

**PREMIERE PARTIE : ETUDES ET  
RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES**



## **INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE**

La destination prévue de la chromite exige un minimum de silice. C'est pourquoi, il est important de procéder à la désilicication. Pour meilleure étude de la réalisation de cette dernière, nous estimons les intérêts de thème d'études avant d'enquêter sur les généralités de la silice et de la chromite d'Andriamena. Des études de quelques procédés de désilicication seront aussi citées et analysées en vue de retenir la meilleure méthode.



## CHAPITRE I. INTERETS DE THEME D'ETUDE

### *Introduction*

Le minerai de chrome est le seul exploité par la société KRAOMA. Elle produit deux sortes de produits marchands selon la granulométrie : les produits rocheux et les produits fins ou concentrés. Les clients sont devenus quant à eux plus exigeants sur la qualité des produits aussi bien que sur celle des services.

### **PROBLEME ACTUEL DE LA KRAOMA**

Face aux exigences de compétitivité due à la mondialisation de l'économie, KRAOMA a compris qu'elle doit toujours être de plus en plus performante pour survivre. Les contacts avec les clients sont les meilleurs moyens pour suivre, voire anticiper, l'évolution et les tendances du marché. KRAOMA doit anticiper cette évolution qui pourrait s'y préparer en développant ses ventes vers les nouveaux marchés comme ceux de la chimie et des réfractaires. Ce qui demande un effort de connaissance de marché et une adaptation de son traitement pour produire les qualités requises. Elle cherche des solutions pour avoir le concentré désilicié selon les normes actuelles citées dans le tableau N°01 ci-après. Les spécifications sont caractérisées principalement par les teneurs en chrome et en silice ainsi que le ratio Cr/Fe.

Les informations suivantes sont le fruit d'une consultation avec les principaux représentants de l'industrie afin de fixer les caractéristiques de la chromite :

**Tableau N°01. Normes actuelles exigées par les clients internationaux**

Utilisations	Teneurs			Exemples d'utilisation
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (en%)	SiO <sub>2</sub> (en%)	Cr/Fe(en%)	
Métallurgique	42	4-5	1,4-1,5	Ferrochrome, aciers inoxydables
Chimique	± 45	<1	1,4-1,5	Industrie des métaux et du partinium, tannerie et chromage et
Fonderie	> 46	<1	1,55	Industrie de la fonte, ferrochrome et aciers inoxydables
réfractaire		<1		Briques réfractaires et four

Source KRAOMA 2007

Actuellement, les consommateurs exigent des concentrés à basse teneur de silice pour la chromite utilisée comme matière première dans l'industrie chimique, et pour les réfractaires et la fonderie. Ceci constitue le problème actuel de la KRAOMA.

### **Conclusion**

Pour satisfaire les besoins des clients, des études sont indispensables, en particulier la désiliciation. Mais avant d'étudier le procédé approprié à cette désiliciation, il est nécessaire de prendre des connaissances sur la silice et sur la chromite d'Andriamena.

## CHAPITRE II. GENERALITES SUR LA SILICE ET SUR LA CHROMITE D'ANDRIAMENA

### *Introduction*

Le dioxyde de silicium ou silice est une des substances les plus répandues sur l'écorce terrestre. Pour pouvoir entrer dans l'étude expérimentale, il est important d'enquêter sur l'étude bibliographique de silice, et ensuite sur la connaissance de la chromite d'Andriamena de la société KRAOMA.

### II.1. GENERALITE SUR LA SILICE

#### II.1.1. Les différentes formes de la silice [12],[15], [17], [23], [25]

La silice se trouve en deux états différents :

✓ état anhydre  $\text{SiO}_2$  :- cristallisée (comme le quartz, la tridymite, la cristobalite, la coésite, la kroatite, la stishovite, la mélanophlogite, la silice fibreuse w) en prismes hexagonaux droits surmontés de pyramides à six faces, on l'appelle quartz à ce moment là. Le plus pur est le quartz hyalin ou cristal de roche limpide et incolore.

- amorphe, dans les sables, le silex, le grès, le jaspe, etc....

✓ état hydraté :  $\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ , avec n généralement 3 ou 4.

**Tableau N°02. Les différentes formes de la silice**

Etats	Formes
<p>Anhydre</p>	<p><b>Silice cristallisée :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- quartz : on le trouve, à l'état naturel, en cristaux de grandes dimensions, incolores et homogènes. C'est l'un des éléments importants de nombreuses roches. Le quartz cristallisé à la température ordinaire ou à basse température, appartient au système hexagonal. La densité vraie est de 2,5.</li> <li>- Tridymite : cristallise dans le système orthorombique. A plus de 163°C, la cristallisation se fait dans le système hexagonal. La densité vraie est de 2,66.</li> <li>- Cristobalite : cristallise dans le système quadratique et à plus de 250°C, dans le système cubique.</li> </ul> <p>La zone de stabilité est la suivante, sous pression ordinaire :</p> <p style="text-align: center;">             Quartz                      Tridymite                      Cristobalite              0 —————&gt; 867°C —————&gt; 1470°C —————&gt; 1725°C —————&gt; Silice fondue         </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coésite et stishovite : On retrouve dans la coésite monoclinique, de densité 3,0, la charpente tridimensionnelle des tétraèdres SiO<sub>4</sub> des tectosilicates, tandis que la stishovite, quadratique, de densité très élevée (4,35), est la seule forme de silice dans laquelle les atomes de silicium sont situés au centre d'octaèdres d'ions oxygène.</li> <li>- Kéatite : C'est une forme intermédiaire entre la cristobalite et le quartz, inconnue dans la nature.</li> <li>- Mélanophlogite : Elle est cubique. Sa densité est 2,05.</li> </ul> <p><b>Silice amorphe :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Silex : On la trouve, des meilleures qualités de silex, sous forme de nodules dans les dépôts de craie. On en trouve aussi, mais de qualité inférieure, dans les calcaires crétacés.</li> <li>- Sable : Quand les grains viennent de se former, ils sont anguleux et très pointus. Par la suite, sous l'action du vent et de l'eau, ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits.</li> <li>- Grès : Le matériau agglomérant qui lie les grains de sable entre eux est généralement composé de silice, de carbonate de calcium, ou d'oxyde de fer. La couleur de la roche est souvent déterminée, pour une grande part, par le matériau agglomérant, l'oxyde de fer donnant un grès rouge, ou brun rougeâtre, et les autres matériaux donnant des grès blancs, jaunâtres ou grisâtres.</li> <li>- Jaspe : est généralement taché par des impuretés et se présente dans différentes couleurs comme rouge, vert, jaune et bleu.</li> </ul>
<p>Hydraté</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Silice fibreuse w : Elle est orthorhombique. Sa densité est de 1,96.</li> <li>- Silice vitreuse : On l'obtient en laboratoire par refroidissement de silice fondue ou par hydrolyse de SiCl<sub>4</sub>. Des hétérogénéités (inclusions, granularité) peuvent provenir d'impuretés, en présence d'eau. La densité (de l'ordre de 2,20).</li> <li>- Opale : Elle est massive ou réniforme, parfois stalactitique, Sa densité est voisine de 2,0</li> </ul>

## II.1.2. Les propriétés de la silice

### II.1.2.1. Propriétés thermiques [6], [8], [9]

#### ► Transformation thermique de la silice :

Les trois principales formes de silice (quartz, tridymite, cristobalite) correspondent chacune à des conditions d'équilibre bien définies.

La figure N°01 suivante donne la différente transformation thermique en fonction de la température

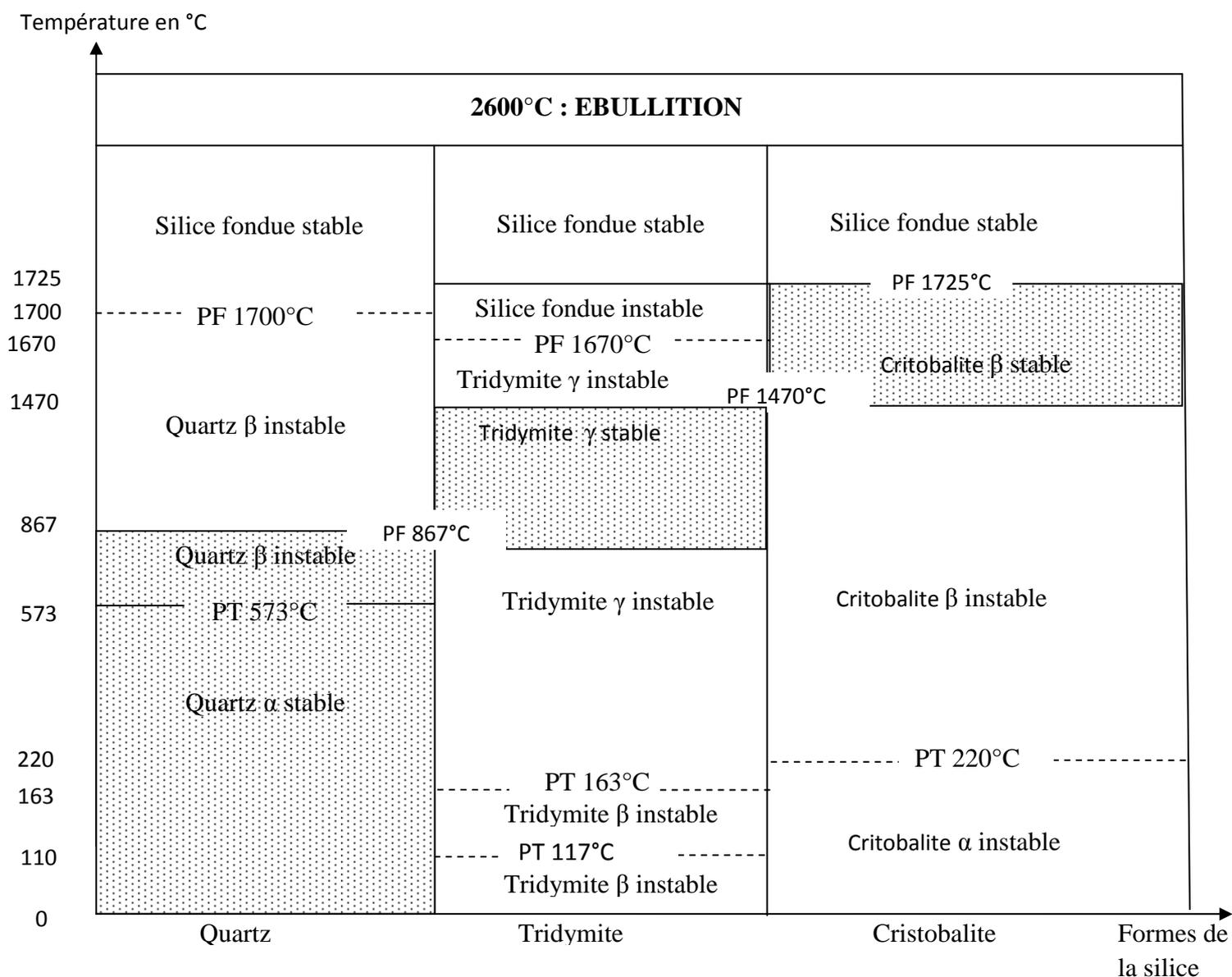


Figure N°01: La différente transformation thermique en fonction de la température



### Commentaires:

PT : point de transformation

PF : point de fusion

Les domaines de stabilité de chaque espèce sont en pointillés.

Les points les plus critiques sont les suivants :

- de 117°C à 170°C : passage de tridymite  $\alpha$  à  $\beta$ , puis  $\gamma$ , et réciproquement. On a des variations de volume instantanées de 0,3% environ, soit des variations linéaires de 0,1%.

- de 200°C à 275°C : passage de cristobalite  $\alpha$  à  $\beta$  et réciproque, variation de volume instantanées de 3% ; variation linéaires de 1%.

- 573°C : passage de quartz  $\alpha$  à  $\beta$  et réciproquement ; variation de volume de 3% ; variation linéaires de 0,3%.

- au-dessus de 867°C : passage non réversible de quartz  $\beta$  à la tridymite ; variation lentes de volume de plus de 16% ; variation linéaires de plus de 5%.

Hors de ces points critiques, les coefficients de dilatation sont faibles pour les trois espèces.

On tire de là les conclusions suivantes :

- Les brusques variations de température dans l'intervalle compris entre 600 et 1700°C n'amèneront pas de fissuration des produits de silice cuits.

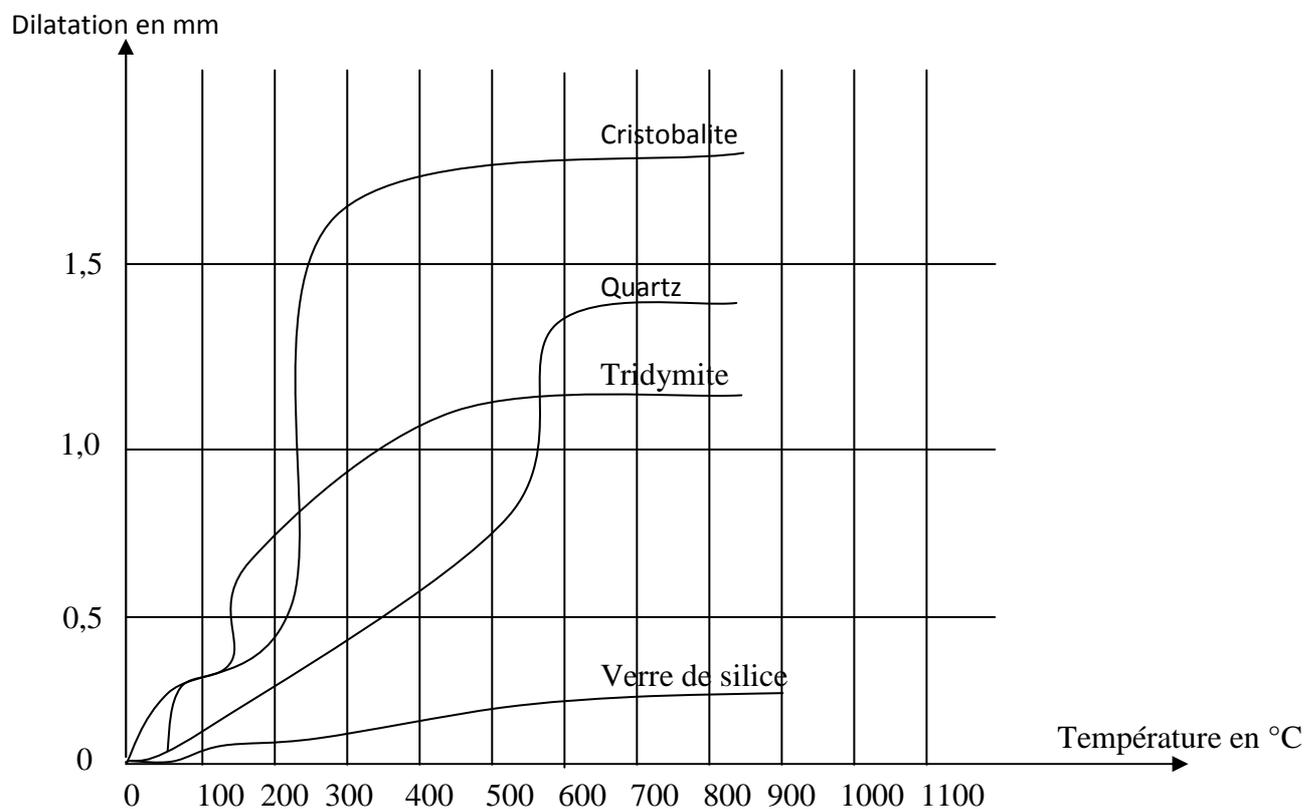
- Au passage des points critiques, entre 0 et 600°C, au contraire, l'échauffement et le refroidissement doivent être très lents pour éviter des fissurations.

- Si des produits contenant du quartz non transformé sont mis en service à plus de 867°C, la transformation en cristobalite ou en trydimite va s'opérer peu à peu, entraînant un gonflement considérable (16% en volume), ceci peut provoquer la dislocation des constructions.

Donc, à l'emploi comme à la cuisson, on doit prendre des précautions au passage d'une forme à l'autre, aussi bien à l'échauffement qu'au refroidissement.

➤ **Effet de la température sur la dilatation des différentes variétés de silice**

La silice a le plus faible coefficient de dilatation de tous les corps connus : allongement de 0,55mm/m pour une variation de température de 20°C à 1000°C. Elle résiste bien aux chocs thermiques, et est de ce fait, supérieure aux autres réfractaires.

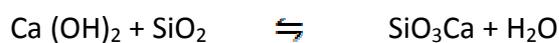


**Figure N°02: Dilatation des différentes variétés de silice en fonction de la température**

*Réalisation de la transformation*

Sous la seule action de la température, les transformations quartz, tridymite, cristobalite sont difficilement réalisables. Le moyen de réalisation consiste à additionner à la matière siliceuse crue, broyée, d'un faible pourcentage de chaux introduite sous forme de lait ou de poudre, qui joue le rôle de catalyseur ou minéralisateur.

La chaux se combine à la silice pour donner, après une série de combinaison complexe, le métasilicate  $\text{SiO}_3\text{Ca}$ , selon la réaction suivante :



A cause du changement de volume important à chaque passage d'une forme à l'autre, le manque de précaution aux températures de passage, entraîne la fissuration des briques.

### II.1.2.2. Propriétés électrique et magnétique [15]

La silice est un bon isolant, même à température élevée, et en atmosphère humide. Le quartz qui est la variété de la silice à l'état naturel, présente le phénomène de la piézoélectrique. Si l'on exprime la lamelle de quartz dans la direction de l'axe binaire on, fait apparaître des charges électriques aux deux extrémités de cet axe. Le phénomène donne lieu à la dilatation ou à la contraction électrique du quartz.

Elle appartient aux minéraux non magnétiques. La susceptibilité de quartz est nulle ( $0.10^{-6}$  C.G.S.). Ce qui fait que la silice est non récupérable sur un séparateur même à haute intensité.

### II.1.2.3. Propriétés mécaniques [15]

- densité: 2,07 à 2,10 pour la silice opaque

2,15 à 2,21 pour la silice transparente (obtenue par fusion du cristal de roche). Cette propriété peut être utilisée lors d'une séparation gravimétrique.

- dureté : la silice raye les métaux (aciers) et les verres.

D'après l'échelle de Mohs, sa dureté est de :

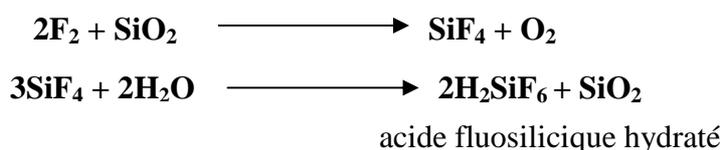
- 4,9 à 6 pour la silice opaque

- 7 pour la silice transparente.

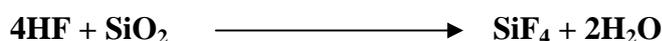
La résistance à la compression est environ de 2500 bars. Cette haute valeur de dureté peut être utilisée lors d'une opération d'abrasion (traitement de surface).

### II.1.2.4. Propriétés chimiques [11], [21]

La silice est un composé très stable qui se volatilise sans décomposition au four électrique. Le fluor est le seul élément qui réagisse à froid avec la silice en libérant l'oxygène ; selon les réactions suivantes :



L'acide fluorhydrique est le seul acide qui attaque la silice, selon la réaction :



(Réaction utilisée dans la gravure sur verre)

L'énergie de liaison de la silice est élevée de 220 cal / mole.

Il est bien établi maintenant que la silice se dissout dans l'eau sous la forme de la molécule  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , acide monosilicique ou orthosilicique, peu dissocié (plus faible que l'acide carbonique), selon la réaction de dépolymérisation:



La silice cristallisée se dissout aussi dans la potasse ou la soude fondue (fusion alcaline) en donnant le silicate de sodium ou de potassium, selon la réaction suivante :



Le cuivre pur et l'argent pur n'attaquent pas la silice, mais le nickel le réduit à 1200°C.

#### ***II.1.2.5. Propriétés physiques [11]***

La silice pure est incolore mais la silice fondue dissout très facilement les oxydes métalliques, c'est pour cette raison que la plupart des silices naturelles se présentent sous forme coloré.

A l'état cristallisé, la silice est assez dure pour rayer le verre. Elle est également employée comme abrasif (en particulier le sable) pour aiguiser ou polir, sous forme de papier de verre (une feuille de papier recouverte d'un côté de sable, ou d'une substance abrasive similaire).

Elle entre en fusion (fusion pâteuse) vers 1700°C et se transforme en liquide visqueux qu'on travaille pour l'obtention des verres.

## **II.2. GENERALITE SUR LA CHROMITE D'ANDRIAMENA**

### **II.2.1. Brève présentation de la société KRAOMA**

#### ***II.2.1.1. Localisation des mines d'exploitation et la cité minière de la société***

La région d'Andriamena est située sur la zone des hauts plateaux centraux de Madagascar. Elle se trouve à 160km à vol d'oiseau au nord d'Antananarivo, dans un vaste plateau très vallonné. Les deux grandes mines exploitées (Ankazotaolana et Bemanevika) par la société KRAOMA se trouvent au sud de la région d'Andriamena.

La cité minière Brieville appartient au district de Tsaratanàna. Pour y arriver à partir de Tana, il faut un trajet en route de terre de 370km (voir figure N°03).

La région est dominée par une série de reliefs plus ou moins élevés. Ces reliefs sont dans la plus part des cas, entaillés par de l'érosion sous forme de lavaka.



Le climat est tempéré, sans variation, brutal de température, doux en hiver, plus chaud en été.

Cette région chromifère est comprise entre la rivière Betsiboka et Mahajamba.

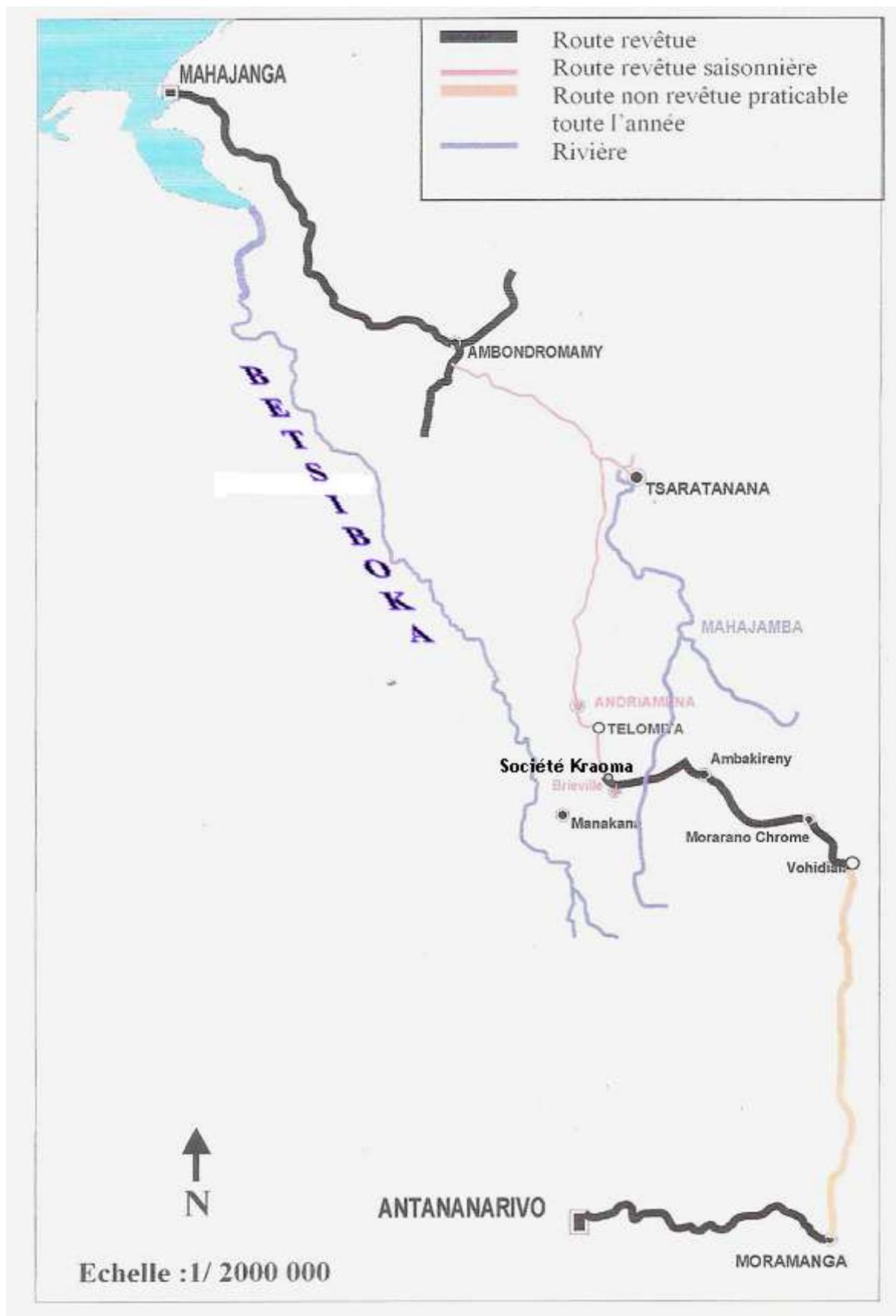


Figure N°03: Carte de localisation

### II.2.1.2. Renseignements généraux

Actuellement, la KRAOMITA MALAGASY ou «KRAOMA» est la première société en termes de chiffre d'affaire et de quantité, qui exploite les minerais de chrome à Madagascar.

**Tableau N°03. Renseignements généraux sur La Kraoma**

Raison sociale	<b>KRAOMITA MALAGASY</b> Société Anonyme
Nombre d'employés	324
Capital souscrit	1 .540 milliards FMG
Adresse	BP. 936 – Antananarivo Rue Andrainarivoravelona Ampefiloha
Téléphone	22 243 04 / 22 346 88
Fax	22 246 34
E – mail	<a href="mailto:Kraoma@www.dts.mg">Kraoma@www.dts.mg</a>
Activité	Opération minière, valorisation et commercialisation des chromites
Permis minier	4 permis d'exploitation et 5 permis de recherche

L'historique est reporté à l'annexe.

### II.2.1.3. Activité principale de la société

Kraoma exploite et extrait le minerai.

*Méthode d'exploitation adoptée :*

- Mine à ciel ouvert par gradin
- Mine en cours de décapage par scraper, bull et chargeur altérée
- Abattage à explosif des roches dures
- Evacuation des produits par camion de 18tonnes pour le minerai et par dumpers de 30tonnes pour le stérile.

Ce minerai est transporté vers l'usine de traitement par camion. Kraoma exporte le produit concentré marchand aux divers pays (par exemple Chine, etc....)

## II.2.2. Caractéristiques minéralogiques et chimiques de la chromite

### II.2.2.1. Caractéristiques minéralogiques

L'étude de lames minces selon la bibliographie met en évidence que la chromite d'Andriamena présente de l'orthose, du quartz, d'oligoclase, ou des gros cristaux de pegmatite avec une inclusion de biotite, de quartz et de petits grains de plagioclase etc....

### II.2.2.2. Caractéristiques chimiques

Le ratio de chromite d'Andriamena est plus riche en chrome, au moins égal à 2 et peut atteindre ou dépasser 3. Il s'agit plutôt d'une chromite type magnésien dont le rapport et compris entre autre

$$R = 0,4 \quad \left\langle \begin{array}{c} \text{MgO} \\ \text{MgO} + \text{FeO} \end{array} \right. \quad \left. \right\rangle 0,5$$

Le tableau N° 04 ci-après représente les normes requises des produits d'Andriamena pour les concentrés et les rocheux.

**Tableau N°04. Normes des produits de la KRAOMA**

COMPOSANT	Concentré	Rocheux
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49% minimum	42% minimum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13-16%	13-16%
FeO	17-18%	13-16%
MgO	12-14%	17-20%
P	0,009% maximum	0,007% maximum
Cr/Fe	2,4/1	2,5/1
SiO <sub>2</sub>	6%	12/14%
H <sub>2</sub> O	6%	1% maximum
Granulométrie	90% entre 40 et 1000μ	70% entre 25 et 150 mm 30% moins de 25 mm

D'après ce tableau N°04, la chromite type concentré présente un pourcentage plus élevé en Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et en FeO que celle de type rocheux. Tandis que la première présente un pourcentage moindre en MgO et en SiO<sub>2</sub>, la seconde avec une teneur en eau plus élevée

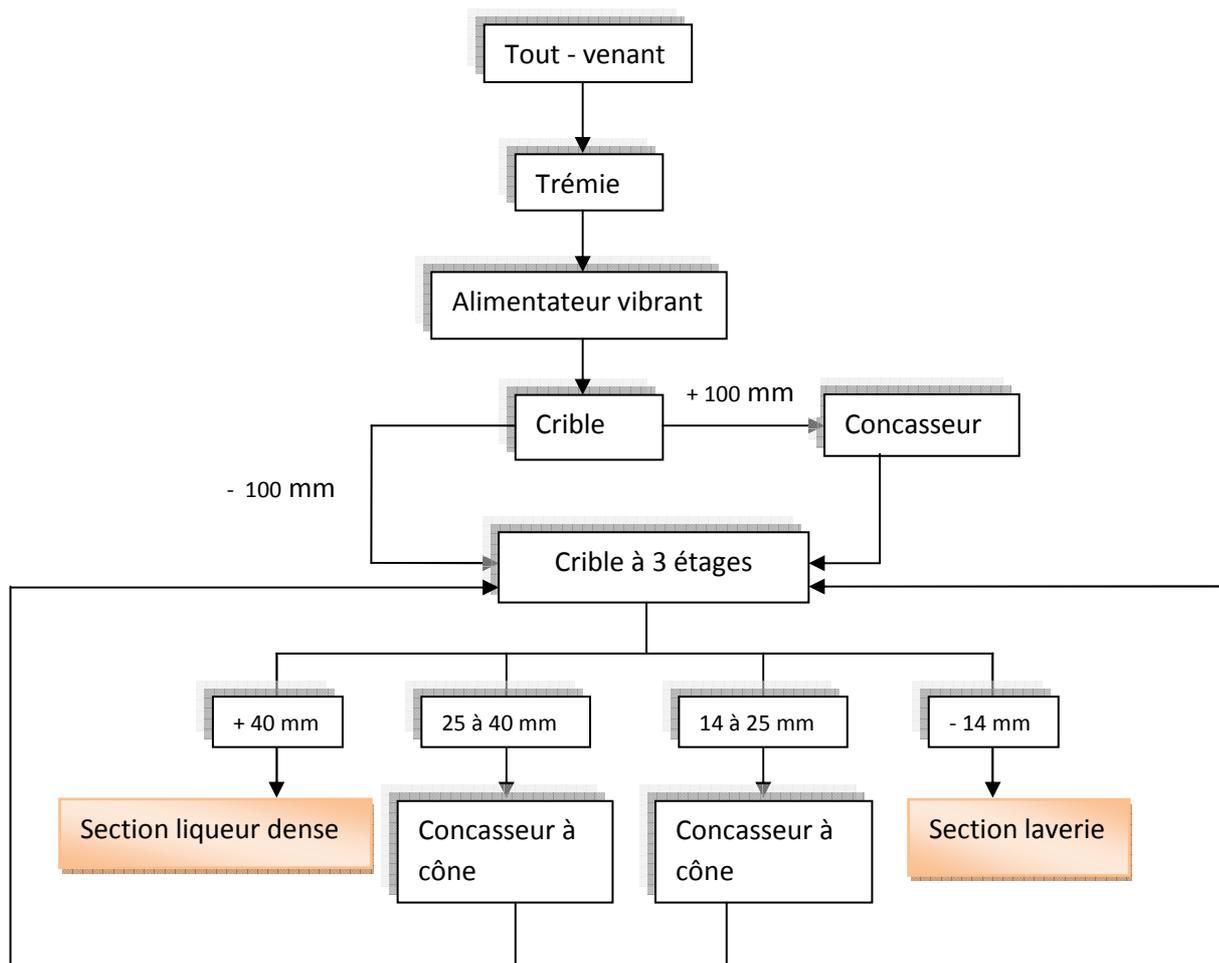
## II.2.3. Traitement des minerais

Kraoma est dotée d'une unité d'enrichissement comprenant 4 modules :

- Un concassage à environ 100 mm
- Une usine de séparation par liqueur dense destiné à produire du rocheux de 40 à 100 mm
- Une usine de séparation gravimétrique appelée laverie pour traiter les moins de 14 mm et produire des concentrés humides
- Une usine de séparation magnétique appelée déphosphoration

### II.2.3.1. Section concassage

Le minerai délivrée par camion est pesé sur un pont bascule et stocké sur une plateforme. Un chargeur reprend ce minerai et alimente la trémie. Le minerai brut est distribué par un alimentateur vibrant sur un crible à maille carrée de 100 mm. Le refus est concassé par un concasseur d'ouverture de 100 mm. Le passant et la décharge du concasseur sont classés à 40 mm, 25 mm et 14 mm par un crible vibrant sur deux concasseurs cône, alimenté respectivement par les fractions 25 à 40 mm et 14 à 25 mm. Le -14 mm envoyé vers le silo laverie et le refus à 40 mm est envoyé vers la trémie.



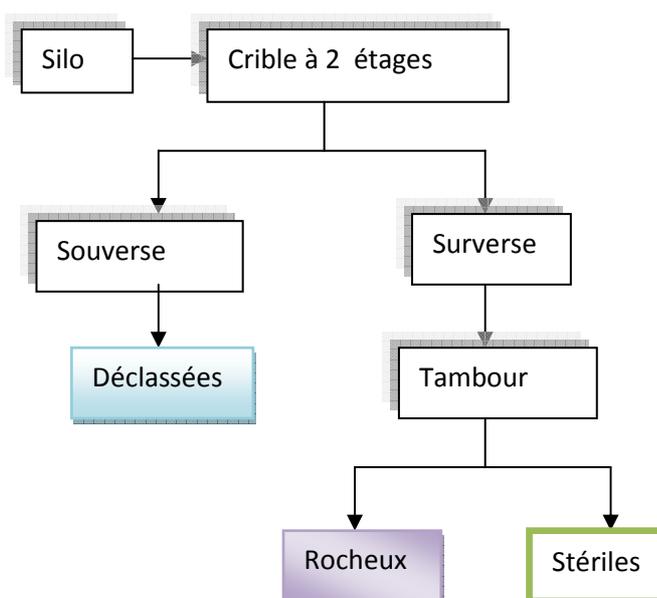
**Figure N°04: Section concassage**

### II.2.3.2. Section liqueur dense

C'est un traitement qui permet d'obtenir des produits sous forme « rocheux ». Le minerai obtenu après le concassage dans le premier étage du crible, ayant un diamètre supérieur à 40 mm, s'accumule dans le silo liqueur. Ce minerai sera transporté au niveau du crible par une bande transporteuse. Ce crible est muni de toile de criblage à mailles différentes : 20 mm, 40 mm.

Le passant du crible constitué par des déclassées et enrichie en chromite. Ces déclassées qui titrent environ 40 à 42%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sont commercialisables.

Le refus du crible alimente un tambour en liqueur dense. On utilise le ferrosilicium comme milieu dense. Les fractions flottantes de densité inférieure à celle de liqueur représente le rejet final de la liqueur dense et les fractions plongeantes (+40mm) contenant la majorité de la chromite de densité supérieure à celle de la liqueur constitue la concentré rocheux titrant environ de 43 à 44%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$



**Figure N°05: Section liqueur dense**

### II.2.3.3. Section laverie

Cette section est alimentée par la fraction -14 mm des minerais concassés. Ces minerais -14 mm stockés en silo sont collectés dans un alimentateur. Ils suivent la bande transporteuse et arrivent dans le crible. Ensuite, le broyeur à boulets les réduit en particule plus fines. Ils vont dans la pompe à pulpe et traversent le crible statique ayant comme maille 2,5 à 3 mm d'ouverture. Ainsi deux cas peuvent se présenter:



- Les minerais qui ont passé ce crible vont être pompés et entrés dans le cyclone
- Ceux qui n'ont pas pu traverser la maille de crible vont être rebroyés.

Les surverses sont le rejet de laverie. Et les souverses sont envoyés vers un répartiteur tournant entre trois hydroclasseurs à huit compartiments des classifications. Ces hydroclasseurs commandent la distribution des produits au niveau des tables à secousses primaires (ou tables 1). Ces dernières sont alignées en trois rangées de six, soit au nombre de 18. Les concentrés des tables sont considérés le concentré direct de l'unité laverie. Les stériles constituent le rejet de la laverie. Les mixtes sont rebroyés dans un broyeur à boulets. La pulpe de ces mixtes rebroyés est déschlamée à 40µm dans le cyclone. Les surverses sont considérées comme le rejet de la laverie et les souverses sont envoyés vers le crible statique. Les surverses de ce crible sont rebroyés dans un broyeur à boulets. Les souverses sont déschlamés dans un cyclone. Les souverses de ce cyclone vont être de nouveau au niveau d'hydroclasseur. Les souverses de l'hydroclasseur passent au niveau de tables de mixtes. Les produits mixtes vont être broyés par le broyeur de retraitement. Le concentré entre au niveau de spiral. Le mixte du spiral représente un co-produit commercialisable car on a abandonné l'unité déphosphoration à cause de la consommation en gas-oil très élevée lors du séchage du concentré. Le rejet est considéré comme le rejet de laverie. Le produit marchand de la laverie est constitué par le concentré produit par les spirales et le concentré direct des tables primaires. Les spécifications recherchées de la laverie sont :

- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  : environ 49%
- Cr / Fe : environ 2,56%





### **II.2.3.4 Section déphosphoration**

C'est une unité qui permet d'épurer les concentrés phosphorés. Elle comprend un four de séchage et des séparateurs magnétiques bas et hautes intensités.

Depuis l'année 2002, cette usine de déphosphoration n'est plus utilisée du fait de la dépense en carburant trop élevé pour le séchage. Or, il s'avère que la teneur en phosphore dans 4 premières tables primaires reste dans les normes de la commercialisation ; ne pas déphosphorer ces concentrés, qui représentent 75% de la production, reviendrait à réduire d'autant la consommation de gas-oil. Si la déphosphoration est nécessaire ultérieurement selon l'exigence du marché, la Kraoma doit trouver des nouvelles méthodes de déphosphoration performante plus économique.

### **II.2.4. Analyse chimique**

Le laboratoire effectue une analyse journalière de la production. Les échantillons à tester sont broyés à 80 $\mu$  dans un vibrobroyeur à anneaux pendant environ une minute au laboratoire pilote. Les dosages de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, P et SiO<sub>2</sub> ont été effectués selon les procédures habituelles du laboratoire de la Kraoma.

A la fin de la journée, les résultats sont publiés aux responsables concernés pour analyse et vérification des machines.

### **Conclusion**

La chromite a une composition assez variable, sa composition type Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO étant modifiée par substitution de Al à Cr et de Mg et Ca à Fe ; la gangue est généralement quartzeuse. Ainsi, pour connaître les véritables compositions, il faut recourir à une analyse chimique. Kraoma produit deux sortes de produits marchands selon la granulométrie : le concentré global de la laverie et le rocheux de l'unité liqueur dense.