



mémento roches et minéraux industriels

le mica

février 1990
R 30 370



Ministère de l'Industrie
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre
des actions de Service public



mémento roches et minéraux industriels

le mica

J.-F. Pasquet

février 1990
R 30 370



Ministère de l'Industrie
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre
des actions de Service public

BRGM
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Carte géologique
et Géologie générale
Service Roches et Minéraux Industriels
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2
Tél. : 38.64.34.34

TABLE DES MATIERES

	Pages
1 - GENERALITES	1
2 - DONNEES ECONOMIQUES	1
2.1 Le marché français	1
2.2 Marché mondial	2
2.3 Prix	4
3 - GEOLOGIE DES MICAS	4
3.1 Minéralogie	4
3.2 Propriétés respectives de la muscovite et de la phlogopite	5
3.2.1 Composition chimique	5
3.2.2 Réactivité chimique	7
3.2.3 Couleur	7
3.2.4 Densité	7
3.2.5 Dureté	7
3.3 Gîtologie des micas	8
3.3.1 Gîtologie de la muscovite	8
3.3.1.1 Roches grenues	8
3.3.1.2 Roches métamorphiques	9
3.3.1.3 Pegmatites granitiques	9
3.3.2 Gîtologie de la phlogopite	12
3.3.2.1 Les carbonatites	12
3.3.2.2 Les filons	17
3.3.2.3 Les pegmatoïdes	17
4 - SECTEURS D'UTILISATION	19
4.1 Utilisation des micas en feuilles	19
4.1.1 Usages en électronique	19
4.1.2 Usages pour l'industrie électrique	19
4.1.3 Utilisations dans l'industrie thermique	19
4.1.4 Usages particuliers	20
4.1.5 Le mica reconstitué	20
4.2 Le mica broyé	20
4.2.1 Utilisation du mica broyé à sec	20
4.2.2 Utilisation du mica broyé par voie humide	21
4.2.3 Utilisation du mica micronisé	22

	Pages
5 - CRITERES DE SELECTION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES	23
5.1 Caractéristiques des gisements exploités	23
5.1.1 Mica fin	23
5.1.2 Mica en feuilles	23
5.2 Spécifications industrielles des micas commercialisés	25
5.2.1 Mica broyé	25
5.2.2 Mica en feuilles	25
5.2.2.1 Mica phlogopite	25
5.2.2.2 Muscovite	28
6 - EXTRACTION ET MODE DE TRAITEMENT DES MICAS	29
6.1 Micas en poudre	29
6.1.1 Extraction	29
6.1.2 Schéma général du traitement	29
6.1.3 Flottation sélective	30
6.1.4 Broyage	30
6.1.4.1 Broyage à sec	30
6.1.4.2 Broyage par voie humide	30
6.1.4.3 Micronisation	33
6.1.4.4 Traitement chimique	33
6.2 Micas en feuilles	33
6.2.1 Extraction	33
6.2.2 Valorisation des micas bruts	33
6.2.3 Valorisation des déchets	34
7 - PRODUITS DE SUBSTITUTION DU MICA	34
7.1 Substitution du mica pulvérisé	34
7.2 Substitution du mica en plaque	34
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	35

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : USA - Consommation apparente de mica en feuilles et prix
- Figure 2 : Structure atomique de la muscovite
- Figure 3 : Coupe schématique d'un granite kaolinisé
- Figure 4 : Gisement de kaolin - sillimanite - mica de Williamtown (Australie)
- Figure 5 : Les trois principales zones pegmatitiques productrices de micas en feuilles en Inde
- Figure 6 : Carte des principales zones de production de Minas Gerais (Brésil)
- Figure 7 : Vue en plan et coupe de la pegmatite de Sapucaia - Minas Gerais - (Brésil)
- Figure 8 : Vue en plan d'un complexe alcalin à carbonatite idéal
- Figure 9 : Localisation des gisements de mica - phlogopite de Madagascar
- Figure 10 : Coupe du gisement de phlogopite de Vohitramboa (Madagascar)
- Figure 11 : Flowsheet de l'unité de valorisation de phlogopite de Kemira (Finlande)
- Figure 12 : Flowsheet de l'unité de valorisation de muscovite de Kaolins d'Arvor, France (document SKA)

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Statistiques des importations et exportations de mica en France en 1987
- Tableau 2 : Principales mines de mica en feuilles du Brésil
- Tableau 3 : Granulométrie des micas broyés en fonction des utilisations
- Tableau 4 : Caractéristiques des poudres de mica pour l'industrie des peintures (NF T 31-109)
- Tableau 5 : Classement du mica en feuilles selon la surface utilisable
- Tableau 6 : Classification du mica muscovite en blocs et en feuilles basée sur ses propriétés visuelles

1 - GENERALITES

Sous l'appellation collective de mica sont regroupés différents minéraux et des produits variés de valeurs très inégales. Les micas (essentiellement muscovite et phlogopite pour le minéralogiste) sont commercialisés sous différentes formes :

- le mica en feuilles, qui était indispensable pour les isolations électriques, est encore utilisé dans les industries électrique, thermique et électronique
- le mica en "splittings" ou en "scraps" ; les splittings sont des petites feuilles de mica de bonne qualité. Leur petite taille ne permet pas de les utiliser en l'état : elles sont agglomérées à l'aide de résine époxy et vendues sous le nom de MICANIT comme substitut des feuilles naturelles, beaucoup plus chères.

Les déchets provenant de la fabrication des feuilles et des splittings sont appelés "scraps". Ces scraps sont plus facilement clivables et délaminaibles que les micas en paillettes.

- le mica en paillettes ou "flakes" provient à l'origine soit de sous-produits de l'exploitation d'autres substances (kaolin par exemple), soit de roches contenant de fortes proportions de mica justifiant à elles seules l'exploitation.
- le mica synthétique présente l'avantage de fournir des feuilles de qualité homogène, pour un coût moindre à niveau égal.

Les "scraps" et les "flakes" peuvent être utilisés en l'état, mais sont le plus souvent pulvérisés, soit à sec ("dry-ground"), soit par voie humide ("wet ground", plus mince), soit micronisés.

Ce mica en poudre entre dans la composition de nombreux produits industriels (plaques de plâtre, peintures, plastiques, électrodes de soudure, boues de forage, ciment pour jointoyer ...)

Il peut également être reconstitué en papier de mica, lui-même imprégné de résines époxy ou de silicones et substitué aux micas en feuilles (brevet français : SAMICANITE).

2 - DONNEES ECONOMIQUES

2.1. Le marché français

La France est un important producteur de mica brut en paillettes, comme "by-product" des kaolins bretons (Société Nouvelle d'Exploitation des Kaolins du Morbihan, Société des Kaolins d'Arvor et Société des Kaolins du Finistère). La Société Nouvelle d'Exploitation des Kaolins du Morbihan a créé avec le Comptoir des Minéraux et Matières premières la Société MICAREC, qui traite 10 à 12 000 t/an de mica d'appellation commerciale "MICA-MU".

La production totale de la Bretagne est d'environ 15 000 t/an.

Le Maroc, l'Inde, la Chine, l'Amérique du Sud sont les principaux fournisseurs de l'unité de broyage par voie humide de la SCIAMA, à Dunkerque (environ 2 000 t/an).

L'Inde et Madagascar fournissent la Société METAFIX dans la Somme, en micas en feuilles, qu'elle découpe en lames manufacturées.

Le tableau 1 présente les statistiques françaises d'importation et d'exportation en 1987. On constate que la consommation apparente de mica en poudre et de déchets de micas (import. + production - export) est d'environ 12 500 t/an. En effet, la France importe 4 600 t de mica en poudre et de déchets de mica à environ 2 000 F/t et en exporte 6 800 t à 2 500 F/t.

La France ne produit pas de mica naturel en feuilles. Elle en importe 267 t à 7 340 F/t et en exporte 179 t à 8 640 F/t.

2.2 - Marché Mondial

La production mondiale de mica, toutes qualités confondues, est de 297 000 t (1987 ; source : Minerals Year book). Ce total ne comprend pas les productions de la Chine, de la Norvège, du Pakistan, de la Roumanie et de la Suède, qui ne sont pas disponibles.

La production mondiale de mica en feuilles (blocs, films, disques, feuilles et "splittings") est de 8 400 t/an provenant essentiellement d'Inde, de Madagascar et du Brésil ; selon certaines estimations, la Chine pourrait également en produire 800 t.

Les autres qualités de micas (déchets, micas broyés, "flakes" et "scraps") proviennent essentiellement des Etats-Unis (146 000 t), de l'U.R.S.S. (50 000 t) et de Corée (40 000 t de séricite).

Au niveau mondial, on constate une faible mais constante augmentation des consommations de mica broyé, une diminution de la consommation de mica en feuille, ainsi qu'une augmentation constante des prix (fig. 1). Ces tendances générales cachent des fluctuations locales très rapides.

Figure 1 : U.S.A. - Consommation apparente de mica en feuilles et prix (IM., Fev. 1985)

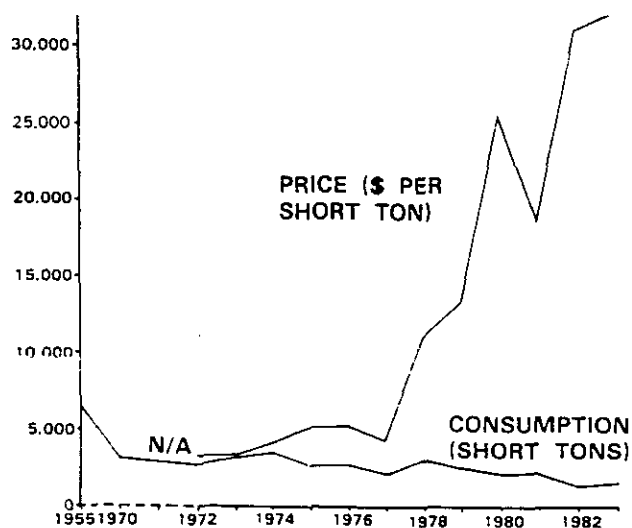


TABLEAU 1 - Statistiques des importations et exportations de mica en France en 1987

IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS DE MICA EN FRANCE EN 1987					
Numéros nomenclature produits pays	IMPORTATIONS		EXPORTATIONS		
	Quantités (tonne)	Valeurs (.000 F)	Quantités	Valeurs	
25 26 MICA ET DECHETS DE MICA					
25 26 20 0 Mica brut ou clivé, en feuille ou en lamelles					
062 Tchécoslovaquie			10	501	
370 Madagas.	7	558			
400 USA			8	437	
664 Inde	112	989			
Divers	148	414	161	608	
TOTAL	267	1961	179	1546	
CEE	126	307	96	447	
ZF		17	5	27	
HZF	266	1944	175	1519	
25 26 30 0 Poudre de mica					
002 UEBL			428	1717	
004 RFA			2209	7283	
005 Italie			346	969	
006 Roy.Un.			240	658	
011 Espagne			435	1154	
036 Suisse			248	705	
404 Canada	282	542			
664 Inde	186	407			
Divers	406	1203	587	1969	
TOTAL	876	2152	4492	14455	
CEE	126	401	3741	12088	
ZF	24	45	73	284	
HZF	852	2107	4419	14171	
25 26 50 0 Déchets de mica					
006 Roy.Uni			2263	2209	
204 Maroc	1492	2840			
664 Inde	2213	5005			
462 Martinique			40	669	
Divers	17	68	61	252	
TOTAL	3722	7913	2363	3130	
CEE			2304	2251	
ZF	17	68	59	879	
HZF	3705	7845	2304	2251	
TOTAL 25 26	4864	12026	7035	19131	
CEE	252	708	6141	14786	
ZF	41	130	137	1190	
HZF	4823	11896	6998	17941	

2.3 - Prix

Les prix des différentes qualités de mica sont extrêmement variés :

Mica en feuille

Le prix des micas en feuilles est lié à la qualité de celui-ci (pureté, couleur claire plus recherchée, muscovite plus chère que phlogopite, absence de défauts, de craquelures, flexibilité, caractéristiques thermiques et électriques ...) et surtout à la taille des feuilles. Le prix moyen des micas en film aux Etats-Unis est de \$ 13,66 par livre (environ 40 000 F/t).

Les meilleures qualités de muscovite rouge clair ("ruby") se négocient à des prix de plus de 3 400 F/kg et les moins bonnes à 4,50 F/kg. Le mica vert se négocie environ 25 % moins cher que le mica rouge (source : Industrial Minerals, Fév. 1988).

Les feuilles de mica reconstituées (SAMICANITE) coutent 60 à 160 F/kg en France.

Mica en poudre

En Europe, le prix des micas pulvérisés varie très largement selon les provenances et les traitements appliqués ; on peut retenir les prix approximatifs suivants :

- mica brut : 1 000 F/t
- mica broyé à sec : 1 500 à 3 000 F/t
- mica broyé par voie humide : 6 000 F/t et jusqu'à 15 000 F/t dans l'industrie des cosmétiques.
- mica micronisé : jusqu'à 3 000 F/t.

Les pigments nacrés, fabriqués à partir de micas broyés par voie humide et recouverts de couches d'oxydes de titane et parfois de fer (brevet de la société allemande MERCK) atteignent des prix encore supérieurs (100 F/kg).

3 - GEOLOGIE DES MICAS

3.1. Minéralogie

Les micas sont des phyllosilicates constitués par des empilements de feuillets formés par deux couches de formule $[(\text{Si}, \text{Al})_2 \text{O}_5]_n$ légèrement décalées l'une par rapport à l'autre. Dans chaque couche, les sommets libres des tétraèdres sont tournés vers l'intérieur, ces atomes d'oxygène formant les ions OH^- des octaèdres de coordination occupés par des atomes bivalents ou trivalents. On a donc deux couches tétraédriques enserrant une couche octaédrique.

Les micas de formule générale $\text{X}_2\text{Y}_6^{2+} (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_4$ sont appelés trioctaédriques, tous les octaèdres étant occupés par des

ions Fe^{2+} ou Mg^{2+} principalement (site "Y"). Par contre, ceux de formule $\text{X}_2\text{Y}_4^{3+}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ ont seulement deux octaèdres sur trois occupés par un ion trivalent, généralement de l'aluminium, et sont nommés dioctaédriques.

La liaison entre les feuillets est assurée par des ions "X" beaucoup plus volumineux, Na, Ca ou K. Tous les micas proprement dit sont caractérisés par un clivage parfait donnant des lames flexibles et élastiques (P. Bariand et Al., in Les Minéraux) (cf. fig. 2).

A l'extrémité des lamelles, il existe de nombreuses liaisons hydroxyles (OH^-) disponibles sur lesquelles il est possible de greffer des molécules organiques, ce qui donne aux micas des propriétés particulières :

- flottation possible en greffant des amides ;
- utilisé comme charge minérale, dans un plastique par exemple, le mica développe des liaisons moléculaires avec le matériau. Le kaolin calciné et la wollastonite ont également cette propriété, contrairement au talc et aux carbonates. Ainsi, la présence de mica dans le composite améliore la résistance à la traction, l'ajout de talc ou de carbonate améliorant plutôt la résistance aux chocs.

On distingue :

- les micas blancs, alumineux (muscovite, phengite, paragonite, fuschite, ...)
- les micas ambrés ferro-magnésiens (phlogopite, biotite, lépidomélane, ...)
- les micas lithinifères, plus rares (lépidolite, ...)

La muscovite et la phlogopite représentent approximativement 90 % de la production totale.

3.2 - Propriétés respectives de la muscovite et de la phlogopite

3.2.1 Composition chimique

Les formules chimiques théoriques sont les suivantes :

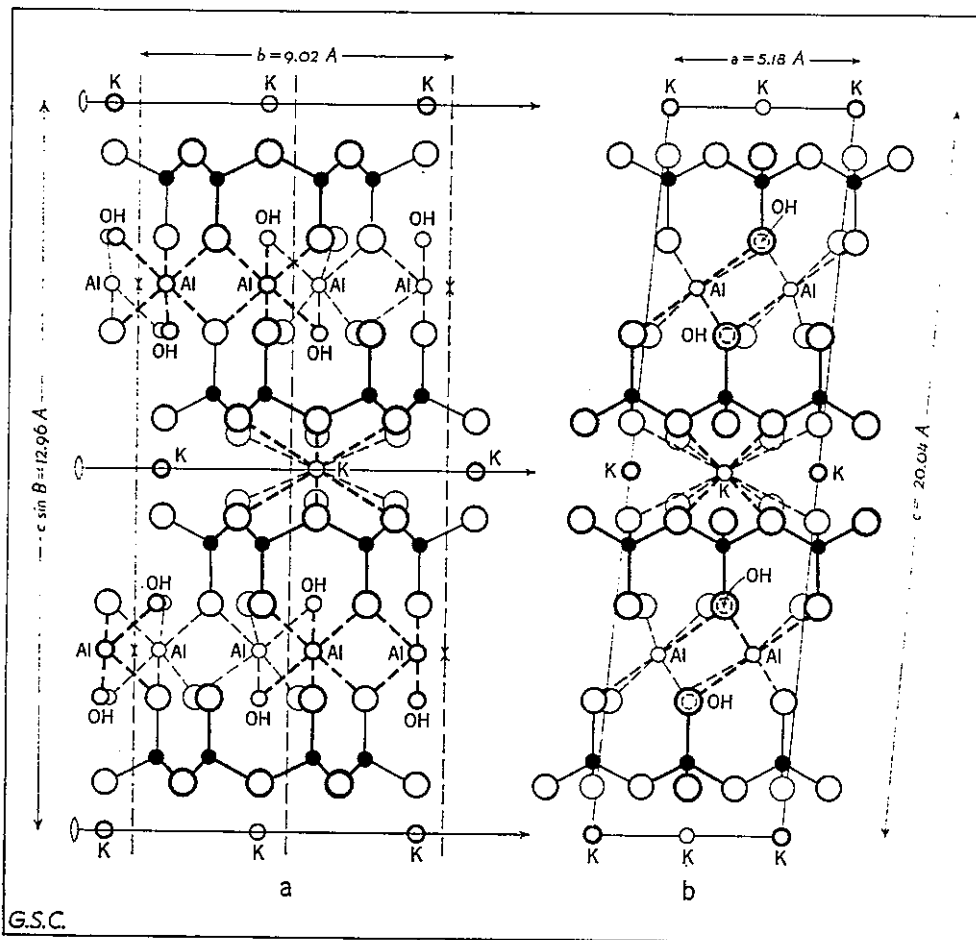
Muscovite : $\text{K}_2 \text{Al}_4 (\text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{20}) (\text{OH})_4$

Phlogopite : $\text{K}_2 (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_6 (\text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{20}) (\text{OH})_4$

Biotite : $\text{K}_2 (\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_6 (\text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{20}) (\text{OH})_4$

Figure 2 : a) Structure atomique de la muscovite projetée sur un plan normal à l'axe a

b) Structure atomique de la muscovite projetée sur le plan (010)



La phlogopite constitue le pôle magnésien d'une série continue avec la biotite ; elle a, par définition un rapport Mg/Fe supérieur à 2.

Les compositions chimiques théoriques sont les suivantes :

	Muscovite (%)	Phlogopite (%)
Si O ₂	45,2	43,2
Al ₂ O ₃	38,5	12,2
K ₂ O	11,8	11,3
Mg O, Fe O		29,0
H ₂ O	4,5	4,3

Les compositions réelles sont très variables d'un gisement à l'autre, ainsi qu'à l'intérieur d'un même gisement.

3.2.2 Réactivité chimique

Les micas sont chimiquement très stables ; la muscovite est pratiquement inaltérable par les agents météoriques (eaux agressives), contrairement à la phlogopite.

En laboratoire, et dans les conditions d'utilisation industrielles, on retrouve cette différence : si des caractéristiques de stabilité chimique sont requises, la muscovite sera donc préférée.

3.2.3 Couleur

La couleur des micas est déterminée par leur composition chimique, et en particulier par leur teneur en aluminium (Ruby micas : 34,8 % Al₂ O₃, muscovite verte : 29,1 %, phlogopite du Canada : 17 %, de Madagascar : 12 - 27 %, d'U.R.S.S. : 13 - 19 %, - J. JOO, 1971). Les micas clairs sont plus recherchés que les variétés fortement colorées.

Le terme muscovite viendrait du latin "vitrum muscoviticum" ou verre de Moscou, ville par laquelle transitait de larges feuilles de ce minéral. Le terme phlogopite viendrait du grec "phlogopos" - couleur de feu.

3.2.4 Densité

Elle est généralement comprise entre 2,76 et 3,0 pour la muscovite ; elle varie de 2,7 à 2,9 pour la phlogopite.

3.2.5 Dureté

La dureté de la muscovite est 2,5 dans l'échelle de Mohs et varie de 2 à 3 pour la phlogopite.

On constate toutefois que la dureté des lamelles de mica est sensiblement plus élevée sur la tranche que sur les faces.

3.3 Gîtologie des micas

Les micas sont des minéraux très répandus dans la nature. Ils sont un des composants principaux des granites (avec le quartz et les feldspaths) ainsi que de nombreuses roches ignées. On les trouve également en proportions importantes dans certaines roches métamorphiques très répandues (micaschistes, gneiss, marbres ...).

Leur faible dureté et, pour les variétés peu alumineuses, leur altérabilité, ne permettent que rarement la formation d'accumulations sédimentaires d'intérêt économique, sauf sous des formes microcristallines et hydratées (hydro-muscovite ou séricite) ou argileuses (illites).

3.3.1 Gîtologie de la muscovite

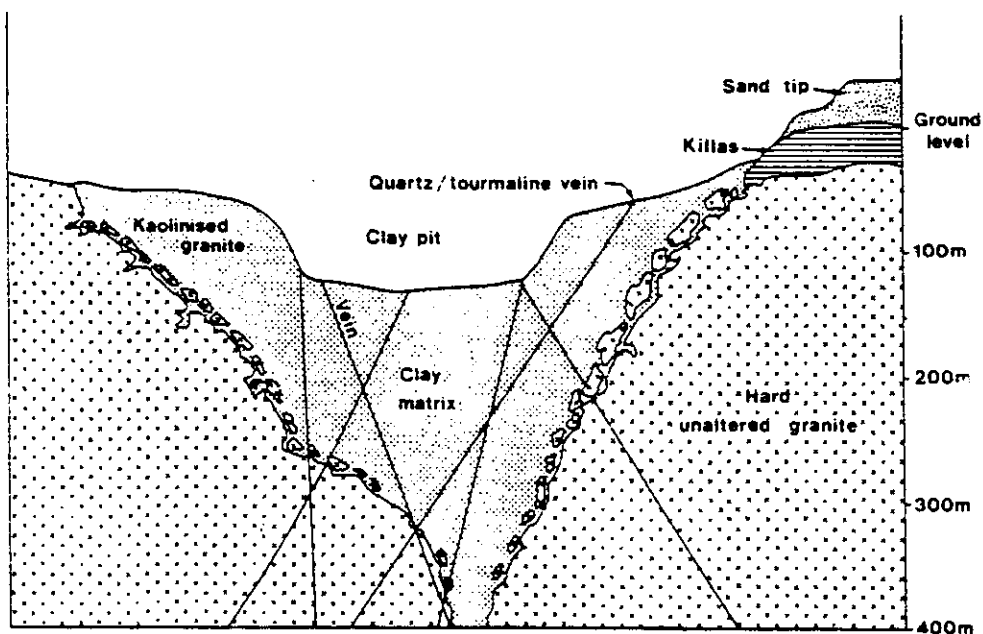
3.3.1.1 Roches grenues

La muscovite est un élément caractéristique des roches acides et hyper acides : granite à deux micas et leucogranites. Dans ces roches, elle peut être de cristallisation primaire, ou bien se former aux dépens de la biotite par perte du fer ou aux dépens des feldspaths (greisenisation).

Dans ces roches, l'exploitation du mica n'est économiquement viable que si elle est associée à celle d'un autre minéral. Il s'agit parfois de feldspaths, mais plus généralement de kaolinite : les granites kaolinisés sont en effet déconsolidés et l'exploitation des micas est grandement facilitée.

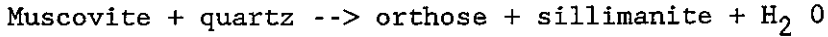
Les principales données sur la gîtologie des granites kaolinisés figurent dans le memento "Kaolin". Les gisements des producteurs français de mica sont de ce type (voir coupe schématique, fig. 3).

Figure 3 : Coupe schématique d'un granite kaolinisé



3.3.1.2 Roches métamorphiques

Les variétés cryptocristallines (séricite) sont caractéristiques d'un faible degré de métamorphisme (faciès "schistes verts") ; la muscovite proprement dite est un élément des micaschistes et des gneiss à deux micas. Elle disparaît dans la catazone par suite de la réaction :



On n'observe qu'exceptionnellement des accumulations monominérales de muscovite dans lesquelles la production de mica justifie à elle seule l'exploitation (séricite de Corée).

Le mica est généralement exploité comme "by-product" d'un autre minéral, comme dans le cas du gisement de kaolin - sillimanite - mica de Williamstown en Australie (fig. 4) : la roche mère en forme de "pipe", est constituée de sillimanite, de disthène, de rutile et de quartz ; on lui attribue un âge d'environ 1,5 milliard d'années. Une activité hydrothermale, probablement associée à des venues pegmatitiques, a transformé la sillimanite en kaolin et le disthène en muscovite. En 1983, cette mine a produit 7 000 t de kaolin, 600 t de sillimanite et 3 000 t de muscovite.

3.3.1.3 Pegmatites granitiques

C'est dans ces roches que les cristaux de muscovite atteignent des tailles considérables, en particulier dans les pegmatites potassiques où ils sont associés à de la biotite.

On considère que les pegmatites minéralisées en muscovite se sont formées à grande profondeur (zone de métamorphisme à dysthène - almandin du faciès amphibolite).

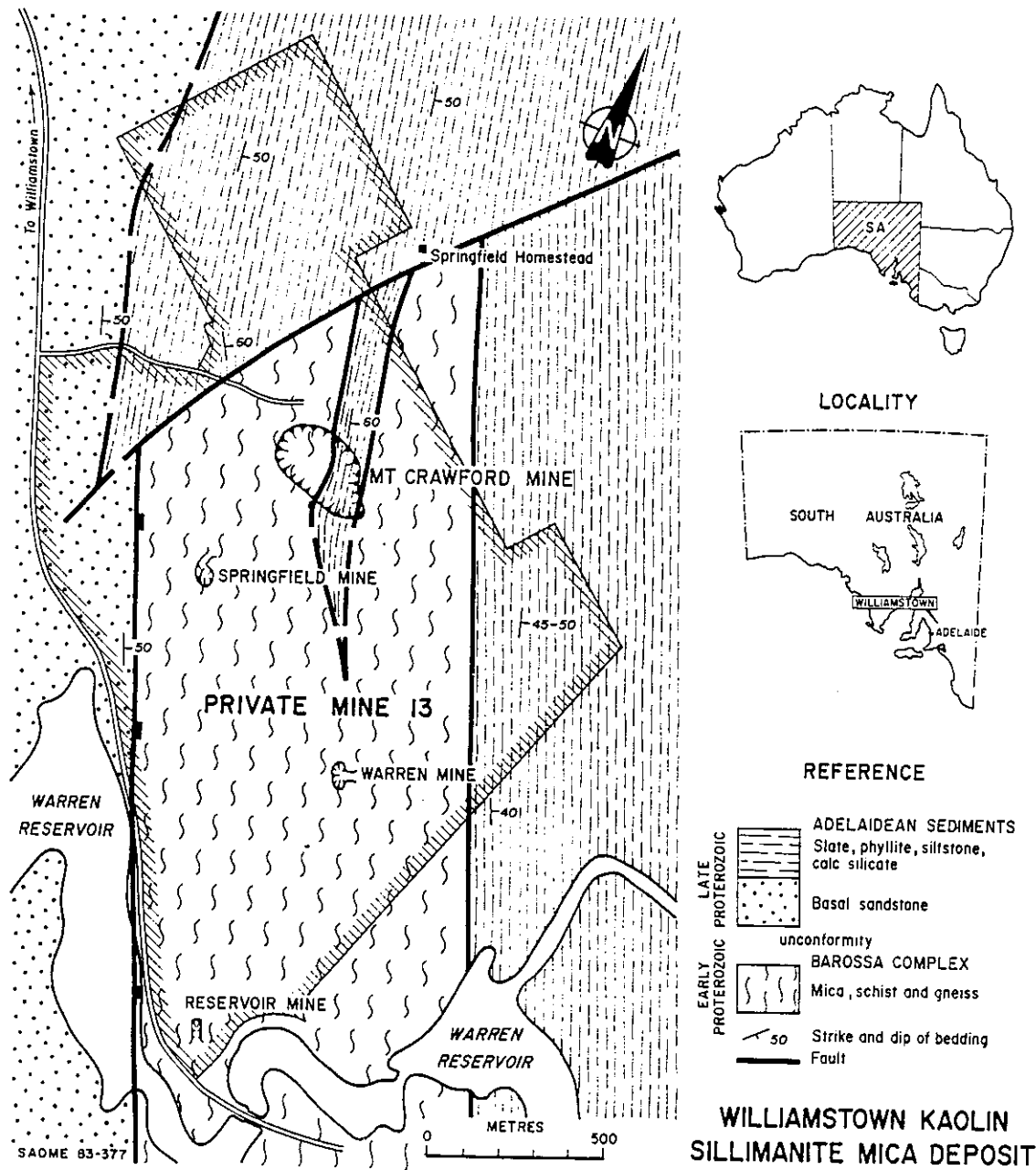
Dans le cas de pegmatites zonées, les meilleures muscovites industrielles ne se trouvent pas dans la bordure ni dans la zone centrale (à dominante feldspathique et quartzeuse), mais dans les faciès intermédiaires et plus précisément à la périphérie de la zone quartzreuse centrale.

Les micas sont exceptionnellement rassemblés en amas ("mica shoots") métriques à plurimétriques, très recherchés (voir fig. 7 du paragraphe sur le Brésil).

Inde (fig. 5)

L'état de Bihar (NW de Calcutta) a été le seul centre important de production de mica pendant de nombreuses années. Les gisements sont situés dans une bande d'environ 145 km de long et 25 km de large. La principale zone est située dans le district de Hazaribagh (80 % de la production indienne) ; les districts de Gaya et de Monghyr sont également producteurs. Les gisements exploités sont situés en bordure du plateau de Chota Nagur, très disséqué par l'érosion qui a mis à jour de très nombreux filons de pegmatite micacée, d'épaisseur très variable (10 cm à 30 m). Les roches encaissantes sont des schistes et des gneiss d'âge archéen. La plupart des gisements sont de forme lenticulaire mais certains sont cylindriques. Les pegmatites sont de deux types, zonées ou

Figure 4 : Gisement de kaolin - sillimanite - mica de Williamstown
(Australie) - I.M., Dec. 1985



non. Dans certains cas, l'exploitation, conduite de manière artisanale, a atteint 130 m de profondeur. Les réserves sont probablement considérables, et seulement liées à la profondeur jusqu'à laquelle leur exploitation est rentable.

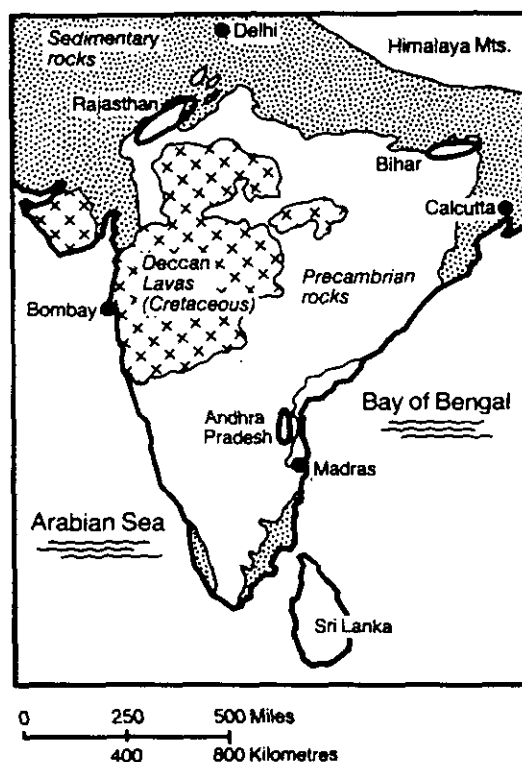
Dans l'état du Ragasthan (NW de l'Inde), les gisements sont situés dans une bande de 320 km de long et 100 km de large, depuis Jaipur au Nord jusqu'à Udaipur au SW. Les micas du Rajasthan sont de taille supérieure à celle du Bihar, mais sont moins plats.

Dans l'état de Madras, district de Nellore, les pegmatites se répartissent dans une superficie de 100 km x 15 km ; cette région produit surtout des micas tachés et des micas "verts" (18 % de la production indienne).

Les réserves indiennes théoriques sont estimées à environ 20 millions de tonnes de micas de grande taille. Toutefois les exploitants rencontrent de grosses difficultés :

- malgré l'exploitation sélective des filons de pegmatite, seulement 1 % de la production est valorisable en feuilles.
- les meilleures micas se trouvent en-dessous de la zone d'altération (problème des oxydes de Fer), souvent épaisse d'une vingtaine de mètres.
- des problèmes d'exhaure ne posent fréquemment.
- ce travail artisanal requiert une main d'oeuvre importante : l'équilibre financier des entreprises est donc très sensible aux fluctuations des salaires.

Figure 5 : Les trois principales zones pegmatitiques productrices de micas en feuilles en Inde (I.M., Août 1983)



Brésil

L'essentiel de la production provient du Sud et de l'Est de l'état de Minas Gerais (voir fig. 6 et tableau 2).

On peut dater ces pegmatites micacées de la fin du Protérozoïque ou du début du Paléozoïque. Les filons de quartz, fréquemment associés aux pegmatites, semblent postérieurs (Silurien ?). L'exploitation de ces pegmatites fournit de la muscovite, mais également du kaolin, du feldspath, du béryl, de la tantalite et de la colombite ; des minéraux de lithium sont également présents ainsi que des pierres fines : des béryls bleu-vert, jaunes et roses, des spodumènes roses ou verts, des tourmalines, des topazes et des chrysobéryls.

La figure 7 montre un exemple de gisement exploité au Brésil ; on remarque la zonation de la pegmatite et la présence d'un "mica-shoot" et d'un "beryl-shoot", seules parties économiquement exploitables.

3.3.2 Géologie de la phlogopite

Les phlogopites commercialisées sont de deux types :

- les phlogopites de petite taille ("flakes") proviennent de carbonatites et de certaines roches métamorphiques
- les cristaux de grande taille sont découverts dans :
 - . des filons et dans les zones de contact gneiss - cipolins
 - . dans des pegmatoïdes (pyroxénites issues de la transformation de marnes dans un métamorphisme haute pression - haute température)

3.3.2.1 Les carbonatites

La phlogopite est un constituant assez commun des roches ultrabasiques des complexes alcalins et des carbonatites. Le gisement de Palabora (R.S.A.) en est un bon exemple.

La figure 8 présente une coupe horizontale schématique d'une carbonatite typique. La phlogopite est exploitée dans la carbonatite elle-même. A Palabora, on observe la transformation de la phlogotite en vermiculite ("hydro-phlogopite") par départ de la potasse, jusqu'à 50 m de profondeur. Après une zone de transition où vermiculite et phlogopite cohabitent, la phlogopite reste le seul mica présent, jusqu'à grande profondeur. Le gisement de Kemira en Finlande est de ce type : il s'agit d'un corps de carbonatite plat, vertical, long de 15 km en N.S. et large de 100 à 160 m. Le tout-venant contient 65 % de phlogopite, 10 % d'apatite et 19 % de carbonates.

Figure 6 : Carte des principales zones de production des Minas Gerais
(Brésil) (Pecora W.T., 1950)

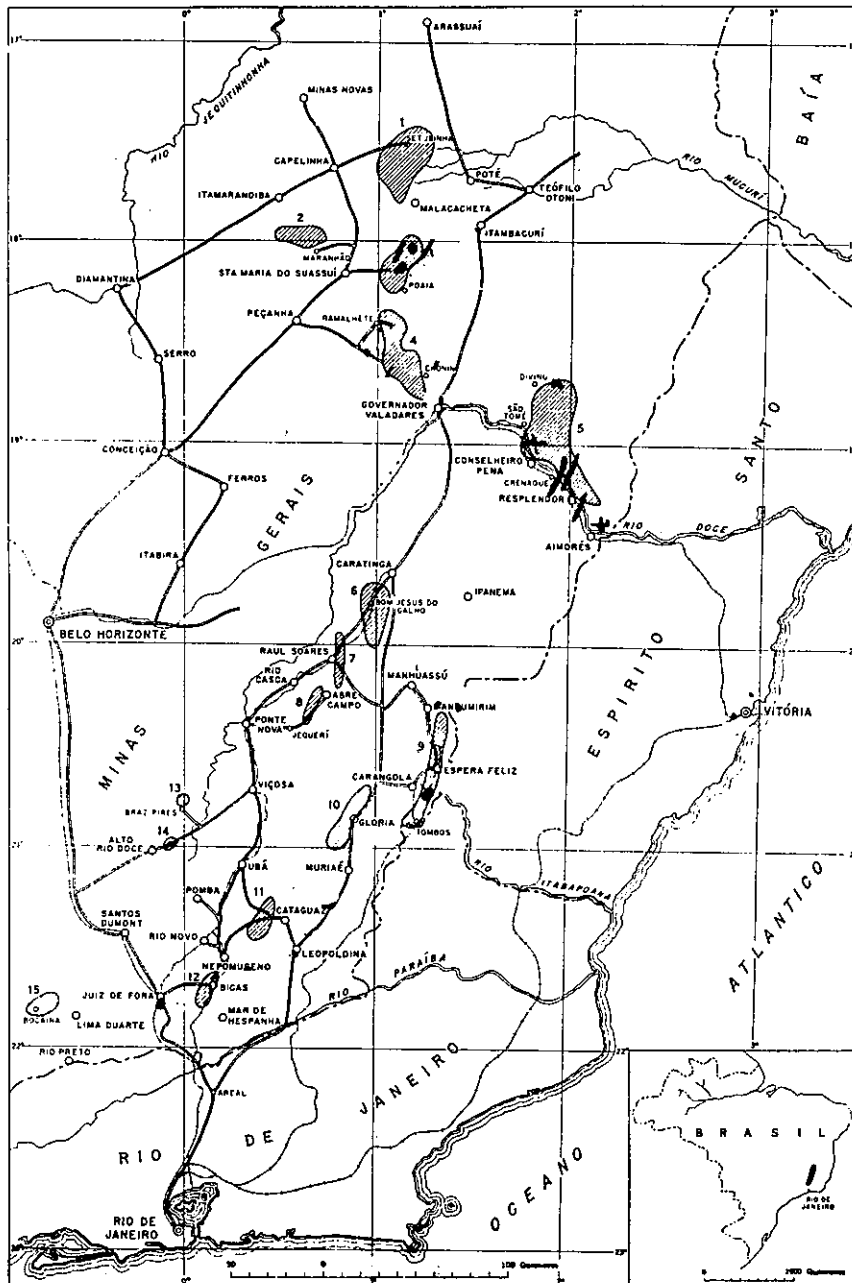


Tableau 2 : Principales mines de micas en feuilles du Brésil
(Pecora W.T., 1950)

Area No. indicated on map	Name of area, with municipios included	Percent of total Minas Gerais production	Number of producing properties	Principal mines
1.....	Setubinha (Capelinha, Malacacheta).....	1	16	Rancho do Meio. Colosso. Coqueiro.
2.....	Muranhão (Itamarandiba, Santa Maria do Suassui).	1	12	Serra Negra. Socorro. Cruzeiro. Jacutinga.
3.....	Santa Maria do Suassui (Santa Maria do Suassui, Capelinha).	12	18	Safrão. Xiá. Perdido. Pedro Espírito. Golconda. Serra dos Lourenços. Bananal. Pontal. Carrapato. Ipê.
4.....	Governador Valadares (Governador Valadares, Peçanha).	30	62	Mical. Pedra Redonda. Ferrugem. Fortaleza. Boea Junta. Evangelista. Palmital. Rochedo. Sapucaia.
5.....	Conselheiro Pena (Conselheiro Pena, Resplendor, Mantena).	12	66	Mariano. Bôa Vista Mansur. Bôa Vista Alves. Laranjeiras. Baixio.
6.....	Galho (Caratinga, Bom Jesus do Galho, Raul Soares).	2	33	Cobica. Chapéu Duro. Velocindo.
7.....	Raul Soares (Raul Soares, Abre Campo)...	3	18	Alferes. Corrego da Mata.
8.....	Abre Campo (Abre Campo, Jequeri, Rio Casca).	1	17	Bôa Vista Floresta. Casa Nova. Borges. Urubui.
9.....	Espera Feliz (Espera Feliz, Manhumirim, Carangola, Tombos).	20	125	Chale Verde. Chico Dentista. Zacarias. Cupoeirão. Fazendinha. Viúva Valerio. Taquara Preta. União.
10.....	Glória (Glória, Muriaé).....	3	40	Cebola. Onça.
11.....	Cataguazes (Cataguazes, Astolfo Dutra)...	3	20	Santa Therezinha. Paraíso da Barra. Pequeri.
12.....	Bicas (Bicas, São João de Nepomuceno)...	4	28	Santa Clara. Saracura.
13.....	Braz Pires (Senador Firmino).....	1	7	São Miguel.
14.....	Alto Rio Doce (Alto Rio Doce).....	1	4	São Jose.
15.....	Bocaina (Lima Duarte).....	1	11	Onça.
	Miscellaneous.....	5		Porteira de Chave.
Total.....		100	477	

Figure 7 : Vue en plan et coupe de la pegmatite de Sapucaia - Minas Gerais - Brésil (Pecora W.T., 1950)

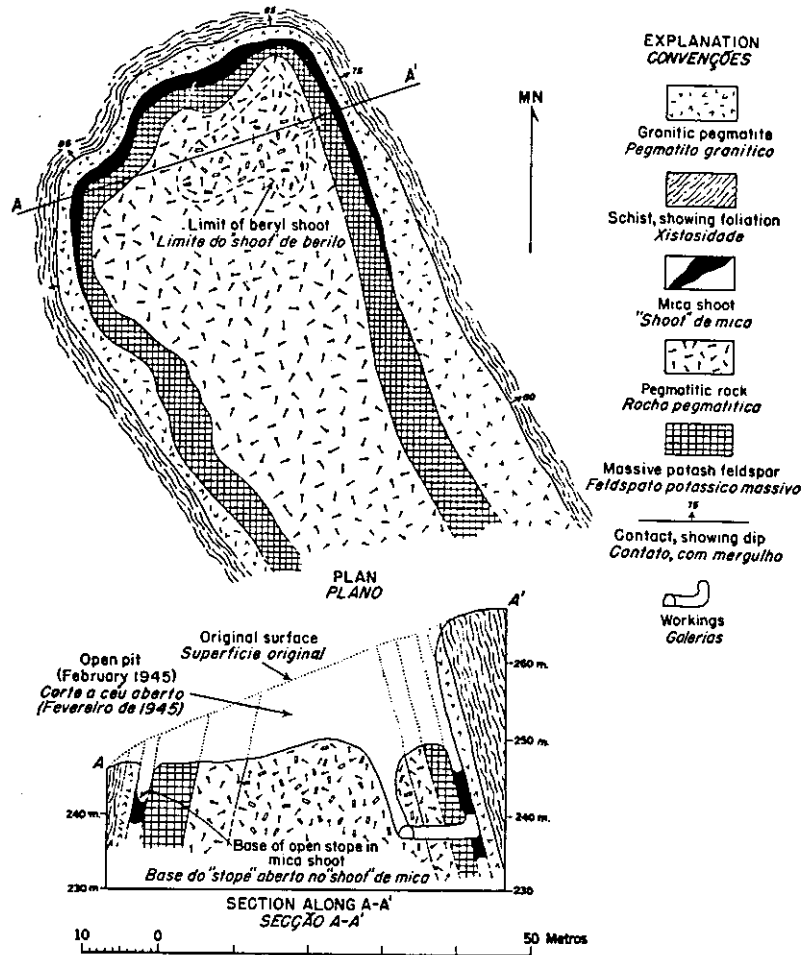
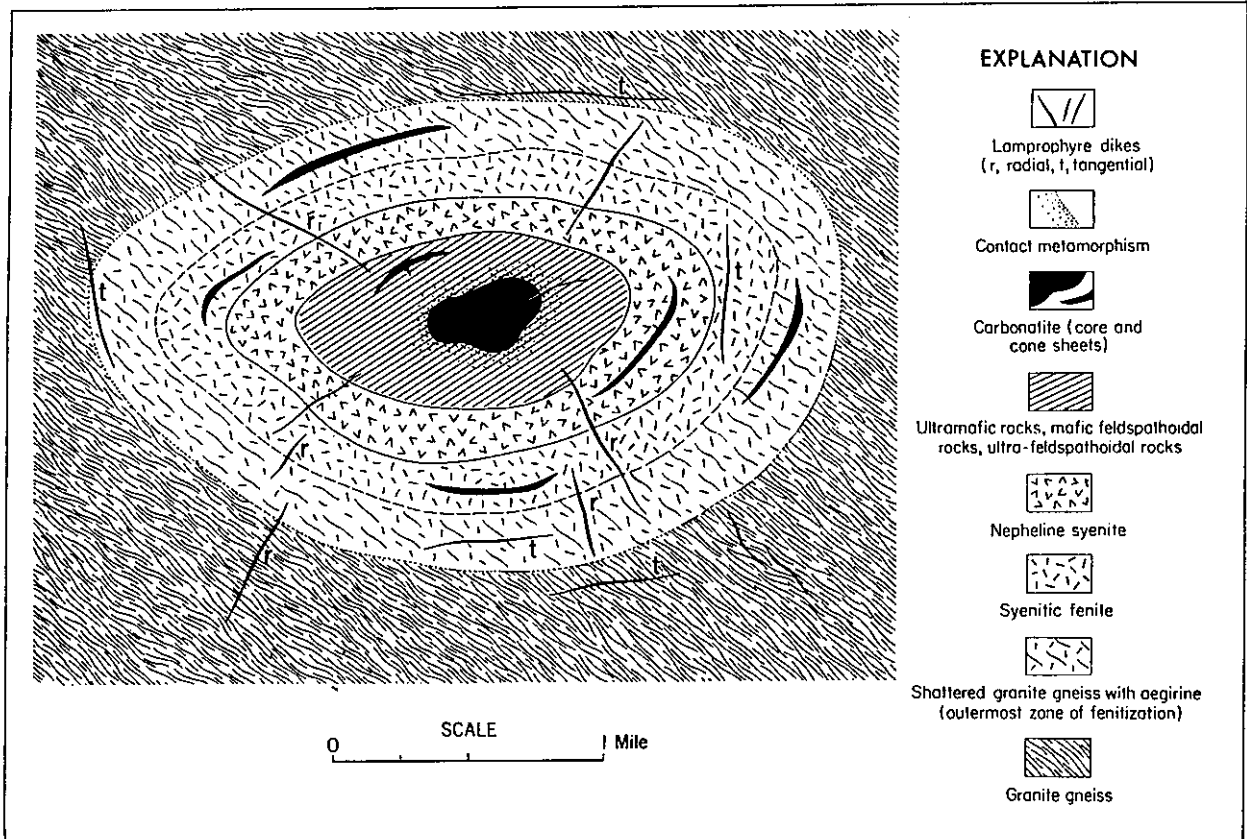


Figure 8 : Vue en plan d'un complexe alcalin à carbonatite idéal
(Heinrich E.W., 1966)



3.3.2.2 Les filons

Des gisements de phlogopite ont été découverts dans des gneiss au contact avec des cipolins. On observe des systèmes de filons parallèles de moins de 5 m d'épaisseur pour une longueur maximum de 30 m. Ils sont caractérisés par une zonation symétrique, le coeur étant généralement constitué de calcite, la phlogopite et l'apatite apparaissant en bordure.

En rapport avec ce type de gisement, on peut citer également les gisements de contact, dans lesquels la phlogopite apparaît directement au contact des calcaires cristallins et des gneiss à sillimanite grenat.

On peut rapprocher de ce type certains gisements de phlogopite du Canada et d'U.R.S.S.

3.3.2.3 Les pegmatoïdes

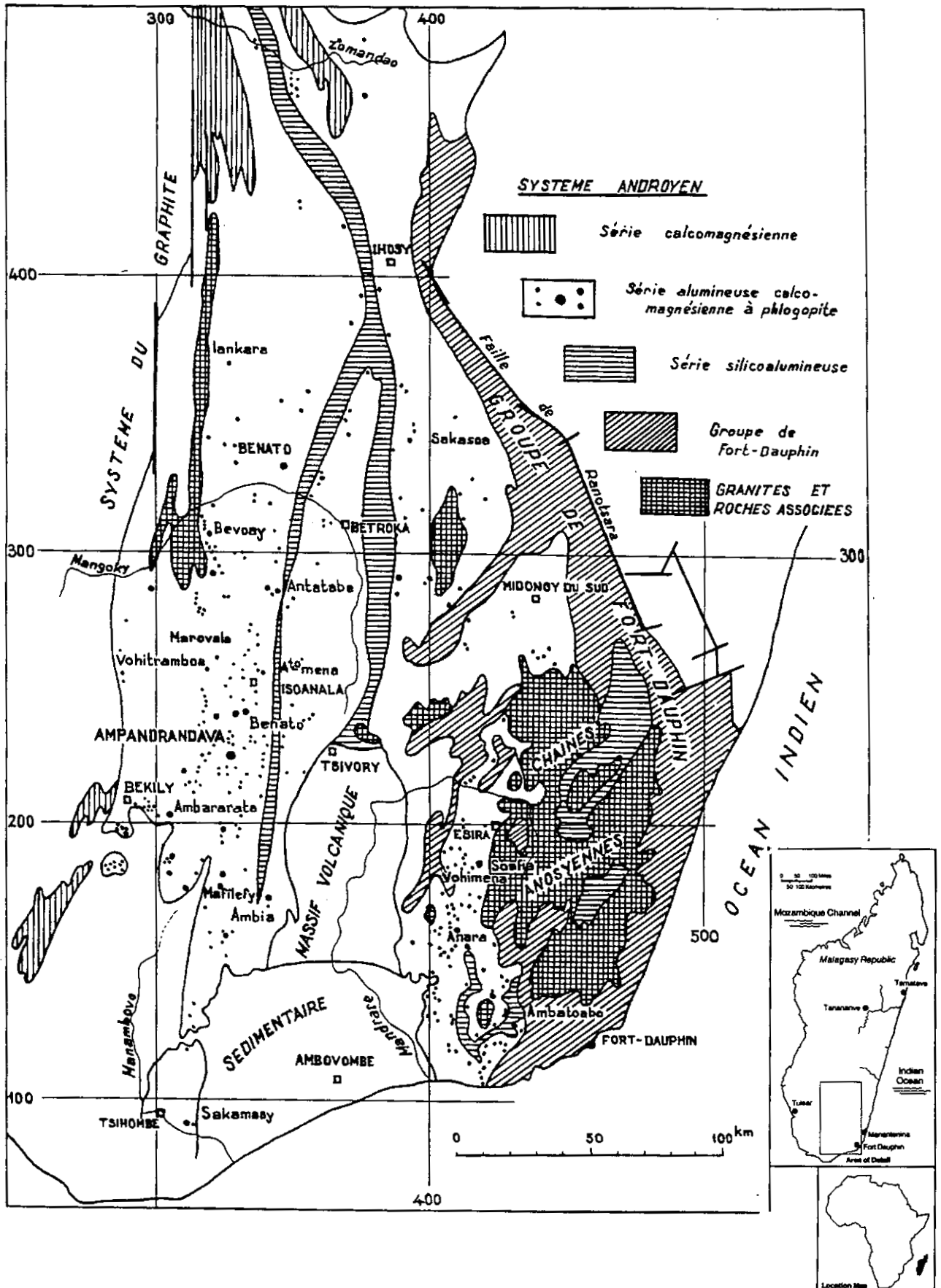
Ce type de gisement se rencontre essentiellement à Madagascar (fig. 9). Pour J. JOO (1972), les facteurs déterminant les concentrations sont lithologiques, métamorphiques et tectoniques. Pour lui, la roche mère (les pyroxénites) dérive d'anciennes marnes calcaromagnésiennes déposées dans un milieu de sédimentation lagunaire. Dans ce contexte, les couches renfermant des quantités intéressantes de mica sont caractérisées par des rapports $(Cu + Ni)/(Cu + Ni + V)$ élevés.

Les conditions d'équilibre du "pyroxène - granulite subfaciès" sont partout vérifiées. La hornblende est totalement absente, ce qui exclut l'action d'une rétro-morphose. Le degré de métamorphisme élevé détermine, à partir de conditions chimiques favorables, un assemblage minéral (diopside - phlogopite - scapolite (plagioclase) et diopside phlogopite - calcite) où la phlogopite trouve naturellement sa place. Le développement de concentrations importantes de ce minéral dépend également des plissements et des fractures subis par la roche ; ainsi, les poches de micas ne sont pas réparties au hasard, mais sont préférentiellement liées :

- aux zones où litage et foliation sont parallèles. C'est ainsi que la plupart des gisements de Madagascar s'alignent en direction N 20° E
- aux réseaux de joints et en particulier aux joints de relaxation, surtout ceux qui traversent à la fois les couches de pyroxénite et les couches encaissantes

Le gisement de "Duzorite" dans la province de Québec, au Canada, est de ce type ; le gisement prouvé s'élève à 20 millions de tonnes de phlogopite de petite taille presque pure (80 - 90 % phlogopite, 8 % pyroxène, 2 % feldspath). Le minerai affleurant est constitué de roches très métamorphiques d'origine sédimentaire.

Figure 9 : Localisation des gisements de mica - phlogopite de Madagascar
(JOO J., 1972)



4 - SECTEURS D'UTILISATION

Les industries consommatrices de micas de grandes dimensions (> 4 cm²) et celles utilisant les micas broyés ou fragmentés ne sont absolument pas les mêmes.

4.1 - Utilisation des micas en feuilles

A l'origine, le mica était utilisé comme vitre ou pour constituer des fenêtres de poêles, de fours ...

Actuellement, se sont les industries électronique, électrique et thermique qui consomment la quasi totalité de la production mondiale. Par exemple, en 1987, les Etats-Unis ont utilisé 58 % de leur mica en blocs dans l'industrie électronique.

4.1.1 Usages en électronique

La plus grande partie du mica en feuilles est utilisée dans la fabrication de tubes à vide, afin de positionner, isoler et supporter les composants à l'intérieur de l'enveloppe (tubes de télévision couleur) . Il entre dans la fabrication des lasers hélium-néon, dans les systèmes d'enregistrement des ordinateurs ...

La fabrication de condensateurs de voltage élevé nécessite l'utilisation de micas, muscovite pour les hautes fréquences, muscovite ou phlogopite pour les basses. Deux types de condensateurs sont fabriqués (micas plaqués et micas argentés). On estime le marché mondial de ce type de mica à plusieurs centaines de millions de francs par an.

4.1.2 Usages dans l'industrie électrique

Le mica en feuilles est utilisé pour la fabrication de transformateurs, de petits éléments chauffants, de rhéostats, de fusibles, de lampes à incandescence, pour isoler le bâti des générateurs, etc ...

Le mica entre dans la fabrication des fers à repasser, des bouilloires électriques, des grille-pain, des radiateurs, etc ...

4.1.3 Utilisations dans l'industrie thermique

Dans ce secteur d'activité, la phlogopite est utilisée de préférence à la muscovite, car sa résistance thermique est supérieure : on peut utiliser la première jusqu'à 1 000 °C, et la seconde se dégrade à partir de 600°C.

Elle entre dans la fabrication de regards pour des fours, de blindages de jauges de chaudières ou d'autoclaves.

La résistance thermique de la phlogopite la fait également préférer dans certaines utilisations particulières (accumulateurs des missiles thermosensibles ...)

4.1.4 Usages particuliers

Les micas en feuilles sont utilisés dans la fabrication de moteurs étanches, de diaphragmes pour masques à oxygène, de retardateurs d'onde pour des équipements optiques particuliers ("micas quart d'onde" des microscopes pétrographiques...), dans des équipements utilisant les rayons X...

Certains micas, très résistants aux fortes pressions, sont également utilisés pour la fabrication de poudre de diamant synthétique et de nitrure de bore.

4.1.5. Le mica reconstitué

Intermédiaire entre le mica en feuille et le mica broyé, le mica reconstitué est de plus en plus utilisé. Il s'agit de muscovite ou de phlogopite de bonne qualité, broyé par voie humide ; la pulpe alimente une machine à papier. Le papier obtenu est, selon les performances recherchées, imprégné de résines époxy (résistantes à la traction) ou de silicones (résistance thermique). Ces feuilles sont formées à la presse en planches stratifiées ou en tubes, ce qui facilite leur mise en oeuvre.

Ces produits se substituent de plus en plus aux feuilles de mica de qualité inférieure.

En Europe, la société Française SAMICA et la société belge COGEBI sont les principaux producteurs de ces micas reconstitués (SAMICANITE)...

De même, des produits usinables sont obtenus à partir de la fusion de verres borosilicatés et de micas ; ils possèdent une grande résistance chimique et sont très isolants.

4.2 - Le mica broyé

Les micas peuvent être broyés à sec ou par voie humide. Le second procédé, plus coûteux, permet d'obtenir des particules plus fines. Les applications de ces deux types de produits ne sont pas identiques.

Ce sont essentiellement des micas broyés à sec et des micas micronisés qui sont consommés dans le monde.

4.2.1 Utilisation de mica broyé à sec ("dry-ground")

La confection de boues de forage pour la prospection du pétrole nécessite de grandes quantités de mica broyé, de granulométries variées ("coarse grade" $\simeq$ 1 cm ; "medium grade" $\simeq$ 1 mm ; "fine grade" $<$ 1 mm) ; le mica permet de limiter les infiltrations de boue dans les terrains poreux ("mud cake").

Du mica (granulométrie 0,8 mm) entre en forte proportion dans la fabrication des produits d'étanchéité de toiture à base d'asphalte : en surface des revêtements, une couche de mica est appliquée afin de créer un film stable et inaltérable, résistant au rayons solaires. Le saupoudrage des revêtements permet également d'éviter qu'ils n'adhèrent l'un à l'autre lors du conditionnement et du transport.

Du mica broyé est ajouté au revêtement des baguettes de soudure à l'arc, afin de former, lors de la fusion, une pellicule étanche, protégeant la soudure de l'oxydation.

Lors de la fabrication de cables électriques isolés, la poussière de mica permet d'éviter toute adhérence inopportune.

Dans les industries du caoutchouc, la poudre de mica, utilisée sèche ou en suspension dans l'eau ou le savon permet d'éviter les adhérences inopportunes des objets avec leur moule, ou entre eux. En charge, elle améliore l'étanchéité des caoutchoucs (chambre à air ...) et des mousses synthétiques.

Le mica broyé à sec est, d'une façon générale, de plus en plus utilisé dans l'industrie des plastiques.

Dans les plastiques, le mica utilisé en charge (40 % de la masse totale parfois) améliore les propriétés diélectriques, les qualités mécaniques et la résistance thermique (polypropylène, polyéthylène, nylon ...). Les granulométries utilisées sont variées (500 µm à 45 µm et parfois moins). La qualité du mica dépend essentiellement de son épaisseur (parfois < 0,1 mm) : les micas sont soumis à un délaminage poussé, clivant les cristaux afin d'obtenir des particules fines.

On caractérise cette qualité par la mesure de l'"aspect - ratio" (voir paragraphe 5.2.1).

Aux Etats-Unis, le mica broyé à sec est abondamment utilisé comme charge dans la fabrication de panneaux à base de plâtre : le mica permet d'éviter l'apparition de fissures et de gales et donne un meilleur état de surface.

On l'incorpore également de plus en plus dans les ciments à jointoyer et dans la fabrication de briques et de tuiles isolantes (fours).

Les micas broyés à secs sont utilisés en moindre quantité dans les garnitures de freins, dans les encres, certaines peintures, au cours de traitements destinés à prévenir la corrosion des métaux, ainsi que dans la fabrication d'explosifs.

Enfin, il faut souligner que les micas broyés à sec tendent à remplacer totalement l'amiante dans de nombreux cas, notamment aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne (plaques pare-feu ...).

4.2.2 Utilisation du mica broyé par voie humide ("wet-ground")

Le mica broyé par voie humide a souvent les mêmes domaines d'utilisation que le mica broyé à sec, le choix étant surtout lié à la qualité recherchée (le "wet-ground" donne des produits de meilleure qualité mais est nettement plus cher).

Le mica "wet ground" est surtout utilisé dans le domaine des peintures, à des granulométries comprises entre 3 et 150 μm . Dans ce domaine, l'action des particules micacées est essentiellement physico-chimique : les particules tabulaires de mica finement broyé (45 μm - 100 μm) s'orientent parallèlement à la surface du film de peinture, créant un écran stable qui le protège des agressions chimiques et des altérations liées aux radiations lumineuses. D'autre part, le coulissage des plaquettes de mica l'une sur l'autre autorise certaines déformations de la peinture pendant le séchage, ou lors de variations dimensionnelles du support.

- Pigments nacrés : une utilisation des micas broyés par voie humide actuellement en pleine expansion est la production des pigments nacrés ("pearlescent pigments") ; des particules de micas particulièrement transparents, d'une épaisseur de 0,2 à 0,5 μm sont utilisées à différentes granulométries pour obtenir divers effets esthétiques :

- . < 20 μm : satiné
- . 20 - 50 μm : nacré
- . > 100 μm : étincellant

Ces aspects sont obtenus par des effets de transmission, de réflectance et d'interférence de la lumière, liés à la différence entre l'indice de réfraction du pigment déposé en film sur les paillettes (oxyde de titane : 2,58) et celui du mica (1,5).

Ces pigments sont fabriqués par la société allemande MERCK (IRIODINE) et par la société américaine MAERL (MAERLINE).

4.2.3 Utilisation du mica micronisé

Le mica micronisé est utilisé parallèlement au mica broyé par voie humide, plus cher mais de meilleure qualité (peintures essentiellement, mais aussi plastiques et caoutchoucs ...)

Le choix entre ces deux produits est souvent affaire de tradition.

5 - CRITERES DE SELECTION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

5.1 - Caractéristiques des gisements exploités

5.1.1 Mica fin

Les micas sont généralement des "by-products" d'exploitation d'autres substances ; les critères de sélection des gisements exploitables sont alors plutôt liés aux caractéristiques de la substance principale.

On peut citer par exemple les gisements français de granites kaolinisés, principales sources de kaolin et de micas :

- ratio épaisseur de découverte/niveau exploitable (D/E) faible à nul
- épaisseur du niveau exploitable ≥ 30 m
- kaolinite : 25 à 45 % du brut
- valorisation des sous-produits (micas, quartz, feldspath, "stone", ...)

En règle générale, les gisements de mica fin sont constitués de roches profondément altérées et friables, ce qui facilite l'exploitation et permet une récupération aisée du mica lors du traitement du produit brut.

5.1.2 Mica en feuille

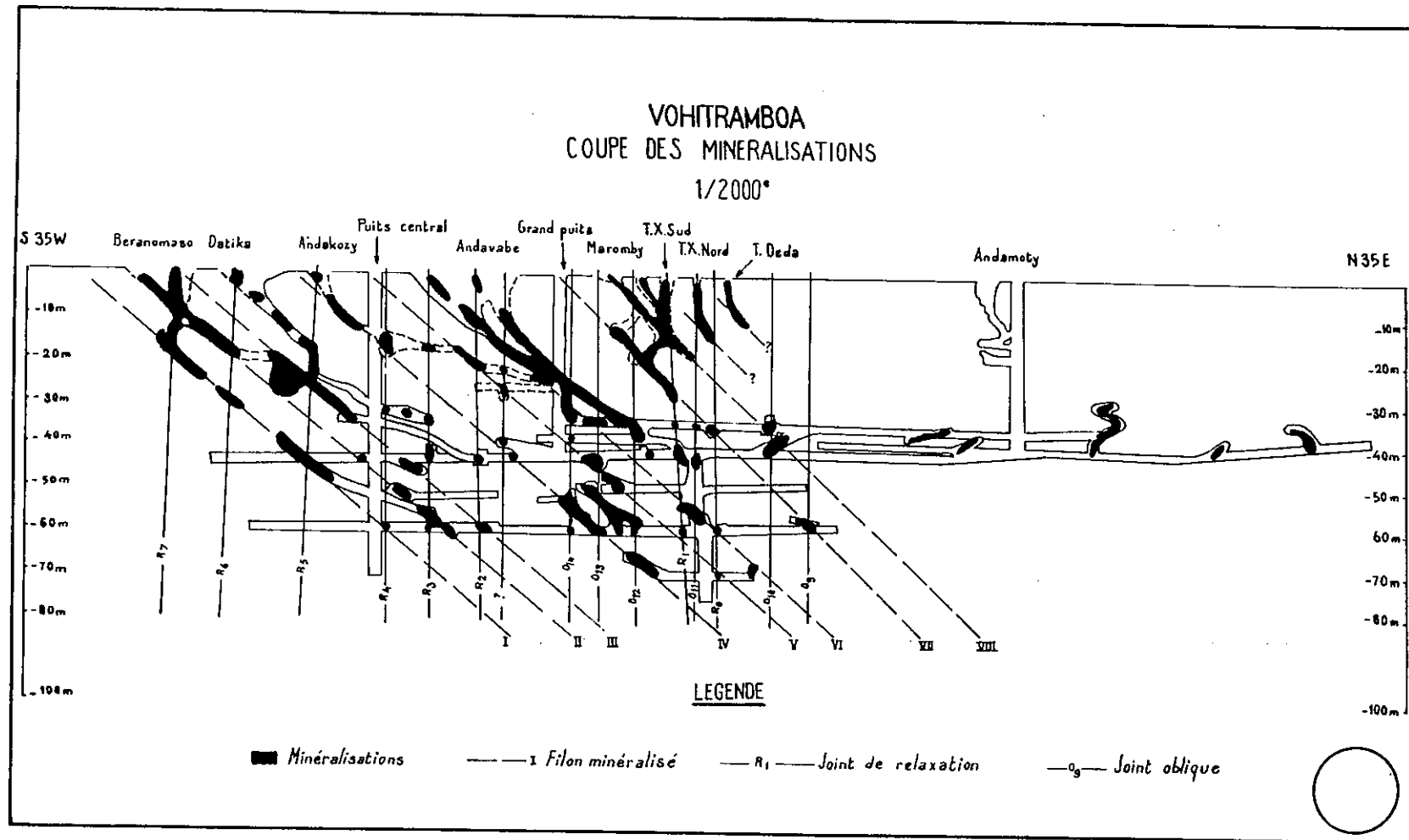
Les gisements de cristaux de mica de grande taille sont généralement petits et irréguliers ; c'est pourquoi les gites (pegmatites, filons ou pegmatoïdes) sont exploités de façon artisanale ; la main-d'oeuvre doit donc être relativement peu onéreuse, car la plupart des opérations sont manuelles (exploitation sélective, tri des cristaux, taille, clivage, emballage).

En Inde, on considère que seulement 2 % des pegmatites sont suffisamment riches pour justifier une exploitation et que 20 % seulement des micas produits sont commercialisables.

L'exploitant recherche à l'intérieur des gisements pegmatitiques contenant des cristaux de mica dispersés, des concentrations micacées ("mica - shoots") métriques à plurimétriques, qui sont généralement les seules parties économiquement exploitables.

La figure 10 montre le gisement de Vohitramboa à Madagascar (voir localisation, figure 9) : la coupe schématique est réalisée dans le plan d'une couche de pyroxénite épaisse de 15 m et fortement inclinée vers l'Ouest.

Figure 10 : Coupe du gisement de phlogopite de Vohitramboa (Madagascar)
JOO J., 1972



5.2 - Spécifications industrielles des micas commercialisés

5.2.1 Mica broyé

Les qualités recherchées par les industriels utilisant les micas broyés sont :

- la couleur claire, indispensable pour tout les micas entrant comme charges dans les plastiques, les peintures et plus généralement tous les produits destinés, peu ou prou, à la décoration. Cette qualité n'a pas de raison d'être pour des applications telles que les boues de forage ou les charges dans les produits asphaltiques
- la granulométrie dépend des utilisations envisagées (cf. tableau 3 et tableau 4)
- la facilité de délaminage, qui permet d'obtenir par clivage des cristaux moins épais, qui développent, à poids égal, une surface spécifique supérieure.

La mesure de l'"aspect ratio" permet de caractériser les produits broyés et délaminés ; il est défini simplement comme le rapport de la dimension basale et de l'épaisseur du mica ; ces caractéristiques sont mesurées de façon statistique sur des populations de micas, à l'aide de l'analyse d'image (MEB) ou grâce au granulomètre à laser. Comme charge dans les plastiques, les meilleurs micas ont un aspect ratio compris entre 10 : 1 et 150 : 1 ("High Aspect Ratio" ou HAR).

5.2.2 Mica en feuille

Les critères de classification sont regroupés au sein des normes françaises NF - T - 13 - 001 à 005 (1967 à 1975).

Il existe également des normes anglaises (BS 3564) et américaines (ASTM D - 351).

Les normes françaises distinguent la phlogopite de la muscovite.

5.2.2.1 Mica *phlogopite*

a) Classification selon l'épaisseur

Selon l'épaisseur du mica, on distingue :

- les blocs (angl. "blocks") : mica préparé, d'épaisseur supérieure à 0,18 mm
- les feuilles minces (angl. "films") : mica préparé, d'épaisseur comprise entre 0,05 et 0,18 mm
- les clivures (angl. "splittings") parmi lesquelles on distingue les clivures épaisses et minces, en livret ou en vrac

TABLEAU 3 : Granulométrie moyenne des micas broyés en fonction des utilisations

Dimensions approx.	Utilisations
3 à 4 mm	Boues de forage
1,7 mm à 3 mm	Usages décoratifs
1 mm	Isolation en construction, décoration
0,8 mm	Produits asphaltiques pour étanchéité
0,5 mm	Protection des métaux, absorbants pour explosifs ...
0,25 mm	Charges pour ciment, revêtement de baguettes de soudure ...
0,15 mm	Charges pour peinture, plastiques, céramiques ...
50 μm et moins	Charges et amélioration des caractéristiques physiques et esthétiques des peintures, caoutchoucs, matières plastiques

TABLEAU 4 : Caractéristique des poudres de mica pour l'industrie des peinture (Norme NF T 31 - 109)

DÉSIGNATION		CARACTÉRISTIQUES			MÉTHODES D'ESSAIS
		à sec		à l'eau	
		Classe 1	Classe 2		
Couleur		conforme à celle d'un spécimen agréé			Chapitre 6.1
Refus sur tamis d'ouverture de maille de :	125 μm 63 μm 45 μm	1,0 % max. 30 % max. 60 % max.	non spécifié non spécifié 0,5 % max.	non spécifié 1,0 % max. 5,0 % max.	NF T 30-024 (*)
Répartition granulométrique : Pourcentage en masse de particules de diamètre inférieur au diamètre spécifié	20 μm 10 μm 5 μm 2 μm	98 % min. 70 % min. 30 % min. 10 % min.	non spécifié non spécifié non spécifié non spécifié	98 % min. 80 % min. 30 % min. 5 % min.	NF T 30-044 (**)
Matières volatiles à 105 °C		0,5 % max.			NF T 30-030
Perte au feu		5,5 % max.			Chapitre 6.2
Matières solubles dans l'eau		0,5 % max.			NF T 30-032
pH des suspensions aqueuses		conforme à $\pm 0,5$ près à celui d'un spécimen agréé et compris entre 7 et 8			NF T 30-035

(*) Si nécessaire, un défloculant pourra être utilisé, comme, par exemple, une solution de pyrophosphate tétrasodique à 40 g/l.

(**) Une autre méthode pourra être utilisée par accord entre les parties intéressées, accord portant nécessairement aussi sur les limites prévues.

L'épaisseur est déterminée à l'aide d'un micromètre à pression constante à touche de 6 mm de diamètre, exerçant une pression de 1 bar, ou d'un micromètre à rochet avec une tige de 6 mm de diamètre. Il faut effectuer autant de mesures que la surface de l'échantillon contient de fois 14,5 cm², et en faire la moyenne.

b) Classification selon la surface utilisable

Cette classification a pour base la surface du plus grand rectangle utilisable qu'il est possible de découper dans l'échantillon.

Le tableau 5 donne la correspondance entre les classes et les surfaces des rectangles utilisables.

TABLEAU 5 : Classement du mica en feuilles selon la surface utilisable (Norme NF T 13-001)

Désignation		Surface du rectangle utilisable				Dimensions minimales du plus petit côté	
Désignation (classe)	Ancien système (numéro)	en centimètres carrés		en inches carrés		en centimètres	en inches
		de (inclus)	à (exclu)	de (inclus)	à (exclu)		
630	OOEE spécial	645,2 et plus		100 et plus		10.2	4
500	OEE spécial	516.1	645,2	80	100	10.2	4
400	EE spécial	387.1	516.1	60	80	10.2	4
315	E spécial	309.7	387.1	48	60	10.2	4
250	spécial	232,3	309.7	36	48	8.9	3 1/2
160	1	154,8	232,3	24	36	7.6	3
100	2	96,8	154,8	15	24	5.1	2
63	3	64,5	96,8	10	15	5.1	2
40	4	38,7	64,5	6	10	3.8	1 1/2
20	5	19,4	38,7	3	6	2.5	1
16	5 1/2	14,5	19,4	2,25	3	2.2	7/8
06	6	6,4	14,5	1	2,25	1,9	3/4
05	7	4,8	6,4	0,75	1	1,6	5/8

c) Classification selon la qualité visuelle et les imperfections de structure

Deux classes, P1 et P2 sont définies : la classe P1 regroupe les échantillons parfaits ; on tolère dans la classe P2 quelques imperfections de structures, mais pas de taches.

d) Classification selon la thermorésistance

On distingue 5 classes en fonction de leur résistance à la température (250°, 400°, 600°, 760° et 900° C).

5.2.2.2 Muscovite

a) Classification selon l'épaisseur

La norme NF T 13-003 permet de distinguer trois classes :

- les blocs (épaisseur supérieure à 0,18 mm)
- les feuilles minces (épaisseur comprise entre 0,05 et 0,18 mm)
- les lamelles (épaisseur suivant la demande)

La détermination de l'épaisseur est réalisée de la même façon que pour la phlogopite.

b) Classification selon la surface utilisable

Les classes sont les mêmes que celles de la phlogopite (tableau 5).

c) Classification visuelle

La classification des qualités visuelles d'un mica muscovite comprend 13 classes décrites dans la norme NF T 13-005 (cf. tableau 6).

TABLEAU 6 : Classification du mica muscovite en blocs et en feuilles basée sur ses propriétés visuelles

Classification visuelle	Discoloration cristallographique	Inclusions d'air	Taches	Ondulations	Dureté	Pierres Gontolements Enchevêtrement Rides Déchirures Fissures Fissures filiformes Surépaisseur Mica enchevêtré Stries entrecroisées Trainée de sable
		très légères a légères b moyennes importantes	fumeuses minérales végétales argileuses	plates légères moyennes importantes	dur mou	
V-1 Très clair	X	X X X X	X X X X	X X X X	V X	X X X X X X X X X X
V-2 Clair	Vd	V X X X	X X X X	V X X X	V X	X X X X X X X X X X
V-3 Semi-clair	Vd	V V X X	X X X X	V V X X	V X	X X X X X X X X X X
V-4 Semi-taché	Vd	V V Vc X	X X X X	V V V X	V X	X X X X X X X X X X
V-5 Taché qualité A	V	V V V Ve	X X Vd X	V V V X	V X	X X X X X X X X X X
V-5.1 Taché qualité A1	V	V V V Vj	X Vt Vd X	V V V V	V X	X X X X X X X X X X
V-6 Taché qualité B	V	V V V V	X Vg Vg Vg	V V V V	V X	X Vd X X X X X X X X
V-7 Très taché	V	V V V V	X Vg Vh X	V V V V	V X	X V X X X X X X X X
V-8 Intensément taché	V	V V V V	VhVhVhVh	V V V V	V S	V V V V V V V V V V
V-9 Moucheté noir	V	V V V V	X Vkv X	V V V X	V X	X X X X X X X X X X
V-10 Tacheté noir	V	V V V V	X V V X	V V V X	V X	X Vd X X X X X X X X
V-11 Taché noir	V	V V V V	V VgV V	V V V X	V X	X X X X X X X X X V
V-12 Taché noir rouge	V	V V V V	V VgV V	V V V X	V S	X Vd X X X X X X X X

V Autorisé

X Non autorisé

S Autorisé seulement selon accord

a En faible quantité et léger sur le 1/4 de la surface utilisable

b Sur la moitié de la surface utilisable

c Sur les 2/3 de la surface utilisable

d Léger

e Avec une distribution uniforme

f Ne dépassant pas deux petites taches sur la surface utilisable

g Moyen

h Important

j Pas fortement concentré sur plus d'une surface équivalente à 40 mm² pour le grade 5 et au-dessus, à 10 mm² pour les grades 5 1/2 et en-dessous

K En taches noires dispersées

d) Autres classifications

Les muscovites sont également classées selon leurs couleurs (muscovite indienne rouge plus chère que la verte), leur transparence et leurs caractéristiques thermiques et électriques ; ces différents paramètres sont généralement corrélés empiriquement : par exemple, les micas clairs sont réputés avoir les meilleures caractéristiques diélectriques.

Pour les industriels consommateurs de mica en feuille, les blocs et les films doivent pouvoir être facilement clivés en lamelles d'épaisseur uniforme, les plus plates possibles. Souvent, des micas se clivent parfaitement par endroits et très mal en d'autres. Ces imperfections résultent de la présence de macles, de discontinuités ou de crénulations dans les lamines de mica.

De même, certaines caractéristiques comme la dureté, la flexibilité et l'élasticité peuvent affecter la valeur du produit. En général, les variétés roses et les noires sont plus dures que les vertes. Toutes choses égales par ailleurs, les variétés dures sont moins flexibles et donc plus difficiles à cliver. On teste la flexibilité et l'élasticité d'un mica, caractéristiques très sensibles à la présence d'imperfections de structures (microfissures, trous ...) en enroulant un feuillet de 0,13 mm d'épaisseur autour d'un crayon, et en étudiant son retour à sa forme plate initiale.

6 - EXTRACTION ET MODE DE TRAITEMENT DES MICAS

6.1 Micas en poudre

6.1.1 Extraction

Les roches exploitées pour les micas fins sont généralement déconsolidées (leucogranite kaolinisés en Bretagne, phlogopite presque pure au Québec) ; l'extraction est réalisée exclusivement à ciel ouvert, essentiellement de deux manières en fonction de l'homogénéité du gisement et de la dureté de la roche :

- par des engins mécanisés (pelles, scrapers ...)
- par l'aide d'une lance, ou "monitor" qui envoie un jet d'eau très puissant sur le front de taille, désintégrant le tout venant qui est pompé vers l'installation de traitement.

6.1.2 Schéma général du traitement

Une première séparation des différents constituants est généralement réalisée soit dans des hydrocyclones après débouage du minerai dans des trommels (voie humide choisie par les producteurs bretons), soit par des sélecteurs pneumatiques après désintégration du tout venant (voie sèche).

La figure 11 représente le schéma du processus de traitement du gisement (carbonatite) de phlogopite de Kemira en Finlande. Les granulométries produits par cette unité varient de 15 μm ("40", "40 S") à 600 μm ("900") ; les variétés S subissent un traitement chimique particulier.

La figure 12 présente le schéma du traitement suivi par Kaolins d'Arvor.

La valorisation des micas met en oeuvre les procédés spécifiques suivants :

6.1.3 Flottation sélective

La séparation des micas millimétriques de leur gangue (quartz, feldspaths essentiellement) peut être réalisée selon deux techniques, mises au point par l'USBM :

- la méthode acide - cationique : de l'acide sulfurique déprime le quartz et des agents cationiques collectent le mica
- la méthode alcaline anionique - cationique : les résultats de ce procédé sont optimum pour des fractions granulométriques plus fines (850 μm)

Ces techniques de flottation ne sont que rarement mises en oeuvre car onéreuses. Les exploitants leurs préfèrent généralement des process plus simples et donc plus économiques, mais généralement gourmands en eau et de rendement plus faible (hydro-cyclones...).

6.1.4 Broyage

La structure laminaire du mica et ses propriétés mécaniques en font un des minéraux les plus difficiles à broyer. Il y a trois catégories de micas commercialisées : broyé à sec ("dry-ground"), broyé par voie humide ("wet-ground") et micronisé.

6.1.4.1 Broyage à sec

Dans ce procédé, le mica, éventuellement pré-broyé, alimente un broyeur à boulets, à jet d'air ou pendulaire ; le mica broyé (50 μm - 1 mm) est ensuite classé sur des tamis vibrants et stocké. Les broyeurs à jet d'air et les broyeurs pendulaires permettent un certain délaminage des paillettes.

6.1.4.2 Broyage par voie humide

Ce procédé est plus complexe mais il présente l'avantage de donner une surface parfaitement plane aux paillettes (cf. l'effet nacrant). Le broyeur est généralement constitué d'un cylindre d'acier dans lequel roulent des rouleaux de bois (le bois n'est pas abrasif pour la surface des particules de mica). Le mica et l'eau forment une pâte épaisse, écrasée durant 6 à 8 heures selon l'alimentation et la granulométrie désirée. Un classificateur à rateau sélectionne les micas commercialisables ; le refus est renvoyé dans le broyeur.

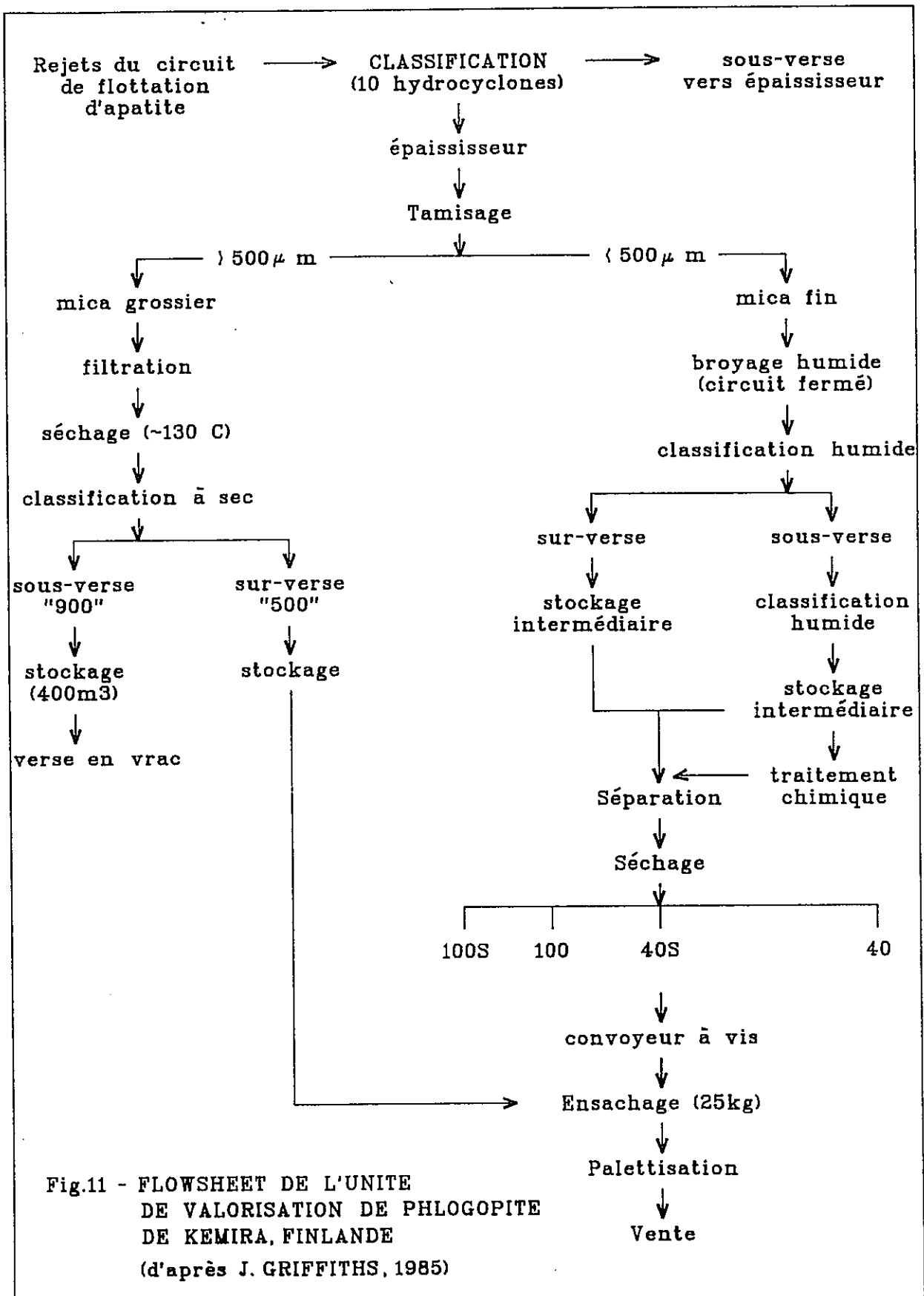


Fig.11 - FLOWSHEET DE L'UNITE
DE VALORISATION DE PHLOGOPITE
DE KEMIRA, FINLANDE
(d'après J. GRIFFITHS, 1985)

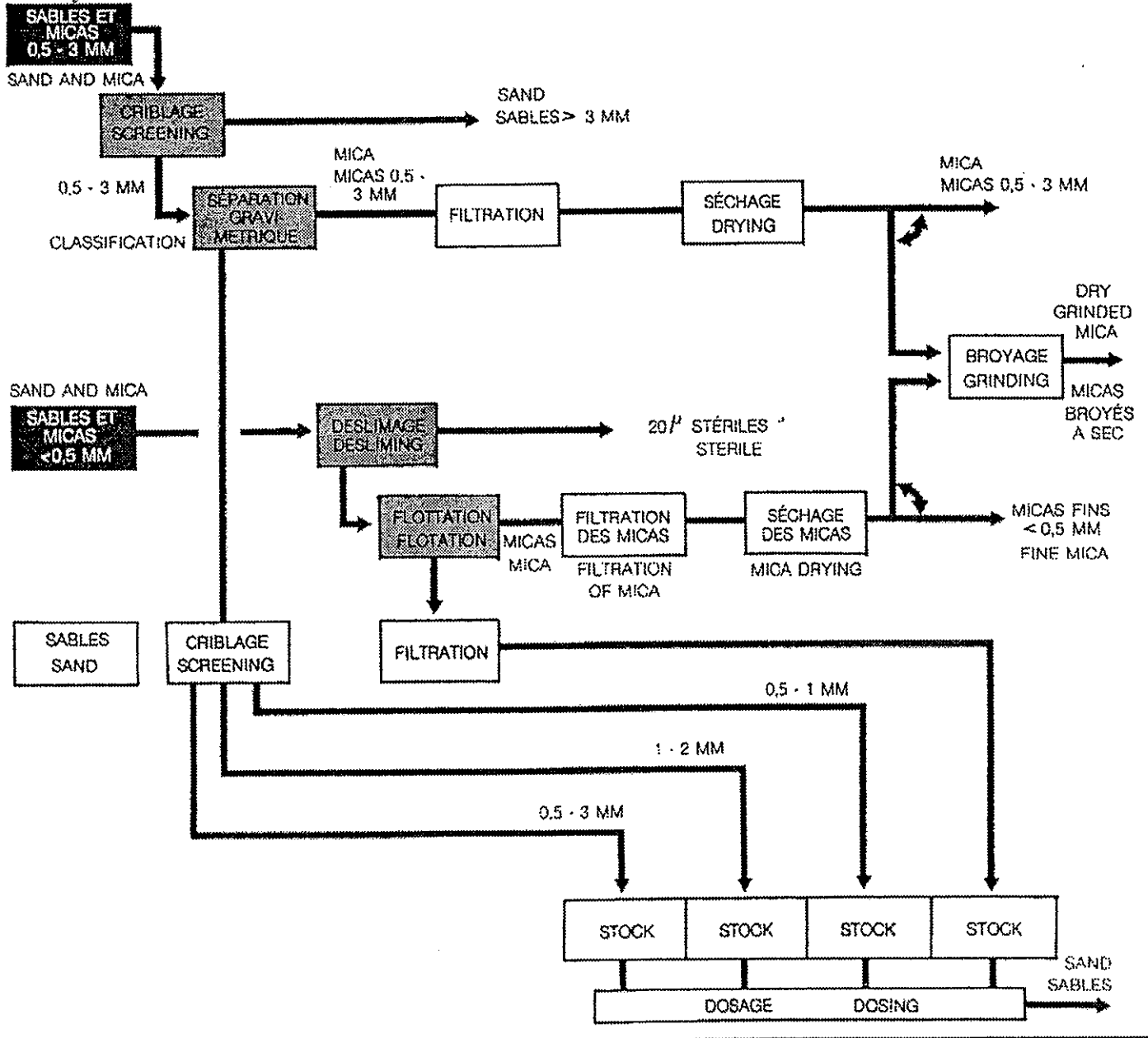


Figure 12 : Flowsheet de l'unité de valorisation de muscovite de Kaolins d'Arvor, France (document SKA)

6.1.4.3 Micronisation

Les microniseurs permettent la pulvérisation des micas jusqu'à moins de 20 μm .

L'énergie libérée par la rencontre de deux jets de vapeur à très hautes température (350°C) et pression (15 bars) engendre de très nombreux chocs entre les particules de mica à très grande vitesse (mach 2). Les micas broyés sont ensuite classés dans un sélecteur pneumatique et stockés pour la commercialisation.

6.1.4.4 Traitement chimique

Le mica subit ensuite, dans certains cas, des traitements chimiques (traitement au silane ...).

6.2 Micas en feuilles

6.2.1 Extraction

L'extraction des grands cristaux de mica est réalisée manuellement, dans le cadre de petites exploitations artisanales, en carrière à ciel ouvert mais plus généralement souterraine.

6.2.2 Valorisation des micas bruts (d'après J. JOO, 1972)

Le mica brut présente fréquemment des craquelures, des impuretés et des défauts qui réduisent sensiblement sa surface utilisable et qu'il faut éliminer afin d'obtenir un produit commercialisable. Les phases du traitement manuel sont les suivantes :

- . Coupage : cette opération de sélection est effectuée manuellement et nécessite une grande expérience ; elle consiste à éliminer les parties détériorées à l'aide d'un couteau bien aiguisé. A Madagascar, on considère que l'ouvrier chargé de ce travail traite environ 20 kg/j, obtenant ainsi 3 à 6 kg de mica coupé.

Une première sélection est effectuée à ce stade entre les blocs marchands et les morceaux déformés, destinés à la fabrication de splittings.

- . Raffinage : après une vérification, les blocs sont clivés en book-forms et "feuilles de cigarettes" ; on constate à ce stade une nouvelle perte d'environ 5 à 15 % du mica coupé.
- . Classement : le mica raffiné est ensuite classé d'après la surface du plus grand rectangle.
- . Emballage : les feuilles de mica sont entassées méticuleusement dans des caisses en bois tendre, garnies de papier goudronné contre l'humidité. Les book-forms et les splittings de premier choix sont séparés par de minces couches de poudre de mica pour éviter les collages et les frottements.

6.2.3 Valorisation des déchets

La tendance du marché depuis de nombreuses années est de remplacer le mica en feuille par du mica reconstitué à partir de qualités meilleur marché (splittings et déchets). Il s'agit de produits, comme la MICANITE obtenue par collage de splittings intéressants par l'homogénéité de leurs qualités, généralement fabriqués dans les pays importateurs de micas en feuilles. Ces produits sont toutefois très concurrencés par les feuilles obtenues à partir de mica en poudre (brevet français de la SAMICA).

7 - PRODUITS DE SUBSTITUTION DU MICA

7.1 Substitution du mica pulvérisé

Le mica souffre de la compétition avec d'autres charges lamellaires.

Dans l'industrie des peintures, le principal concurrent du mica est le talc. Le talc est aussi tabulaire, mais plus épais à diamètre égal ; il est chimiquement un peu moins stable ; le mica silanisé crée des liens avec les plastiques, ce qui, pour certaines utilisations, est un avantage déterminant ; dans d'autres cas, on préférera le talc. De plus, le mica est un peu plus dur que le talc. C'est toutefois des questions de prix, de disponibilité et d'habitude qui font que le choix se porte sur l'un ou l'autre produit.

7.2 Substitution du mica en plaque

Etant donné le prix des micas en feuilles, il est naturel que les utilisateurs de ce type de produit cherchent à lui substituer des matériaux moins onéreux (Micanite, Mica mat, céramiques de type NPO ...).

Toutefois, cette substitution n'est possible que lorsqu'une seule des qualités particulières du mica est en jeu (résistance thermique, électrique, propriétés d'élasticité et de flexibilité, transparence...).

Lorsque plusieurs de ces qualités sont requises conjointement, le choix du mica s'impose.

Dans certaines utilisations extrêmes (stabilité diélectrique au-dessus de 500 MHz, joints pour très hautes pressions ...) la substitution du mica par d'autres matériaux s'avère encore impossible.

On tend malgré tout à substituer le mica artificiel (Fluor - phlogopite) aux micas naturels ; il semble toutefois que la fabrication de feuilles de grandes dimensions soit difficile et onéreuse et ne puisse pas remplacer économiquement l'exploitation des micas naturels.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BENBOW J. (1988) - Mica - Markets built on dry ground
Ind. min. Feb. 1988
- CLARKE G. (1983) - Mica - a review of world developments
Ind. min. June 1983
- CROCKETT R.N. (1975) - Mica - Mineral Resources Consultative Committee -
Mineral Dossier n° 15 - London
- DAVIS L.L. (1987) - Mica in Minerals Yearbook - 1987
- HEINRICH E.W. (1966) - The Geology of carbonatites. Rand Mc Nally & Comp
- Chicago
- HOADLEY J.W. (1960) - Mica deposits of Canada - Geological Survey of
Canada - Economic Geology Series n° 19
- JOO J. (1972) - Le mica industriel de Madagascar - Thèse - Ann. Scient.
Univ. Clermont - Oct. 1971
- PECORA W.T. (1950) - Mica deposits in Minas Gerais - Brésil - US
Geological Survey Bull - 964 C
- SCHOEMAN J.J. (1989) - Mica and Vermiculite in South - Africa - J.S.
Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 89 n° 1 - Jan. 1989 - pp. 1-12