 3, on a : $\sigma(s_1, S_3)=1,000 > 0,75$ et $\sigma(S_3, s_1)=0,391 < 0,75$: s_1 rentre donc en classe 3 du fait du choix de la procédure pessimiste. Ainsi en faisant varier la valeur du paramètre sc de 0,63 à 0,75, la classe d'affectation de s_1 a changé allant de la classe 2 en classe 3. on dit alors que la conclusion est sensible à cette variation de la valeur de sc . Dans le cas où la classe d'affectation des sites n'aura pas changé avec les différentes valeurs de sc , elle sera dite stable dans le tableau 12

En résumé, la robustesse du classement obtenu est vérifiée à l'aide d'une analyse de sensibilité sur les différents seuils. Si la classe d'un site change en faisant varier un seuil, il est dit sensible à la variation de ce seuil, sinon il sera dit stable. Les résultats de cette analyse de robustesse est résumé dans le Tableau 5.

Tableau 5- Résultats issus de l'analyse de robustesse

	Affectation des sites avec $sc=0,75$		Analyse de sensibilité	
	Procédure optimiste	Procédure pessimiste	Procédure optimiste	Procédure pessimiste
Andranomena	2	3	2	2 et 3
Mahamanina	1	1	stable	stable
Ambirimbirina	2	4	2 et 3	4
Manasamody	1	1	stable	1 et 2
Andogona	2	2	1 et 2	1 et 2
Analabe	2	2	1 et 2	stable
Anjanapaly I	2	2	1 et 2	stable
Anjanapaly II	3	3	2 et 3	2 et 3
Bevitsika	2	2	stable	stable
Ampitolovana	2	4	2 et 3	3 et 4
Marovato Sud	4	4	2 et 4	3 et 4
Anadroadro	2	3	2	2 et 3
Miarena	1	1	stable	stable
Djangoa	2	3	stable	2 et 3

7- Discussions

Les résultats issus des deux procédures de classement montrent que la procédure pessimiste est plus restrictive que la procédure optimiste en terme de performance attribuée aux sites de carrières de roches massives. Ceci est dû au fait que pour pouvoir affecter un site à une catégorie donnée, il faut que le site soit jugé au moins « aussi performant » que la frontière basse de la catégorie. Ce qui traduit une certaine prudence dans la procédure d'affectation. Ainsi avec une valeur de sc de 0,75 , cette procédure d'affectation donne les résultats suivants :

- trois sites de carrières de roches massives sont affectés à la classe 1 correspondante aux sites jugés «les plus performants »,
- quatre sites sont affectés en classe 2,
- quatre sites sont affectés en classe 3,
- et trois sites sont affectés en classe 4 correspondants aux sites jugés « les moins performants ».

Les résultats donnés par Electre Tri comparés à une première sélection effectuée par les responsables de la prospection sont assez identiques. On peut affirmer que les résultats fournis par la méthode Electre Tri est fiable.

Les trois sites jugés les plus performants sont les sites de Mahamanina, Manasamody et Miarena. Tandis que les sites jugés les moins performants sont Ambirimbirina, Ampitolovana et Marovato Sud. On remarque que les sites les plus performants correspondent aux sites dont le volume du gisement est supérieur à 200 000 m³ et que les sites jugés les moins performants ont un volume du gisement inférieur à 50000 m³.

Il serait intéressant d'effectuer une analyse de corrélation entre les classements observés avec les performances des sites sur chaque critère. Les résultats fournis par Electre Tri nous permet de définir des valeurs des niveaux de performance correspondant aux quatre classes d'affectation définies. Nous avons choisi de codifier un indicateur multicritère de performance Y sur la base des classes d'affectation d'Electre Tri: soit $Y=1$ pour la catégorie la plus haute c'est-à-dire la classe 1, $Y=2$ pour la classe 2, $Y=3$ pour la classe 3 et $Y=4$ pour la classe 4. Ces valeurs seront attribuées à la variable Y lors de l'analyse de corrélation.

Le coefficient de corrélation permet d'évaluer le niveau de variation conjointe de deux mesures variables. Sa valeur est comprise entre -1 et $+1$. Le coefficient de corrélation entre la variable Y et le critère g_6 correspondant au gisement du volume est égal à $-0,91$. Cela signifie que les petites valeurs de l'un des variables sont associés aux valeurs élevées de l'autre. Dans notre cas, les faibles valeurs de Y sont associées à des performances élevées du critère g_6 . On peut donc avancer que le classement attribué à chaque site est fortement corrélé avec le volume du gisement. Cela peut aussi s'expliquer par la grande importance accordée au critère g_6 à travers son poids.

Pour le cas des autres critères, la valeur absolue de leurs coefficients de corrélation avec Y varie entre $0,13$ et $0,36$. On peut en déduire que le classement obtenu est plus ou moins faiblement corrélé avec les performances de ces autres critères.

Le tableau suivant fourni les coefficients de corrélation entre les critères d'évaluations des sites et les classements obtenus pour chaque site avec la procédure d'affectation pessimiste pour un seuil de crédibilité sc égale à $0,75$.

Tableau 6- Coefficients de corrélation entre les critères et les classements des sites

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	Y
g_1	1,00						
g_2	0,45	1,00					
g_3	- 0,44	0,10	1,00				
g_4	- 0,09	0,36	- 0,08	1,00			
g_5	0,17	- 0,01	0,27	- 0,26	1,00		
g_6	0,31	0,27	0,09	0,11	- 0,23	1,00	
Y	- 0,21	- 0,36	- 0,27	- 0,13	0,14	- 0,94	1,00

Remarquons les limites de validité des résultats de cette étude. Il serait intéressant de réunir un comité d'experts afin de mieux définir les critères qui doivent être pris en compte ainsi que les valeurs à accorder aux différents seuils et paramètres. La concertation d'un plus grand nombre d'acteurs spécialisés dans le domaine de l'exploitation des carrières et des travaux routiers ne sera que bénéfique pour la bonne marche du processus d'aide à la décision. Les résultats donnés par la méthode Electre Tri donne donc les conclusions suivantes :

- les classements proposés par les deux procédures d'affectation ne sont pas les mêmes. Le classement pessimiste est beaucoup plus restrictive. Il serait plus prudent de considérer les classements issus de la procédure pessimiste;
- si on considère ce classement pessimiste, les sites jugés les plus performants sont les sites de Mahamanina, Manasamody et Miarena. Ces trois sites jugés les plus performants possèdent tous des volumes de gisements supérieurs à $200\ 000\ m^3$;
- les sites jugés les moins performants sont les sites de Marovato Sud et d'Ampitolovana. Contrairement aux précédents, ces deux sites ont des volumes de gisement inférieurs à $50\ 000\ m^3$;
- quant aux autres sites, ceux d'Andogona, Analabe, Anajanapaly I et Bevitsika sont considérés comme performants sans être toutefois les meilleurs. L'analyse de robustesse montre que leur classement varie entre la classe 1 et la classe 2. Les autres sites restant ont des classes qui varient entre la classe 2 et la classe 4. On ne peut pas cependant considérer qu'ils sont les moins performants si on en juge les résultats fournis par Electre Tri.

7- Conclusion

Cette étude présente une méthode permettant de traduire d'une façon concrète l'interaction de différents paramètres pour la hiérarchisation des carrières de roches massives. Le contexte cadre parfaitement avec les préoccupations de l'analyse multicritère : nombre de sites à évaluer élevé, souvent difficiles à répartir, nombre de critères d'évaluation élevé, voire conflictuel.

Comme les autres méthodes d'aide à la décision, la mise en œuvre de la méthode Electre Tri peut présenter des difficultés. La plus évidente est la construction du tableau des performances pour différentes raisons et, en particulier, concernant l'élaboration de la famille des critères pour l'évaluation des sites. Le choix des critères doit amener à une famille de critères qui soient exhaustifs et indépendants. D'autre part, une des principales difficultés concerne le choix des sites de référence. Cette difficulté découle du fait que l'application de la méthode Electre Tri se base sur la comparaison des sites avec les sites de références bornant chaque classe d'affectation et que cette comparaison ne donne pas toujours des résultats assez concluants permettant de les distinguer. Et, il est d'autant plus difficile de définir les classes d'affectation car la définition des classes d'affectation est très liée au choix des sites de référence. Enfin l'analyse de robustesse peut aussi constituer une autre source de difficulté de par le grand nombre de paramètres qui interviennent dans cette analyse.

On peut affirmer que les résultats fournis par la méthode Electre Tri sont fiables. Cette étude doit avoir son intérêt dans d'autres aspects du secteur minier et/ou pétrolier. L'étude serait encore plus intéressante dans la résolution des problèmes de prise de décision si on lui intégrait un SIG. De nombreuses perspectives sont envisageables pour l'application des méthodes d'aide multicritère à la décision dans le domaine de la gestion des ressources minérales pour donner une suite à cette étude de cas concret.

Remerciements

Les auteurs tiennent à adresser leurs sincères remerciements aux Sociétés COLAS et SGDM pour la mise à disposition des données et pour la prise en charge des frais de terrain. Par souci de confidentialité, certains détails n'ont pas été précisés.

Références bibliographiques

- Andriamahefamanana V., 2002. Analyse multicritère et Programmation dynamique. Méthodologie et Application à l'étude des gisements d'or d'Ambondrona, Ambatolampy, Antananarivo – *Mémoire d'ingénieur en mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Univ d'Antananarivo*
- Ben Mena S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision, *Unité de Mathématique, Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux*
- Ben Mena S., 2000. Une approche de la gestion environnementale en plein essor - Les méthodes multicritères d'aide à la décision, *Unité de Mathématique, Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux*
- Collette Y., Siarry P., 2002. Optimisation multiobjectif – *Edition Eyrolles, N°6827*
- Grignac C., Heraud H., 1993. Notion de géologie du massif, *Mines et carrières, Foration et Tir, Les techniques 1/93, Revue de la Société de l'Industrie Minérale, Volume 75*
- Grignac C., Heraud H., Meyer J.L., Roy J.Y., 1993. Caractéristiques des matériaux, *Mines et carrières, Foration et Tir, Les techniques 1/93, Revue de la Société de l'Industrie Minérale, Volume 75*
- Merad M, Verdel T., Kounialy S., Roy B., 2004. Contribution de la méthode Electre-Tri à la hiérarchisation de zones à risque induit par la présence d'ouvrages miniers abandonnés. Application au bassin ferrifère lorrain, LAMSADE, Université Paris IX Dauphine, *LAEGO Ecole des mines de Nancy-Ineris, Les Techniques de l'Industrie Minérale, N°21*

- Phaneuf Y., 1990. Processus d'EIE et prise de décision, Institut d'urbanisme, *Université de Montréal*, 44p.
- Roy B., Bouyssou D., 1993. Aide multicritère à la décision : Méthode et Cas, *Paris : Economica*
- SGDM, 2004. Synthèse des travaux géophysiques sur la prospection de roches massives entre Bergé (PK0) et Djangoa (PK290), Sections 3 à 5 - RN6, *Rapport pour COLAS*
- Tille M., 2000. Choix de variantes d'infrastructures routières - Méthodes multicritères, *Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne*