

ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE D'ENRICHISSEMENT DES DÉCHETS DU STOCK INTERMÉDIAIRE ET DES REJETS DE TRAITEMENT PAR LIQUEUR DENSE DES MINÉRAIS DE CHROMITE DE LA SOCIÉTÉ KRAOMA-MADAGASCAR

Simon RAKOTOARISON, Franklin H. RALANTOMANANA, VoLa Niriana RATSIMANDRESIARISON

RÉSUMÉ

Le problème rencontré par les exploitations minières à Madagascar est que la totalité des produits économiquement valorisables n'est jamais extraite. Les traitements artisanaux d'or effectués à la batée sans préconcentration ni amalgamation préalable ne donnent pas de rendement satisfaisant. En effet lors de la batée, des fines particules d'or sont rejetées avec les eaux de traitement et seuls quelques grains d'or (pépites) sont récupérés. Même les exploitations industrielles n'échappent pas à cette situation.

A ce titre, l'exploitation de la chromite d'Andriamena par la Société KRAOMA ne fait pas exception car elle ne récupère pas non plus, la totalité des chromites à tous les niveaux de traitement. En effet, une grande quantité de déchets sont laissés à la mine dans des stockages intermédiaires. Lors de l'enrichissement des produits dans les usines, on remarque des déchets à chaque niveau de traitement. Ces déchets se présentent sous forme de « rocheux » dans la mine et après le traitement à la liqueur dense. Dans la laverie et dans l'unité de déphosphoration, les déchets se présentent sous forme de « fines ».

Nos études sont ainsi axées sur la possibilité de récupérer le maximum des produits encore valorisables dans ces différents déchets. Aussi la méthode préconisée est le traitement gravimétrique à la liqueur dense après différentes opérations de broyage et de criblage. Des « petits rocheux » enrichis sont obtenus et pourront être commercialisés sur le marché mondial auprès de certains clients de l'industrie du chrome. Les résultats de cette opération sont les suivants :

- ✚ Petits rocheux obtenus après le traitement du stock intermédiaire : 40,49 % en Cr₂O₃ et 34 ppm en Phosphore
- ✚ Petits rocheux obtenus après le traitement des rocheux de l'usine de traitement à la liqueur dense : 34,02 % en Cr₂O₃ et 34 ppm en Phosphore.

Mots clés : exploitation, gisement, traitement, fines, chromite, Andriamena, rocheux, déchets, enrichissement, petits rocheux.

INTRODUCTION

Les problèmes d'une société qui exploite des gisements miniers (chromite, graphite, etc.) à Madagascar sont principalement de deux sortes. Tout d'abord le problème de disponibilité de réserve qui assure la production continue des minerais, ensuite le problème de fluctuation de prix des minerais dans le marché mondial. Jusqu'à maintenant, tous les minerais produits à Madagascar sont destinés à l'exportation. Madagascar ne devrait pas se contenter d'exporter des minerais bruts mais devrait les traiter sur place pour produire des produits finis (aciers inoxydables, colorants par exemple). D'importantes plus-values se dégageraient si on met en place toutes les chaînes de traitement des minerais jusqu'à leurs utilisations finales. Ces plus-values profiteraient certainement à la relance de notre économie en général, par l'augmentation de nos recettes en devises et de notre industrie en particulier par la création d'emplois et bien d'autres avantages générés par cette activité.

Concernant le gisement de chromite d'Andriamena situé dans la partie centrale de Madagascar, l'exploitation des mines de Bemanevika débutait en 1968. Il semble qu'à partir de 2015, la Société est confrontée à un manque de gisement de grande taille semblable aux deux mines qui ont assuré leur survie. Elle a déjà eu recours à l'exploitation des petits gisements auparavant, comme en 2002, où l'essai de production « d'une petite mine » s'avérait concluant. Aussi la mise en exploitation de certains de ces gisements parmi les six cent indices répertoriés dans la zone d'Andriamena, pourrait être considérée comme une solution à ce problème. [6]

Ces dernières années, le prix de la chromite sur le marché mondial fluctue beaucoup. La fluctuation des prix de chromite donne une sinusoïde élargie à la base mais serrée à la hauteur.

Par ailleurs, les déchets cumulés depuis le début de l'exploitation est très important car non seulement ils sont de différentes sortes mais certains d'entre eux contiennent encore de quantité non négligeable de chromite valorisable et qui mérite un enrichissement. [3] Il faudrait chercher des méthodes adéquates pour récupérer au maximum la chromite. Ainsi la Société réduira la quantité des déchets cumulés et bénéficiera d'une plus-value conséquente.

Les déchets de la Société peuvent être classés en trois catégories :

- ✚ les déchets de blocs de roches considérés comme les rejets d'exploitation au même titre que les stériles et qui sont laissés au stock intermédiaire à la mine,
- ✚ les rejets (rocheux) de l'usine de traitement par liqueur dense,
- ✚ Et les rejets des « fines » issus du traitement gravimétrique et de l'unité de déphosphoration.

Le traitement de déchets des « fines » ont déjà fait l'objet d'une étude à part, aussi allons nous étudier le traitement des déchets d'exploitation du stock intermédiaire de la mine et ceux de l'usine de traitement par liqueur dense stockés aux environs de l'usine de la laverie.

Le but de l'étude étant de récupérer le maximum des chromites résiduelles dans ces déchets (opération d'enrichissement de minerais) car une quantité de produits encore valorisables y sont encore restés.

A ce titre, notre étude se divise en quatre parties :

- ✚ généralités sur la chromite
- ✚ généralités sur les déchets de la chromite
- ✚ proposition d'une méthode de traitement des déchets étudiés
- ✚ les études expérimentales et les résultats obtenus

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA CHROMITE

La chromite d'Andriamena a été découverte depuis le début du 19^{ème} siècle. [2]. Des explorations géologiques, des travaux miniers ainsi que des essais de production ont été entrepris et ont conduit à l'exploitation des deux mines de Bemanevika et d'Ankazotaolana dans le gisement d'Andriamena.

La chromite se présente rarement en cristaux. Le plus souvent elle forme des masses grenues. Sa coloration est noire brunâtre et la poudre est brune. L'éclat est semi-métallique ; sa dureté est de 5,5 sur l'échelle de Mohs ; son poids spécifique est de 4,5 à 4,8. Il est fusible au chalumeau et inattaquable aux acides. L'origine est exclusivement magmatique liée aux roches ultrabasiques. Seule la chromite ou fer chromé est utilisée comme minerai de chrome. [3] Les roches encaissantes de la chromite sont des roches basiques, soit des pyroxénites, soit moins fréquemment des péridotites, soit des dérivés de ces dernières.

Le schéma général de l'exploitation de la chromite est le suivant :

- ✚ L'exploitation à ciel ouvert de la mine, en utilisant le décapage des stériles, le forage des couches de minerais à chromite, le tir à l'explosif dans les trous de forage, le triage des minerais et le transport des minerais vers les usines de traitement.
- ✚ Le broyage de minerais,
- ✚ Le traitement des rocheux à la liqueur dense,
- ✚ Le traitement gravimétrique (laverie) des produits fins,
- ✚ Et le traitement du refus gravimétrique dans l'unité de déphosphoration.

Les spécifications chimiques de la chromite sont caractérisées par le teneur en chrome, en fer et le ratio Cr/Fe, ainsi que les éléments fondants SiO₂, Al₂O₃, MgO. Mais des éléments nuisibles peuvent intervenir de manière pénalisante, par exemple, la teneur en phosphore pour les usages métallurgiques.

La chromite métallurgique doit avoir une teneur élevée en chrome et faible en fer. La chromite chimique peut avoir une teneur en chrome plus faible et une teneur en fer plus élevée. Les chromites réfractaires doivent avoir une teneur en Al_2O_3 élevée, une teneur en SiO_2 assez faible et une teneur en chrome très faible. Les « fines » doivent avoir une granulométrie fine, une teneur en Al_2O_3 élevée et une teneur en SiO_2 faible.

Le classement de la chromite suivant son utilisation est indiqué dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1. Classement de la chromite suivant leur utilisation [1]

Utilisation	Métallurgique	Chimique	Réfractaire	Fonderie
Éléments				
Cr_2O_3 (%)	> 46	> 44	30 - 40	44 min
Cr/Fe	> 3 / 1	> 1,5 / 1	> 2 – 2,5 / 1	-
SiO_2 (%)	< 10	< 3,5	6	4
Al_2O_3 (%)	-	-	25 -30	-
Fe_2O_3 (%)	-	-	-	2,6 max
CaO (%)	-	-	-	0,5
Physique	Hard / lumpy	Lumpy	Lumpy / friable	Fines

La production des produits exportés par la Société KRAOMA entre 1990 et 2002 est totalisée dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2. Production des produits exportés de la Société KRAOMA [5]

Année	Concentré (tonnes)	Rocheux (tonnes)
1990	49 000	103 500
1991	57 000	88 500
1992	64 800	91 700
1993	48 000	83 500
1994	37 600	47 500
1995	41 500	61 600
1996	51 500	81 600
1997	45 000	73 900
1998	19 000	73 900
1999	52 000	84 000
2000	30 900	87 800
2001	15 260	45 600
2002	2 830	7 900
Total en 13 ans	514 430	931 000

II. DÉCHETS DE LA CHROMITE

A tous les stades de traitement, il y a toujours des déchets dont la teneur en chromite dépend de l'efficacité de chaque traitement dans les usines et du triage pour les déchets de stock intermédiaire.

❖ Les déchets d'exploitation au stock intermédiaire [4]

L'estimation du stock intermédiaire pendant huit ans est évaluée dans le tableau 3 ci-après :
Tableau 3. Quantité des déchets du stock intermédiaire en huit ans.

Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	TOTAL en 8 ans
Rejets (m ³)	257200	224300	92700	62900	75400	9300	64600	128184	914 584

Les caractéristiques chimiques des déchets d'exploitation sont résumées dans le tableau 4 suivant :

Tableau 4. Caractéristiques chimiques des déchets d'exploitation

Élément	Teneur
Cr ₂ O ₃	17 %
FeO	10,19
P	260 ppm
Granulométrie	Gros blocs de quelques dizaines de cm à quelques m

On distingue deux types de déchets de traitement :

Les « rocheux » provenant de la liqueur dense, et les « fines » provenant des usines de déphosphoration et de la laverie.

Le tableau 5 suivant résume les caractéristiques des déchets de chaque unité de traitement :

Tableau 5. Caractéristiques des déchets provenant de chaque unité de traitement.

Élément	Stock intermédiaire	Liqueur dense	Table vibrante	Déphosphoration
Cr ₂ O ₃ (%)	17,23	6,55	21,69	22,4
FeO (%)	10,19	6,39	11,13	9,45
P (ppm)	260	216	na	na
Granulométrie	20 à 1000 mm	40 à 150 mm	200 à 1000 μ	200 à 1000 μ

❖ Les rejets par liqueur dense

L'estimation de tonnage des rejets par liqueur dense de 1994 à 2001 est regroupée dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6. Quantité de rejets par liqueur dense en huit ans

Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	TOTAL en 8 ans
Rejets (tonnes)	13 165	15 659	21 847	19 742	16 208	25	2463	11 367	100 476

La granulométrie des « rocheux » varie de 40 à 150 mm, alors que celle des fines de 200 à 1000 μ .

- ❖ En 2003, les rejets de traitement par liqueur dense s'élevaient à 170 000 m³ soit environ 270 000 tonnes,
- ❖ La quantité des déchets de la laverie en 34 ans (1969 à 2003) est estimée à 285 000 tonnes (16 à 25% en Cr₂O₃),
- ❖ Et les « fines » provenant de l'usine de déphosphoration calculées à 60 000 tonnes (22% en Cr₂O₃). [5]

Les différents constituants chimiques des déchets sont présentés dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7. Composition chimique des déchets à traiter [5]

Nom	Densité	Composition chimique	Dureté
Chromite	4,50 à 4,80	Cr ₂ O ₃ , FeO	7,3 à 7,8
Quartz	2,65	SiO ₂	7,0
Mica	2,00 à 3,00	Fluosilicate K, Mg, Fe, Mn	2,0 à 3,0
Apatite	3,20	Fluorophosphate Ca	5,0
Talc	2,60 à 3,00	Silicates Mg	1,0
Amphibole	3,00 à 3,30	Silicates Ca, Mg, Fe, F	5,5 à 6,0
Pyroxène	3,00 à 3,30	Silicates Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Al, F	5,6
Serpentine	2,50 à 2,60	Silicate Mg	2,5 à 3,5
Péridot	3,22 à 4,39	Silicate Fe, Mg	4,0
Monazite	4,80 à 5,50	Phosphate Ce, La, Y, Th	5,0 à 6,0

III. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS ÉTUDIÉS

Le traitement gravimétrique par liqueur dense est proposé pour ces types de déchets. Les déchets seront réduits à une granulométrie inférieure à 20 mm. Aussi, les déchets de stock intermédiaire subiront deux étapes de broyage suivi de criblage, tandis que les « rocheux » issus de la liqueur dense ne subiront qu'une seule étape pour obtenir la granulométrie inférieure à 20 mm.

L'organigramme des figures 1 et 2 (en annexe) est résumé comme suit :

- a. Le triage manuel des minerais qui consiste à éliminer les minerais ne contenant pas de chromite, nous permet de reconnaître la chromite par leur couleur noirâtre.
- b. Le concassage suivi du criblage à un diamètre inférieur à 20 mm, pour les rejets de la liqueur dense,
- c. Les déchets de stock intermédiaire subiront deux concassages. Le premier concassage réduit les gros blocs jusqu'à 150 mm, suivi d'un premier criblage. Le deuxième concassage traite les produits issus du premier concassage et seront criblés à moins 20 mm.
- d. Et enfin, une séparation par liqueur dense pour obtenir ce qu'on appelle « de petits rocheux ».

Les produits obtenus sont ensuite analysés pour évaluer la teneur finale en Cr₂O₃.

IV PARTIES EXPÉRIMENTALES ET ANALYSES

Les concasseurs de débit nominal de 25 t/h qui sont disponibles dans le site de traitement sont proposés pour le broyage de ces déchets. Mais les études ont été effectuées au niveau laboratoire pour la maîtrise des différents facteurs pratiques du broyage et du criblage.

Triage manuel

Les résultats du triage des deux types de déchets sont indiqués dans le tableau 8 ci-dessous

Tableau 8. Répartition des rejets

Rejets	Quantité	Stériles		Récupérables	
		Kg	%	Kg	%
Mine	50	14,26	28,52	35,74	71,47
Liqueur dense	50	25,10	50,20	24,90	49,78

Après le triage on a pu récupérer :

- ✚ 35,74 kg sur un échantillon de 50 kg de déchets d'exploitation, soit 71,47 %.
- ✚ Et 24,90 kg toujours sur un échantillon de 50 kg de déchets de traitement par liqueur dense, soit 49,78 %.

Les résultats des analyses chimiques se trouvent dans le tableau 9 suivant :

Tableau 9. Tableau comparatif des teneurs en Cr_2O_3 des rejets non triés et triés

Rejets	Teneur en Cr_2O_3	
	Non trié	Trié
Mine	17,23	30,83
Liqueur dense	6,55	25,29

D'après ce tableau, on voit que la teneur en Cr_2O_3 des rejets triés (récupérables) est supérieure à celle des rejets non triés. On en déduit que les déchets du stock intermédiaire et par liqueur dense s'enrichissent grâce au triage manuel. Cette opération, bien que laborieuse, est donc intéressante pour l'enrichissement des déchets.

a. Concassage/criblage

Le tableau 10 regroupe les résultats de l'étude granulométrique après le concassage et le criblage au tamis de 20 mm:

Tableau 10. Distribution des rejets par criblage

Rejets	Quantité	Crible diamètre 20 mm			
		Passé		Refus	
		Kg	%	Kg	%
Mine	35,74	31,87	89,17	3,87	10,83
Liqueur dense	24,90	21,24	85,30	3,66	14,70

D'après cette distribution, on constate que le pourcentage en masse du passé est supérieur à celui du refus.

La teneur en Cr_2O_3 du passé et du refus est groupée dans le tableau 11 ci-après :

Tableau 11. Résultats d'analyse du passé et du refus

	Teneur en Cr_2O_3 (%)	
	Passé	Refus
Mine	30,93	30,04
Liqueur dense	27,7	12,06

D'après ces résultats, la teneur en chrome du passé (27,7 %) est supérieure à celle du refus (12,06). On en déduit donc que la gangue (pegmatites, migmatite, gabbros...) se retrouve en général dans la tranche de calibre supérieure à 20 mm.

Pour les déchets du stock intermédiaire, on voit que le passé (89,17 %) et le refus (10,83 %) ont pratiquement la même teneur en Cr_2O_3 (30,93 % pour le passé contre 30,04 % pour le refus). Étant donné que le but de l'essai est de récupérer les concentrés de granulométrie inférieure à 20 mm, nous considérons le refus du crible 20 mm comme des déchets finaux.

b. Traitement par liqueur dense des rejets des rocheux

Les essais ont été réalisés sur des liqueurs ayant une densité de 3,2 à 3,5. Les résultats des essais se trouvent dans tableau 12 ci-après:

Tableau 12. Tableau récapitulatif des essais de densité (liqueur dense)

N° Essai	Densité	Alimentation (g)	Plongeants (g)	Flottants (g)	RP* (%)
1	3,2	1000	350	650	35
2	3,3	1000	250	750	25
3	3,4	1000	100	900	10
4	3,5	1000	5	995	0,5

RP* = Récupération en poids de chromite

La liqueur ayant la densité 3,2 a donné le meilleur résultat (35%). L'analyse de la teneur en Cr_2O_3 et en P a donné les résultats suivants : $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 34,02$ %, P = 140 ppm respectivement.

c. Traitement des déchets du stock intermédiaire

De la même manière que pour la liqueur dense, nous avons effectué les mêmes expériences avec les déchets de stock intermédiaire. Les résultats sont indiqués dans le tableau 13 suivant :

Tableau 13. Tableau récapitulatif des essais de densité (stock intermédiaire)

N° Essai	Densité	Alimentation (g)	Plongeants (g)	Flottants (g)	RP* (%)
1	3,2	1000	890	110	89
2	3,3	1000	800	200	80
3	3,4	1000	810	190	81
4	3,5	1000	850	150	85

RP* = Récupération en poids de chromite

La densité 3,2 a aussi donné le meilleur résultat (89%), mais les autres résultats restent significatifs en terme de quantité de plongeants (tous supérieurs à 80 %), c'est alors que nous avons procédé à l'analyse des quelques plongeants ($d = 3,2$ et $d = 3,5$).

Les résultats des analyses sont groupés dans le tableau 14 suivant :

Tableau 14. Récapitulatif des résultats d'analyse des plongeants (déchets stock intermédiaire).

Densité	RP (%)	Cr ₂ O ₃ (%)		P
		Alimentation	concentré	concentré
3,2	89	27,70	34,02	140
3,5	85	30,93	40,49	34

La liqueur de densité 3,2 donne un taux de récupération (RP) de 89 % et une teneur en Cr₂O₃ de 34,02.

Puisque les taux de récupération obtenus avec les quatre densités sont tous importants (80 à 89%), nous avons été amenés à étudier quelques essais pour les différentes densités en évaluant la teneur en Cr₂O₃ de chaque essai, mais aucun des essais n'a dépassé le seuil de 37 % de teneur en Cr₂O₃.

Ainsi la densité 3.5 a été donc retenue pour une récupération optimum de plus de 40,49 % en Cr₂O₃. Pour affiner, voire améliorer ce résultat, d'autres essais sont nécessaires afin de fixer au mieux les paramètres en conditions industrielles.

Les résultats globaux de l'enrichissement des deux types de déchets sont résumés dans le tableau 15 suivant :

Tableau 15. Bilan global d'enrichissement

Intitulé	Déchets stock intermédiaire	Déchets liqueur dense
Masse après triage manuel (kg)	1000	1000
Masse après concassage/criblage (kg)	318 (31,8 %)	212 (21,2 %)
Masse après traitement liqueur dense (kg)	239 (23,9 %)	74 (7,4 %)
Cr ₂ O ₃ (%)	40,49	34,02
P (%)	34	140

Conclusion :

D'après le tableau 3, on peut étudier le projet de traitement d'enrichissement des déchets d'exploitation et de liqueur dense cumulés pendant huit ans (1994 à 2001) à titre d'exemple. La quantité des déchets obtenus avant 1994 et après 2001 n'est pas du tout négligeable.

En tenant compte des hypothèses expérimentales précédentes, on pourrait envisager une production annuelle de « petit rocheux » à partir des deux types de déchets. Le tableau 16 ci-après récapitule les résultats de l'étude :

Tableau 16. Tableau récapitulatif du projet de traitement des déchets cumulés pendant huit ans d'exploitation.

Intitulé	Déchets stock intermédiaire	Déchets liqueur dense
Volume total des déchets au stock intermédiaire (m ³)	914 584	
Masse totale des déchets (tonnes)	2 700 000	100 000
Masse après triage manuel (tonnes)	1 900 000	85 000
Masse après concassage/criblage (kg)	604 000	21 000
Masse après traitement liqueur dense (kg)	450 000	7400
Cr ₂ O ₃ (%)	40,49	34,02
P (%)	34	140
Traitement journalier pour 25 t/ h à raison de 20 heures par jour (tonnes)	500	500
Traitement annuel à raison de 200 jours de travail (tonnes)	100 000	
Durée de vie du projet	4,5 ans	42 jours
Par extrapolation, durée de vie de l'ensemble des déchets cumulés en 40 ans	20 ans	1 an

CONCLUSION GÉNÉRALE

D'après les études effectuées, il serait possible d'enrichir les déchets des stocks intermédiaires de la mine ainsi que ceux issus de traitement à la liqueur dense. Le stock intermédiaire produirait des « petits rocheux » de dimension inférieure à 20 mm avec une teneur moyenne en Cr₂O₃ de 40.49 et en Phosphore de 34 ppm. Par contre les « petits rocheux » des rejets de la liqueur dense seraient moins riches en Cr₂O₃ (34,02 %) et plus riches en phosphore (140 ppm). Il suffirait de faire la promotion de ces produits auprès des clients utilisateurs pour pouvoir les vendre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAUD P., 1951, Traité de chrome minéral industriel, Tome 2, Edition Masson, Paris.
- [2] BESAIRIE H., Annales géologiques de Madagascar, gîtes minéraux de Madagascar, premier volume, fascicule N° XXXIV (texte), Service géologique de Madagascar.
- [3] KLÖCKNER Anlagen, 1982, Analyse diagnostique de l'exploitation des chromites d'Andriamena, Volume II.
- [4] MAMPIHAO, 1999, Synthèse sur la chromite de Madagascar, rapport KRAOMA.
- [5] RANJAKASOA A., 1991, Audit de traitement de minerais de chrome à la Kraoma, Mémoire de fin d'étude, ESPA.
- [6] RATEFIARISON A., RAMAMIARIVONY A., 1987, Étude d'extraction de composés de chrome à partir de la chromite, Mémoire de fin d'étude, ESPA.
- [7] ROUESSAC F., ROUESSAC A., 1994, Analyse chimique : méthodes et techniques instrumentales modernes, deuxième édition, édition Masson.
- [8] SOFREMINES, 1995, Étude de mise en exploitation du gisement de Bemanevika.

ANNEXES

Figure 1. Flowsheet du traitement du stock intermédiaire.

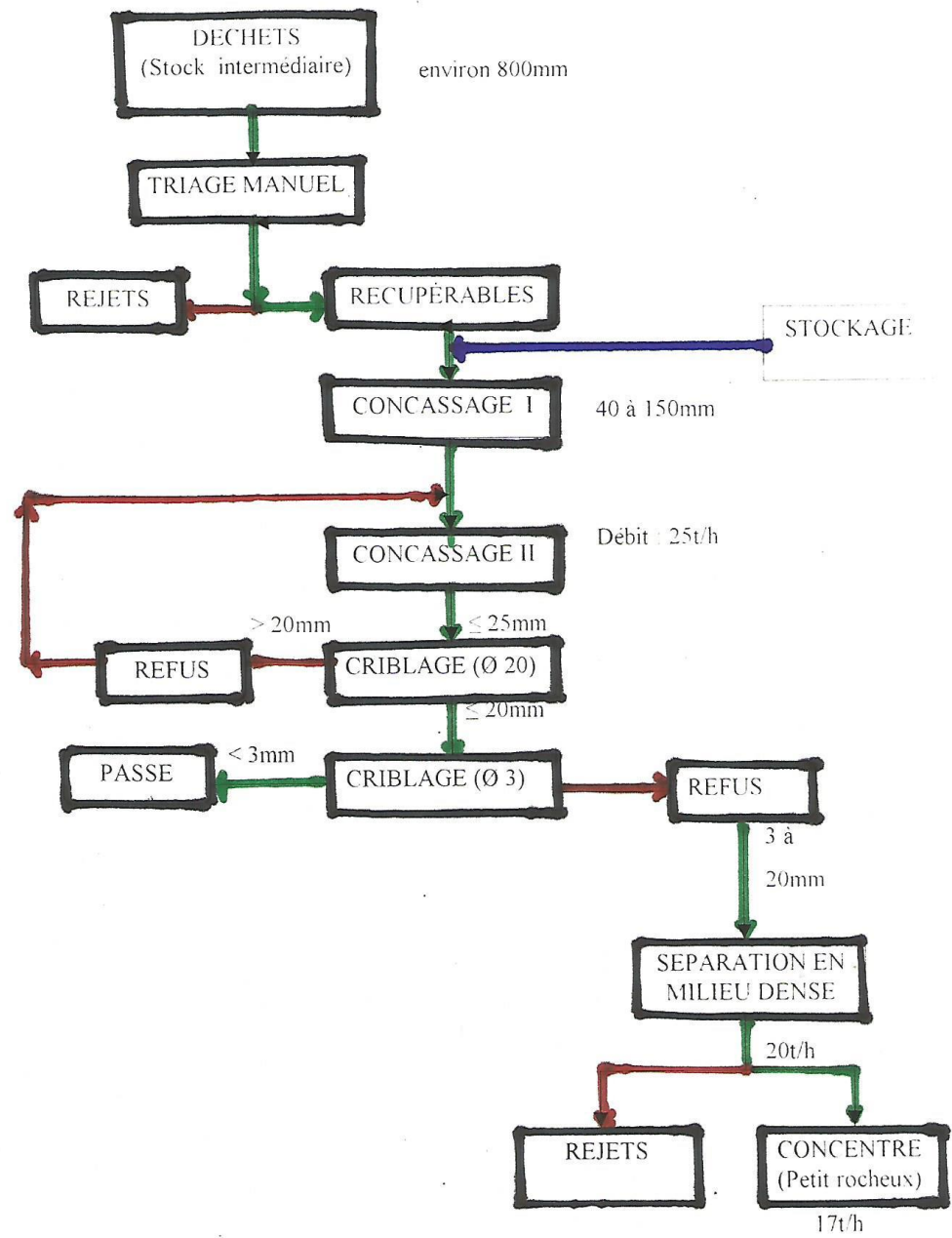
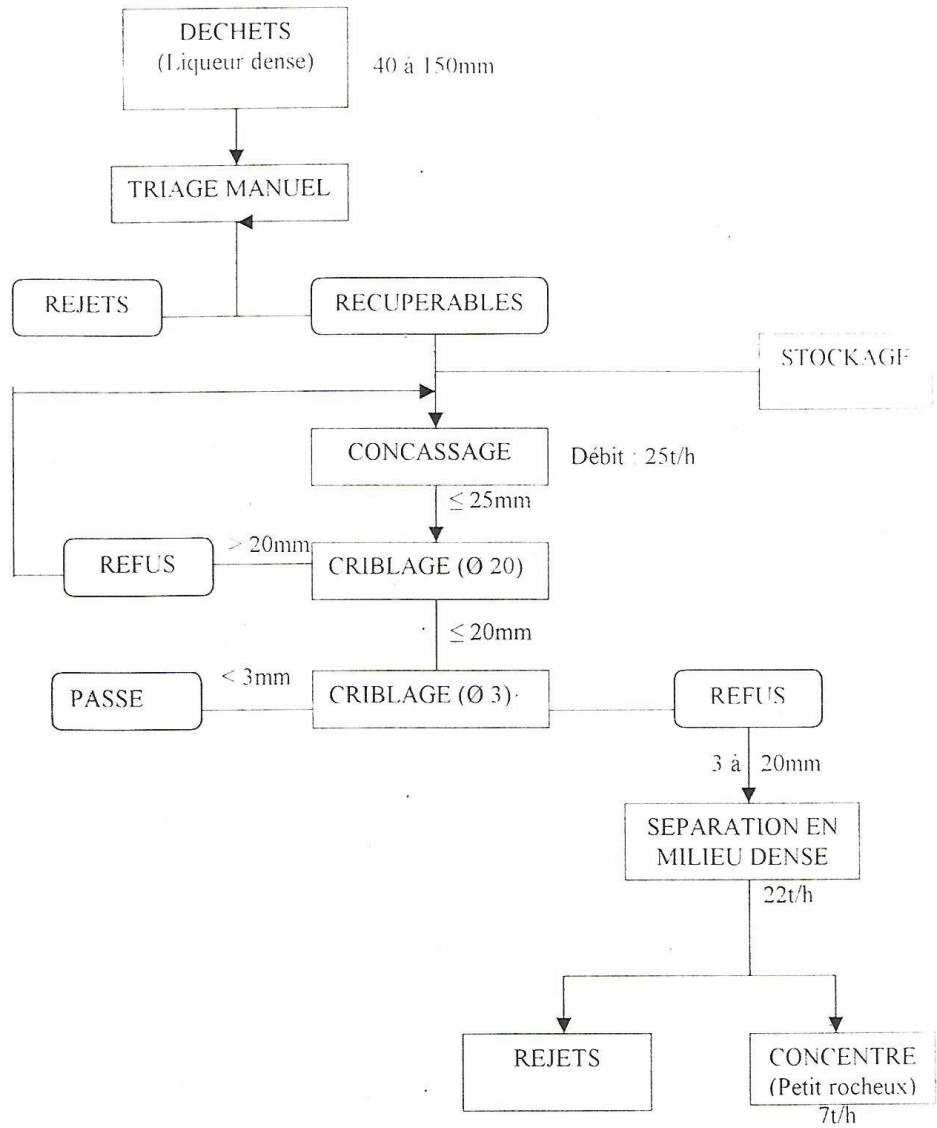


Figure n° 1 - Flow-sheet du traitement 2
(Stock intermédiaire)

Figure 2. Flowsheet du traitement des déchets issus de l'unité de traitement par liqueur dense.

Figure n° 2- Flow-sheet du traitement 1
(Déchets du traitement par liqueur dense)