



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

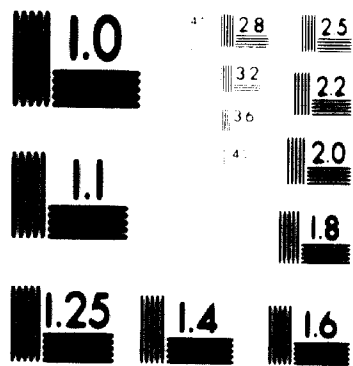
Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

1 OF 1



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

24x
F

01918 - F

RECUPERATION DE CUIVRE
ET D'OXYDE DE FER
A PARTIR DE CENDRES DE PYRRHOTINE

ETUDE DE PRATICABILITE

RAPPORT A

L'ORGANISATION DE DEVELOPPEMENT
INDUSTRIEL DES NATIONS-UNIES

NOVEMBRE 1971

70

64-211

01918-F

Maroc.

RECUPERATION DE CUIVRE ET D'OKYDE DE FER
A PARTIR DE CENDRES DE PYRRHOTINE

ETUDE DE PRATICABILITE

RAPPORT A L'ORGANISATION DE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL DES NATIONS UNIES

Décembre 1971

C-73323

Arthur D Little Inc.

AVANT-PROPOS

La compagnie Arthur D. Little désire remercier les personnes ci-dessous nommées, pour l'aide qu'elles ont apportée à l'élaboration de cette étude.

Monsieur F. Mofteh du BRPM, ainsi que ses associés, ont fourni une aide importante en nous donnant des renseignements sur le travail précédent et en cours, et en organisant la visite du complexe d'engrais de Safi.

Monsieur T. Dottridge, de la Mission du PNUD à Rabat, sous la direction de Mademoiselle Margaret Anstee, nous a beaucoup aidés en organisant les premiers entretiens et en nous fournissant des informations sur les investissements au Maroc.

Monsieur M. Micillo, Monsieur R.V. Elm, Monsieur L. Correa da Silva et le Docteur B.R. Nijhawan ont apporté une aide précieuse en nous fournissant des renseignements de contexte général pour le contrôle du contrat et la révision du texte à l'état d'ébauche.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
Avant-Propos	ii
Liste des Tableaux et des Figures	iv
SOMMAIRE	S-1
A. BUT ET ETENDUE	S-1
B. RESULTATS	S-1
C. CONCLUSIONS	S-4
D. RECOMMANDATIONS	S-4
I. INTRODUCTION	I-1
II. BUT ET ETENDUE	II-1
III. GENERALITES	III-1
A. DESCRIPTION DES PROCEDES	III-1
B. RESULTATS	III-2
IV. EVALUATION TECHNIQUE	IV-1
A. CRITERE ECONOMIQUE	IV-1
B. CHOIX DE LA METHODE	IV-2
V. LES PELLETS DE MINERAL DE FER	V-1
A. MARCHES ET PRIX DES PELLETS	V-1
B. QUALITE DES PELLETS	V-1
VI. LE CUIVRE	VI-1
A. RECUPERATION DU CUIVRE	VI-1
B. MARCHES ET PRIX DU CUIVRE	VI-2
C. QUALITE DU CUIVRE	VI-3
VII. EVALUATION ECONOMIQUE	VII-1
A. INTRODUCTION	VII-1
B. ELIMINATION DU SOUFRE	VII-1
C. L'USINE PROPOSEE	VII-5
ANNEXE A - ELIMINATION DE LA SILICE	A-1
ANNEXE B - FRAIS DE TRANSPORT	B-1
ANNEXE C - BIBLIOGRAPHIE	C-1

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau N°</u>		<u>Page</u>
III-1	RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS DE DECUIVRAGE	III-3
III-2	RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS D'ELIMINATION DU SOUFRE ET DE LA SILICE	III-4
VII-1	DESOUFRAGE DES CENDRES PAR GRILLAGE EN LIT FLUIDISE	VII-3
VII-2	DESOUFRAGE DES CENDRES PAR FLOTTATION ET SECHAGE	VII-4
VII-3	FRAIS D'INVESTISSEMENT LIMITES A L'UNITE DE DESOUFRAGE PAR FLOTTATION	VII-10
VII-4	FRAIS D'INVESTISSEMENT POUR L'UNITE DE SECHOIRS ROTATIFS	VII-11
VII-5	FRAIS D'INVESTISSEMENT POUR LA SECTION KOWA SEIKO DE PRODUCTION DE CUIVRE ET DE PELLETS D'OXYDE DE FER	VII-12
VII-6	RECAPITULATION DES FRAIS D'INVESTISSEMENT	VII-13
VII-7	FRAIS D'EXPLOITATION	VII-14
VII-8	RECAPITULATION DE LA PROFITABILITE	VII-17
VII-9	RECAPITULATION DE LA PROFITABILITE - 40 % CAPITAUX PROPRES	VII-18
A-1	COUTS SUPPLEMENTAIRES POUR L'ELIMINATION DE LA SILICE PAR FLOTTATION	
A-2	ECONOMIE DE L'ELIMINATION DE LA SILICE PAR LA FLOTTATION	

LISTE DES FIGURES

<u>Figure N°</u>		<u>Page</u>
1	DIAGRAMME SCHEMATIQUE DE L'USINE PROPOSEE POUR LA PRODUCTION DE PELLETS DE MINERAI DE FER ET DE CUIVRE DE CEMENTATION	VII-7
2	DIAGRAMME DE TRAITEMENT DES CENDRES DE L'INSTALLATION DE L'USINE DE TOBATA (PROCEDE KOWA SEIKO)	VII-8

SOMMAIRE

A. BUT ET ETENDUE

Les opérations de fabrication d'acide sulfurique à Safi (Maroc) créent un stockage sans cesse croissant de cendres de pyrrhotine grillées. A la fin de 1975 ce stockage contiendra :

- a 2 millions de tonnes de cendres à haute teneur en silice (12 %)
- e 1,2 millions de tonnes de cendres à basse teneur en silice (3 à 4 %)
- e auxquelles s'ajoutera une production continue annuelle de 300.000 tonnes de cendres à basse teneur en silice (3 à 4 %).

En sus d'oxyde de fer et de silice, les cendres contiennent du cuivre (0,8 %) et du soufre (1,5 à 4 %) et, de ce fait, ne peuvent être utilisées pour alimenter des hauts-fourneaux. Le Bureau de Recherches et de Participation Minières (BRPM) a examiné la technologie disponible pour convertir les cendres en un mélange à basse teneur en soufre, en cuivre et en silice, destiné à alimenter des hauts-fourneaux et en même temps, pour récupérer le cuivre et, si possible, les métaux non ferreux.

Arthur D. Little, Inc. (ADL) a évalué la praticabilité technique et économique de la récupération de cuivre et d'oxyde de fer, à partir des cendres de Safi. Nous avons évalué le travail expérimental effectué par le BRPM et autres organismes. Après avoir sélectionné un procédé pour le traitement des cendres, nous avons estimé les coûts et d'opération et les investissements. La profitabilité globale a été déterminée à partir de ces coûts et d'un examen des marchés et des prix pour le cuivre et les pellets d'oxyde de fer.

B. RESULTATS

1. Marchés

- a Nous avons trouvé que les pellets d'oxyde de fer, produites au rythme de 400.000 à 500.000 tonnes par an, pourraient se vendre sans difficulté sur les marchés européens dans la mesure où elles sont conformes aux spécifications chimiques et physiques requises.

- Pour le proche futur, les pellets de minerais de fer à basse teneur en silice (moins de 6 %), riches en fer (64 à 65 %) peuvent justifier d'un prix de 0,24 U.S. dollars par unité,* livrés ports européens, alors que des pellets riches en fer (61 % Fe) et plus riches en silice (jusqu'à 8 %) pourraient se vendre environ 23 dollars américains par unité.
- Le cuivre pourrait se vendre sous forme de barres à fil, cathodes, soufflures ou cuivre de cémentation. Ces produits se vendent à des prix variables, rapportés au prix de la barre. Dans l'avenir immédiat la barre pourrait espérer un prix de \$1,10 par kilogramme. Pour des raisons techniques et économiques, nous pensons que la façon la plus logique de vendre le cuivre serait sous forme de cuivre de cémentation dont le prix de vente est d'environ \$0,18 par kilogramme moins cher que la barre, mais il serait de commercialisation plus aisée.

2. Techniques

- Des six procédés étudiés (Kowa Seiko, DKH, LDK, CEEI, Montecatini et l'attaque acide) seuls les procédés d'attaque acide, Kowa Seiko et DKH ont été utilisés à l'échelle commerciale. Parmi ces 3 procédés commerciaux, le procédé Seiko est le seul qui ait produit, à partir de cendres de pyrrhotine, des agglomérés ayant une teneur en cuivre assez basse pour l'alimentation des hauts-fourneaux.
- Aucun essai n'a été fait sur la récupération du cuivre après son extraction des cendres. Cependant, la récupération du cuivre par cémentation est un procédé industriel standard qui devrait présenter peu de difficulté, ce qui ne dispense pas de procéder à des essais avant de l'incorporer à une installation commerciale.
- Les caractéristiques physiques des pellets produites par le procédé Kowa Seiko respectent l'ensemble des spécifications requises pour l'alimentation de hauts-fourneaux. Cependant ce

* (1 unité = 10 kilogrammes de Fe)

procédé exige des cendres contenant moins de 0,6 % de soufre de sorte que les cendres de Safi devraient être traitées afin d'éliminer le soufre pour pouvoir être utilisées.

- Le procédé Kowa Seiko a produit avec succès du cuivre de cimentation, ainsi que le prouve l'exploitation commerciale de Tobata, au Japon.
- L'extraction minière de pyrrhotine (SEPYK) de Safi vient de commencer à fournir un concentré à basse teneur en silice. Le soufre résiduel peut être retiré de ces cendres par flottation ou nouveau grillage. Donc, les cendres basées en soufre (0,6 %) et en silice (6 %) requises par le procédé Kowa Seiko peuvent être obtenues maintenant.

3. Economique (a)

- Le soufre peut être réduit à moins de 0,6 % par le regrillage des cendres mais l'étude préliminaire effectuée par le BRPM indique que l'on peut le retirer d'une façon beaucoup économique par flottation.
- Une usine de pellets qui utiliserait principalement la cendre riche en silice couramment stockée n'est pas une opération profitable dans les conditions technologiques actuelles.
- Une petite quantité de cendres riches en silice peut être mélangée à la cendre faible en silice sans pour cela affecter de façon très nette ni l'acceptabilité et la qualité des pellets d'oxyde, ni la récupération du cuivre.
- Une usine productrice de cuivre et de pellets, suivant le procédé Kowa Seiko, à partir des cendres mélangées peut donner un taux de rémunération du capital (cash-flow actualisé), allant de 17,9 % (100 % capitaux propres, amortissement sur 10 ans, sans remise d'impôts) à 26,5 % (40 % capitaux propres, peu d'impôts pendant 5 ans, amortissement accéléré en 5 ans).

(a) Tous les coûts mentionnés dans ce rapport sont en dollars et en cents américains, tenant compte des conditions de Juillet 1971 ; toutes les références aux tonnes sont en tonnes métriques de 1.000 kilogrammes.

- Environ 30 % des revenus produits par le traitement des cendres de pyrrhotine proviennent du cuivre récupéré et environ 70 % des pellets d'oxyde de fer.

C. CONCLUSIONS

- Les résultats de cette étude préliminaire montrent qu'une usine intégrée (procédé Kowa Seiko) de récupération du cuivre et de pellets d'oxyde de fer, utilisant essentiellement la cendre de pyrrhotine basse en silice est à la fois économiquement et techniquement réalisable.
- Pour obtenir le meilleur taux de rémunération du capital, la capacité optimale de l'usine est d'environ 450.000 tonnes de pellets et d'environ 3.200 tonnes de cuivre par an. Une telle usine demanderait un investissement en capital de \$12,6 millions américains.
- Par suite du montant élevé des frais d'exploitation estimés, l'abaissement de la teneur en silice des cendres riches ne devrait pas être envisagée à l'heure actuelle. Il est possible que des essais pilotes supplémentaires modifient cet état de choses.

D. RECOMMANDATIONS

Si la BRPM voit cette entreprise sous un oeil favorable, nous recommandons qu'une équipe de projet soit organisée et serve de fer de lance pour la progression du projet. Les points clés qui méritent une attention particulière seraient :

- Déterminer les débouchés pour les pellets d'oxyde de fer et les prix de contrat en fonction de la teneur en silice afin que la taille de l'usine et la rémunération de l'investissement puissent être confirmés.
- Confirmer avec les acheteurs potentiels de pellets la quantité maximale de cendres riches en silice, pouvant être mélangée à la cendre pauvre en silice sans pour cela avoir les inconvénients d'un produit haut en silice. Ceci déterminerait alors la taille exacte de l'usine.
- Préparer la quantité nécessaire de pellets pour qu'elles puissent être évaluées par les acheteurs potentiels.
- Déterminer les débouchés pour le cuivre de cémentation, et

- confirmer les niveaux de valorisation indiqués dans ce rapport pour les ventes du cuivre.
- Démontrer la flottation du soufre sur une base continue et vérifier les frais d'exploitation et le capital estimés dans ce rapport pour cette extraction.
- Résoudre les questions d'engineering détaillées non résolues dans le corps du rapport : extraction du résidu NaCl, méthode d'addition du CaCl₂, rebroyage avant l'agglomération et séparation des métaux non-ferreux.
- Obtenir des devis et confirmer les investissements pour la construction de l'usine Kowa Seiko avec la flottation, pour la production de pellets d'oxyde et la récupération du cuivre.
- Négocier des contrats d'expédition pour les pellets et le cuivre de cémentation sur leurs marchés respectifs.
- Déterminer le méthode de financement de l'usine et envisager une participation éventuelle de Kowa Seiko en termes d'informations techniques qu'ils pourraient contribuer au projet.
- Nous ne pensons pas qu'un travail plus approfondi sur le raffinage du cuivre de cémentation pour obtenir par calcination des qualités électrolytiques ou raffinées soit justifié en ce moment, du fait de problèmes importants de contrôle de qualité et de considérations économiques. Cependant, ceci devrait être ré-évalué s'il y a une augmentation importante dans la consommation locale de cuivre de qualité plus basse.

I. INTRODUCTION

Les opérations de fabrication d'acide sulfurique, dans le complexe intégré d'engrais de Safi, au Maroc, sont fondées sur le grillage oxydante de pyrrhotine. La pyrrhotine est extraite à l'intérieur des terres, à Kettara et transportée par camion sur 40 kilomètres et par chemin de fer sur 100 kilomètres, jusqu'à l'usine d'engrais située sur la côte, à Safi. Depuis le milieu des années 1960 et l'entrée en service des fours de grillage, les cendres résultantes ont été stockées sur les lieux. Ces cendres consistent essentiellement d'oxyde de fer (Fe_2O_3) de teneur en cuivre assez importante (0,8 %). L'inventaire actuel de ces cendres qui sont riches en silice (12 à 15 %) se monte à 2 millions de tonnes environ. En plus de la silice et du cuivre, les cendres contiennent du soufre (2 à 4 %) ce qui les rend indésirables en tant que matière première pour la fabrication d'agglomérés pour hauts-fourneaux.

A partir de cette année, la pyrrhotine subira un traitement d'amélioration pour produire un concentré contenant plus de 30 % de soufre. Cette pyrrhotine améliorée sera grillée pour produire des cendres contenant approximativement 1,5 à 2 % de soufre et 3 à 4 % de silice. Des modifications dans la méthode de grillage ont été apportées dans le but de réduire le soufre à des niveaux bas et réguliers.

L'accord d'achat entre le complexe d'engrais (Maroc Chimie) et la mine (Société d'Exportation de Pyrrhotine de Kettera : SEPYK dont le Bureau de Recherches et de Participation Minières détient une participation) est basé sur une formule qui rattache la valeur du soufre contenu dans la pyrrhotine, aux prix du soufre élémentaire livré à l'usine. Maroc Chimie paie le soufre que renferme la pyrrhotine et la propriété des cendres grillées est conservée par SEPYK.

Les cendres riches en soufre, en cuivre et en silice ne peuvent être utilisées pour la fabrication de l'acier en haut-fourneau pour les raisons suivantes : le cuivre a un effet nocif sur les propriétés physiques de l'acier, sauf dans certaines formules d'alliages particuliers où le cuivre est ajouté intentionnellement. L'absence de procédé économique d'extraction de cuivre de la fonte de haut-fourneau rend le cuivre indésirable dans toute matière première pour la fabrication de fonte et d'acier.

On peut certes éliminer le soufre par épuration du laitier dans le haut-fourneau, mais cela demande une grande quantité de laitier et donc plus de coke pour chaque tonne de fer produit. La tendance moderne dans l'opération de haut-fourneau est vers une diminution des quantités de laitier et des proportions de coke plus faibles, ce qui demande une charge uniforme faible en impuretés. En conséquence, le niveau du

soufre dans les matières premières de hauts-fourneaux a diminué d'une façon progressive.

Le BRPM a effectué des recherches intensives pour l'obtention de revenus supplémentaires pour les métaux ferreux et non-ferreux contenus dans les cendres. Depuis 1963, des études expérimentales ont été faites sur l'extraction du cuivre, du soufre et de la silice. Ces études sont décrites ci-après. Le but de ces recherches était de trouver des techniques d'extraction du cuivre, du soufre et de la silice (si nécessaire) pour convertir les cendres en un produit acceptable pour les hauts-fourneaux, tout en récupérant le cuivre. Le BRPM a particulièrement recherché une technologie confirmée pour la construction d'une unité pouvant transformer les cendres en des produits commercialisables.

Une telle unité aurait deux sortes de matières premières disponibles. La première est la matière riche en soufre et en silice actuellement stockée à Safi au volume d'environ 2 millions de tonnes. La seconde est une cendre faible en silice qui sera produite à partir des pyrrhotines améliorées dans le courant de l'année 1971 à la cadence de 300.000 tonnes par an. A la fin de l'année 1972 approximativement 1,2 million de tonnes seront accumulées à Safi.

II. BUT ET ETENDUE DE L'ETUDE

Arthur D. Little, Inc. a entrepris, pour le compte de l'UNIDO, de faire une évaluation indépendante du travail effectué jusqu'à présent par le BRPM et d'examiner la viabilité économique des différents procédés étudiés par cette organisation pour le traitement des cendres de pyrrhotine. Notre étude traite les points suivants :

- Analyse des résultats des essais de décuivrage des cendres de pyrrhotine et de récupération du cuivre.
- Evaluation des propriétés des pellets d'oxyde de fer -- si elles sont produites à partir d'un résidu riche en fer.
- Estimation de la valeur commerciale du produit aggloméré.
- Recommandations concernant le choix d'un procédé optimum pour le traitement des cendres.
- Recommandations concernant des essais supplémentaires si ces derniers sont jugés nécessaires.
- Evaluation de l'ensemble de la praticabilité technique et économique d'un complexe intégré, basé sur la récupération de métaux ferreux et non-ferreux dans les cendres de Safi.

Nous avons visité Rabat et Safi, au Maroc, pour recueillir des informations sur le travail effectué par le BRPM et sur l'état des travaux actuels, les facteurs de disponibilité et de coût des matières premières, les installations et l'exploitation des fours de Safi. Les rapports et les renseignements obtenus sur les lieux ont été examinés et analysés par notre personnel de Cambridge. Les marchés et les prix des pellets d'oxyde de fer et du cuivre de cémentation ont été déterminés, compte tenu de notre longue expérience, des informations en notre possession et d'entretiens avec les spécialistes de marché de minerai de fer et métaux. En même temps, les coûts de transport obtenus de diverses sources furent évalués et vérifiés. A partir de tous les renseignements disponibles, les frais de capitaux et d'exploitation ont été estimés pour les procédés choisis et la profitabilité d'une usine de traitement des cendres de pyrrhotine à Safi fut évaluée.

III. GENERALITES

Dans ce chapitre, nous présentons un sommaire et une analyse des travaux expérimentaux faits par et pour le BRPM dans plusieurs pays sur les cendres de pyrrhotine de Sefi.

Une évaluation de ce travail expérimental est présentée dans le chapitre suivant.

A. DESCRIPTION DES PROCÉDES

Le BRPM a commencé l'étude pour déterminer l'applicabilité de plusieurs procédés de découvrage des cendres. Excepté le procédé DKH, tous ces procédés traitent la récupération du cuivre par cémentation à l'aide de ferrailles. Les procédés suivants ont été considérés :

- Le procédé DKH : Calcination chlorurante des cendres avec du chlorure de sodium (NaCl) dans des fours multiples, suivie par une attaque à l'acide. Le résidu pauvre en cuivre est aggloméré par frittage. Une partie du cuivre attaqué est alors récupérée par la réaction suivante : $2 \text{CuCl} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$, le reste par cémentation.
- Le procédé LDK : Mise en pellets des cendres suivie de séchage et de durcissement dans un four tunnel. Le cuivre est enlevé par un traitement de chlore gazeux dans le haut-fourneau et récupéré par cémentation.
- Le procédé Montecatini -- Le cuivre est retiré des cendres par traitement au chlore gazeux en lit fluidisé. Le produit exempt de cuivre est alors aggloméré.
- Le procédé CEEI -- Le cuivre est retiré des cendres par une solution pulvérisée de chlorure ferreux en lit fluidisé. Le produit exempt de cuivre est alors aggloméré.
- Le procédé Kowa Seiko -- Les cendres sont mélangées à du CaCl_2 puis mises en pellets. Le chlorure de cuivre est éliminé au cours du durcissement en four tournant, la récupération du cuivre est accomplie par cémentation.
- L'attaque à l'acide -- Les cendres sont attaquées par un mélange d'acide sulfurique et d'eau de mer. Le cuivre est récupéré par cémentation.

Une certaine quantité de soufre est également retirée des cendres durant le traitement de décuivrage. La flottation et la calcination ont été étudiées tout particulièrement pour le désoufrage.

Les procédés suivants ont été étudiés pour enlever la silice.

- Le procédé Montecatini -- Les cendres d'hématite sont réduites en magnétite dans un lit fluidisé. La silice est rejetée par broyage et séparation magnétique.
- Flottation -- L'hématite est mise en flottation avec un collecteur à base de sulfonate, en milieu acide, tandis que la silice est mise en flottation avec un collecteur cationique en milieu basique.

2. RESULTATS

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux III-1 et III-2. Parmi les procédés de décuivrage, les procédés DKH et l'attaque acide n'ont pu réussir à réduire le cuivre au niveau désiré dans les cendres. Le procédé LDK est capable de décuivrer les cendres, mais les caractéristiques physiques des pellets d'oxyde de fer sont peu satisfaisantes. Les procédés LDK, Montecatini et CEEI n'ont pas été essayés à une échelle commerciale. Seul le procédé Kowa Seiko a produit des pellets d'oxyde de fer de très bonne qualité, suffisamment pauvres en cuivre et en soufre. Cependant, le procédé requiert une charge à teneur en soufre inférieure à 1 % (de préférence au-dessous de 0,6 % S).

Deux procédés de séparation du soufre, le regrillage et la flottation, ont été utilisés avec succès. Ces deux procédés ont fait leurs preuves. Marcona, au Pérou, utilise la flottation pour la séparation du soufre des oxydes de fer.

Parmi les procédés de séparation de la silice, le procédé Montecatini et le procédé de flottation d'hématite semblent être techniquement possibles au vu des essais de laboratoires. Mais la flottation ne peut faire descendre le taux de silice contenu dans les cendres au-dessous de 9 %.

Aucun essai n'a été effectué sur la récupération du cuivre après son élimination des cendres. La récupération du cuivre, pour tous ces procédés, se ferait par cémentation, une méthode industrielle standard qui ne devrait rencontrer aucune difficulté sérieuse, bien qu'elle devrait être essayée avant d'être mise en service dans une installation commerciale.

TABIEAU III-1

RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS

<u>Procédé</u>	<u>Méthode</u>	<u>Produit</u>	<u>Type d'Essai</u>	<u>Cendres de Safi Traitées</u>	<u>Te sp</u>
Procédé Duisburger Kupferhütte (DKH)	Calcination chlorinante (NaCl) suivie d'attaque	Fines	Continu	1000 tonnes	
Lurgi Duisburger Kupferhütte (LDK)	Traitement au chlorure gazeux en four tunnel	Pallats	Continu	2300 tonnes	
Montecatini	Chlorure gazeux en lit fluidisé	Fines	Discontinué	1,5 kg échantillon	
Compagnie Européenne d'Équipement Industriel (CEEI)	Chlorure de fer pulvérisé en lit fluidisé	Fines	Continu	50 kg	
Kowa Seiko	Calcination chlorinante CaCl ₂	Pellats	Continu	80 tonnes	
Attaque Acide	Attaque des cendres au H ₂ SO ₄ et eau de mer	Fines	Discontinué	10 kg	

SECTION 1

TABIEAU III-1**LES RESULTATS DES ESSAIS DE DECUIVRAGE**

<u>Cendres de Safi Traitées</u>	<u>Teneur en Cuivre après Décuivrage</u>	<u>Résistance des Pellets</u>	<u>Principaux Inconvénients</u>	<u>Avantages Principaux</u>
1000 tonnes	Haute	Pas de pellets produits	Résidu riche en cuivre	Procédé commercialement éprouvé
2300 tonnes	Basse	Médiocre	Résistance des pellets médiocre	Essayé sur usine pilote de bonne taille
1,5 kg échantillon	Basse	Pas de pellets produits	Graves problèmes d'extrapolation des essais	Peut utiliser calcination réductrice et amélioration magnétique
50 kg	Basse	Pas de pellets produits	Graves problèmes d'extrapolation des essais	Peut utiliser calcination réductrice et amélioration magnétique
80 tonnes	Basse	Bon	Requiert extraction pré- liminaire du soufre (jusqu'à 0,6 % environ)	Procédé commercialement éprouvé
10 kg	Haute	Pas de pellets produits	Résidu riche en cuivre requiert extraction du soufre	Procédé commercialement éprouvé

SECTION 2

TABLÉAU III-2

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DES ESSAIS D'ÉLIMINATION DU SOUFRE
ET DE LA SILICE

<u>A. Élimination du soufre</u>	<u>Échelle des essais</u>	<u>Résultats</u>
1. Regrillage		
a. Kawa Seiko	80 tonnes	Réussi
b. CHEI	50 tonnes	Réussi
2. Flottation de sulfure	essai de laboratoire	Réussi
<u>B. Élimination de la silice</u>		
1. Procédé Montecatini	1,5 kilogramme	Réussi (4 % SiO ₂)
2. Flottation d'hématite avec sulfonate	essai de laboratoire	Réussi (4 % SiO ₂)
3. Flottation de silice avec amines	essai de laboratoire	Échec (9 % SiO ₂)

IV. EVALUATION TECHNIQUE

A. CRITERES ECONOMIQUE

Les différents procédés de récupération des valeurs cuprifères et en fer des cendres doivent répondre aux points suivants pour pouvoir être utilisés au Maroc.

1. Les produits doivent satisfaire des spécifications chimiques précises, définies par les marchés.

Les procédés DKH et d'attaque acide ne purent donner de cendres à teneur en cuivre assez basse pour être acceptables en tant que charge de haut-fourneau. Tous les autres procédés ont réussi à produire des cendres suffisamment pauvres en cuivre.

Les matières de charge pour haut-fourneau ont également des limitations quant à la teneur en silice. Les pellets de minerai de fer contenant plus de 8 % de SiO_2 , ne se vendent pas facilement. La teneur en silice requise des pellets ne dépasse pas 5 à 6 %. Ceci signifie que les cendres obtenues à partir de pyrrhotine améliorée peuvent être utilisées pour la mise en pellets sans passer par un traitement d'élimination de silice. Le stock de cendres anciennes exige, quant à lui, un traitement destiné à réduire sa teneur de silice de 12 à 15 %, à moins de 6 %.

Les spécifications pour le cuivre de cémentation sont en général peu sévères et il devrait être relativement facile de vendre la cuivre récupéré de cette manière.

2. Les produits récupérés doivent satisfaire des spécifications physiques particulières.

Seul le procédé Kowa Seiko, appliqué aux cendres désoufrées au-dessous de 1 % S (et de préférence 0,6 % S) a produit des pellets de minerai de fer de bonne résistance. On a pensé que le procédé LDK réussirait également à partir des cendres appauvries en soufre. Cependant, au cours de la deuxième série d'essais, les méthodes d'élimination du soufre avant découvrage n'étaient pas adéquates et les essais produisirent des pellets de minerai de fer de caractéristiques physiques à peine satisfaisantes. Les paramètres pour la production des pellets ou de frites de qualité physique adéquate n'ont pas été étudiés en détail pour les autres procédés.

Il n'y a pas de spécification de caractéristiques physiques pour le cuivre de cémentation commercial.

3. Le procédé doit être au point et avoir fait ses preuves à une échelle commerciale.

Seuls les procédés Kowa Seiko, LDK et les méthodes d'attaque acide répondent à ce critère. Les autres méthodes n'ont pas été exploitées à une échelle commerciale et leur choix pour une usine marocaine requerrait des efforts intensifs de développement plutôt qu'un transfert direct de technologie.

B. CHOIX DE LA METHODE

Seul le procédé Kowa Seiko respecte à peu près les critères ci-dessus mentionnés, mais il ne peut réussir qu'à partir de cendres de faible teneur en soufre. La présence de soufre est néfaste dans le procédé Kowa Seiko parce qu'il forme du sulfate de calcium par réaction avec le chlorure de calcium. Pendant le durcissement, les pellets atteignent apparemment une densité relativement élevée au moment où ils sont portés à la température de décomposition du calcium, ce qui entraîne une rétention du soufre, ou une désagrégation ou fissuration des pellets lorsque le soufre est expulsé.

On doit souligner qu'il existe, à Safi, deux sortes de matières de charge disponibles. La première est la cendre accumulée en stock, riche en soufre et en silice. Son volume s'élève à 2 millions de tonnes. Pour que cette charge puisse être employée dans la méthode Kowa Seiko, il est nécessaire que le soufre soit éliminé. Il est aussi nécessaire d'abaisser la teneur de silice pour produire des pellets de haute qualité commerciale, contenant environ 6 % SiO_2 , et ne dépassant pas 8 % de SiO_2 .

La deuxième sorte de charge est la cendre à faible teneur de silice qui peut être produite à partir de pyrrhotine améliorée, courant 1971, à la cadence d'environ 300.000 tonnes par an. Cette qualité de cendres n'exigerait qu'un désoufrage pour pouvoir être utilisée dans la méthode Kowa Seiko.

Bien que différents changements soient en cours à Safi, et ne permettent guère d'anticiper la teneur en soufre des nouvelles cendres (obtenues à partir de pyrrhotine améliorée), nous avons assumé dans le reste de cette étude que les cendres (les anciennes stockées aussi bien que les nouvelles) contiendront au moins 1,5 % de soufre et devront être traitées pour éliminer le soufre (jusqu'à 0,6 %) avant de subir le procédé Kowa Seiko. Si ces changements produisent des cendres contenant moins de 0,6 % de soufre, il ne sera pas nécessaire de retirer le soufre

et la méthode Kowa Seiko pourrait être appliquée directement et sans modification, au moins pour les nouvelles cendres.

En ce qui concerne les cendres stockées, de haute teneur en silice, nous ne pensons pas qu'il soit rentable d'en retirer la silice. Cependant, afin de profiter des économies d'échelle d'une usine plus importante, nous recommandons fermement de mélanger une certaine quantité de cendre riche en silice aux cendres pauvres (nouvelles). Toutefois, on ne peut aller trop loin dans ce sens car les pellets d'un contenu en silice supérieur à 6 % souffriront une pénalité et seront beaucoup plus difficiles à vendre.

V. LES PELLETS DE MINÉRAI DE FER

A. MARCHÉS ET PRIX DES PELLETS

Il y a une très grande demande en Europe pour les pellets de minéral de fer de haute qualité et la vente, jusqu'à un maximum de 500.000 tonnes par an, de pellets marocains de haute qualité ne poserait aucun problème. La consommation de pellets est à ses débuts en Europe et les charges ferreuses de hauts-fourneaux sont en grande partie constituées de minéral calibré et de frittés. En 1968, par exemple, les pellets représentaient environ 15 % et 3 % des charges ferreuses utilisées respectivement au Royaume-Uni et en Europe. Les producteurs européens ont employé des pellets de qualité supérieure et ont payé entre 1/2 et 1-1/2 cents U.S. par unité de fer, de plus que pour les frittés de qualité équivalente (Remarque : tous les prix des pellets sont donnés en cents américains par "unité de tonne métrique", c'est-à-dire 10 kilogrammes de fer contenu).

En 1968, les producteurs européens payaient de 22-1/2 à 23 cents par unité pour les pellets livrés dans les ports européens. Ce prix a quelque peu varié, mais sensiblement autour du même niveau jusqu'au milieu de l'année de 1970 où une insuffisance temporaire fit monter les prix jusqu'à 27-28 cents par unité. La crise s'est calmée et les prix commencent à baisser. Nos entretiens avec les spécialistes de marché pour le minéral de fer, nous font penser que les prix des pellets se stabiliseront entre 24 et 26 cents par unité, livré port européen. Nous nous sommes servi du chiffre de 24 cents par unité dans nos calculs. Un prix plus élevé pour les pellets augmenterait la profitabilité de l'entreprise.

B. QUALITÉ DES PELLETS

1. Critères chimiques

Les critères de qualité chimique visent la composition chimique et la réductibilité des pellets. La composition chimique des pellets produits à partir de fines concentrées est très uniforme. Des variations de la teneur en silice de 0,25 % maximum peuvent être obtenues sans mélange de concentrés compliqués avant la mise en pellets. Lorsqu'on emploie des oxydes de fer de sources non uniformes pour la mise en pellets, il est important que les installations de mélanges soient suffisamment développées pour atteindre le même niveau de qualité chimique que celui de pellets résultant de concentrés améliorés.

Les niveaux autorisés d'impuretés non-ferreuses dans les pellets sont régents par le procédé de fabrication du fer et par les impuretés trouvées dans la ferraille utilisée par l'aciériste. Les spécifications de pellets sont fixées de telle manière que l'aciériste puisse produire

un acier convenable à partir d'un mélange approprié de métal chaud sorti des hauts-fourneaux et de ferrailles. En Amérique du Nord et en Europe, les niveaux moyens autorisés d'impuretés dans les pellets varient d'une société à l'autre et dépendent largement de l'usage final. En Europe, on tend de plus en plus à négocier les contrats pour la vente de pellets ou de minerai, sur la base d'une composition déterminée compatible avec les autres matières premières achetées par l'aciérie.

Le contrat renferme des clauses de pénalités applicables en cas de variations par rapport à la composition déterminée. Pour la teneur en cuivre, la limite supérieure peut varier entre 0,03 et 0,05 % avec une pénalité allant de 10 à 25 cents par tonne pour chaque 0,01% d'excès de cuivre dépassant le niveau spécifié. Il en est de même pour le soufre dont les spécifications peuvent considérablement varier. Certains aciéristes acceptent des blocs de minerai riches en soufre (jusqu'à 0,5 % S) mais de tels taux ne peuvent être acceptés pour les pellets. Avec la tendance croissante vers les charges préparées et auto-fondantes les teneurs en soufre supérieures à 0,05 % ne peuvent être tolérées dans les pellets. Les limites acceptables des impuretés sont les suivantes :

Cu	0,03 - 0,05 %
Pb + Zn	0,2 - 1,0 %
S	0,01 - 0,1 %
P	0,01 %

La réductibilité se mesure d'après le taux d'enlèvement de l'oxygène sous des conditions standards : par exemple, la réduction des pellets à 1.000 °C en atmosphère à 40 % et 60 % de N₂, pendant une heure. En général, la critère de réductibilité pour les pellets n'est pas très important puisque les pellets sont plus réductibles que le minerai ou les frittés.

2. Critère physique

Les critères de qualité physique se rapportent à la résistance à froid et à chaud des pellets.

Le facteur de résistance à froid donne un indice de la façon dont les pellets supportent la manutention, le transport et le stockage. La résistance à froid est évaluée ordinairement par la résistance à la compression et les indices de chute des pellets. La résistance à la compression dépend du calibre des pellets et une résistance supérieure à plus de 200 kilogrammes pour un pellet de 8 mm x 12 mm est considérée comme adéquate.

Le facteur de résistance à chaud indique la résistance à l'effritement, à la désintégration et à la déformation pendant la réduction dans le haut-fourneau. Si le facteur de résistance à chaud est insuffisant, la perméabilité de la colonne de charge est affectée, diminuant la surface

de contact (gaz /solide) et la productivité. Cependant, il n'existe pas de méthode de laboratoire universellement acceptée qui prédise le rendement des agglomérés dans un haut-fourneau de grande capacité.

Alors que les essais en laboratoire de la résistance à chaud des pellets (par exemple, l'essai mis au point par le Docteur O. Burghardt en Allemagne, l'essai Lindar de dégradation, etc...) peuvent aider à identifier les pellets qui subissent un gonflement catastrophique ou qui se désintègrent sous la charge, des essais à grande échelle peuvent seuls définir avec exactitude la résistance à chaud des pellets. Pour cette raison, un grand nombre d'échantillons pour essai seront peut-être demandés avant qu'un fabricant d'acier accepte des contrats à long terme pour un nouveau pellet apparaissant sur le marché.

VI. LE CUIVRE

Les cendres de pyrrhotine de Safi contiennent une quantité notable de métaux non-ferreux, en particulier, la présence d'environ 0,8 % de cuivre. Les cendres contiennent des quantités plus faibles de zinc, de plomb, de nickel, de cobalt, d'or et d'argent. Il n'exista pas de méthode commerciale bon marché pour la récupération du cuivre seul, à partir des cendres de Safi. Afin d'être économiquement réalisable, la récupération doit s'exercer à la fois sur l'oxyde de fer et les valeurs cuprifères. Comme indiqué plus loin dans le tableau VII-8, la récupération de cuivre dans le traitement des cendres par le procédé Kowa Seiko peut produire approximativement 30 % du revenu total, les pellets d'oxyde de fer procurant les 70 % restants. Le cuivre est donc un co-produit important du procédé Kowa Seiko. Avec la capacité projetée de 450.000 tonnes par an de cendres grillées. 3.600 tonnes de cuivre contenu sont traitées par le procédé Kowa Seiko dont environ 90 % environ, ou 3.200 tonnes par an, seraient récupérées sous la forme de cuivre de cémentation.

A. RECUPERATION DU CUIVRE

Dans tous les procédés étudiés et testés par le BRPM, le cuivre et les autres métaux non-ferreux sont transformés en chlorures et obtenus à l'état de solution dilués. L'extraction du cuivre de telles solutions se fait presque invariablement par cémentation, c'est-à-dire par précipitation avec des ferrailles. Le procédé Kowa Seiko emploie la méthode de cémentation pour la récupération du cuivre. Cette méthode est très simple et peut être menée avec succès avec un minimum d'équipement et un personnel non spécialisé. Le procédé de cémentation donne une fine poudre contenant 70 à 90 % de cuivre, le reste étant de fines particules de fer (inattaqué), des matières (inertes) contenues dans la ferraille et une certaine quantité d'oxygène acquis par transformation du cuivre fraîchement précipité en oxyde de cuivre durant les manutentions.

La précipitation du cuivre en solution diluée avec le fer (cémentation) est connue depuis le 4^{ème} siècle au moins et est employée dans l'industrie de récupération du cuivre depuis le 16^{ème} siècle. La cémentation se fait dans des bacs, des lessiveurs recevant la suspension liquide par gravité, dans des tambours rotatifs ou des cornues dans lesquels on ajoute la ferraille. Les facteurs suivants sont importants dans les méthodes de cémentation industrielles :

- La présence d'acide libre dans les solutions, doit être limitée afin d'éviter une consommation excessive de ferraille,

ce qui est accompli en ajoutant du CaCO_3 à la solution dans la méthode Kowa Seiko.

- Une large surface exposée du fer est nécessaire pour une cémentation rapide.
- La vitesse de cémentation est augmentée par l'agitation de la solution.
- La vitesse est augmentée, jusqu'à un certain point, par une élévation de température.
- La présence d'ions ferriques dans la solution augmente la consommation de ferraille et est indésirable.

B. MARCHÉS ET PRIX DU CUIVRE

Le cuivre de cémentation est un produit très commercialisable tel que le serait le cuivre en ampoule*, obtenu par raffinage au feu du cuivre de cémentation et le cuivre cathodique obtenu par l'électrolyse du cuivre de cémentation ou en ampoule. Cependant, le cuivre de cémentation, le cuivre en ampoule, ou le cuivre cathodique exigent un traitement supplémentaire pour être transformé en barre à fil, la matière initiale usuelle dans la fabrication des produits de cuivre. Donc le cuivre de cémentation ou en ampoule devra être vendu à l'une des fonderies ou raffineries européennes (ou peut-être aux fonderies non-ferreuses fabriquant des alliages de base et moyenne qualité).

Une raffinerie locale au feu ou par électrolyse serait alimentée au rythme de 3.200 tonnes de cuivre par an, chiffre étant beaucoup plus bas que ceux que l'on rencontre généralement dans l'industrie primaire du cuivre. La structure de l'industrie du cuivre est telle que les bénéfices sont élevés dans l'extraction du minerai et dans la fabrication mais ne le sont pas pour les procédés intermédiaires de transformation. De ce fait, une petite usine destinée à transformer le cuivre de cémentation en une forme de cuivre primaire serait au mieux d'intérêt marginal.

Les prix des différentes qualités du cuivre sont généralement liés au prix de la barre. Nous pensons que dans l'avenir la barre à fil sera vendue au prix moyen de \$1,10 environ par kilogramme. Le cuivre est une commodité volatile et peut subir des variations de prix importantes à court terme. Nous estimons que le cuivre de cémentation peut être frappé d'un rabais d'environ \$0,18 par kilogramme par rapport à la barre à fil, livré raffinerie, et il y a plusieurs raffineries en Europe qui en achèteront à ces termes.

*blieters

C. QUALITE DU CUIVRE

Le cuivre de cémentation, tel qu'il est produit, a une trop haute teneur en fer pour être utilisé dans l'industrie des alliages du cuivre (laitons et bronzes). Dans le monde, les raffineries primaires de cuivre achèteront le cuivre de cémentation à peu près dans les mêmes conditions que les sulfures concentrés. Le cuivre de cémentation ainsi acheté par une raffinerie primaire n'a pas d'exigences de qualité. Une raffinerie primaire de sulfures concentrés peut accepter une petite quantité de cuivre de cémentation dans la charge du four (environ 5-10%) sans pour cela augmenter substantiellement la consommation de fuel. Il en résulte donc que la vente du cuivre de cémentation aux raffineries primaires avantage le vendeur. A la raffinerie, le cuivre de cémentation est soit mêlé aux concentrés et introduit dans le four à réverbère, soit placé directement dans un convertisseur pour être refroidi. Dans les deux cas, le cuivre de cémentation fait partie du cuivre en ampoule (blister) produit par la raffinerie.

La transformation du cuivre de cémentation en barre à fil de haute qualité exigerait probablement à la fois le raffinage au feu et le raffinage électrolytique. Les barres à fil doivent respecter plusieurs sortes de spécifications pour pouvoir être acceptées sur les marchés.

La qualité de la barre à fil se base sur: (1) sa pureté chimique, démontrée par sa conductivité électrique et (2) ses propriétés physiques, démontrées par sa possibilité d'étirage en fil fin (fil d'électroaimant). Le contrôle des propriétés physiques est difficile et ne peut être assuré que par des producteurs primaires possédant d'importantes installations de fusion automatisées. La température de refroidissement et la teneur en oxygène dans le métal jouent un rôle primordial dans la qualité et l'état de surface des barres à fil. Les défauts typiques des barres à fil sont: des bords rugueux causés par les vibrations de la machine à mouler, une mauvaise surface supérieure ("set") due à une teneur inadéquate en oxygène, des fissurations à chaud, des inclusions de chaux et une taille incorrecte. Pour ces raisons, nous ne recommandons pas actuellement la production de cuivre raffiné au feu et de cuivre électrolytique et nous croyons que la meilleure façon de récupérer les valeurs cuprifères est la vente sous forme de cuivre de cémentation.

VII. EVALUATION ECONOMIQUE

A. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons une évaluation économique des solutions de procédé retenues à la suite de l'évaluation technique, spécifiquement:

- Une comparaison de la flottation et de la calcination pour l'élimination du soufre des cendres;
- L'économie du traitement des cendres pauvres en silice et en soufre par la méthode Kowa Saiko; et,
- La rentabilité de l'usine de traitement des cendres proposée à Safi.

B. ELIMINATION DU SOUFRE

Il y a deux méthodes possibles pour réduire la teneur en soufre des cendres à environ 0,6%, niveau requis pour les charges employées dans le procédé Kowa Saiko.

1. Elimination du Soufre par Flottation

Le soufre, tout comme le fer et le sulfure de cuivre, peut être éliminé par la flottation en mousse, en utilisant le xanthate d'amyle comme collecteur. Le travail préliminaire, effectué par le BRPM sur les cendres stockées, indique que le taux de soufre peut être abaissé de 1,5-3% à 0,2-0,3% par broyage suivi de flottation en masse du sulfure. Le concentré de sulfure obtenu étant riche en cuivre et en soufre, il serait recommandé de le raser dans les grilleurs. Nous n'anticipons pas de problèmes techniques pour cette opération.

Les cendres sont de granulométrie relativement grossière et un broyage humide dans des broyeurs à billes doit être fait pour libérer les grains de sulfure non grillés des cendres. Pour obtenir une bonne mise en pellets sur un disque ou tambour d'agglomération, il sera nécessaire de broyer les cendres. De cette façon, l'étape de broyage fera partie du procédé dans l'un ou l'autre cas et n'imposera pas de pénalités économiques supplémentaires.

Cependant, cette méthode demanderait certaines modifications à la méthode établie du procédé Kowa Saiko. Il faudrait soit mélanger

une solution concentrée CaCl_2 avec le gâteau de filtrat humide event l'agglomération, soit sécher le gâteau et ajouter une solution de CaCl_2 pulvérisée sur les cendres chaudes. Cette dernière possibilité semble plus pratique et a été utilisée comme base pour l'évaluation économique. (Note: Il est possible qu'un broyeur à billes soit de toutes façons nécessaire pour le mélange et le pétrissage des cendres avant l'agglomération. Un broyage fait avant cette opération diminuerait l'énergie requise pour le pétrissage. Il est également possible que le pétrissage puisse s'effectuer d'une façon plus efficace dans un mélangeur à axe vertical. Cette alternative devrait être étudiée.)

2. Élimination du Soufre par Grillage

Le soufre contenu dans les cendres peut être éliminé en soumettant les cendres à une deuxième opération de grillage. L'apport de chaleur nécessaire à cette opération peut être obtenu facilement par combustion de fuel. Pendant les débuts de l'exploitation de l'usine Kowa Seiko de Tobate, des cendres stockées riches en soufre ont été regrillées dans des grilleurs à lit fluidisé type Dorr-Oliver, dans lesquels était injecté un coulis de concentrés de sulfure finement broyés. Cette méthode employait le soufre contenu dans les fines de concentré comme fuel pour le grillage des cendres grossières. Nos calculs indiquent que cette approche ne pourrait être appliquée au regrillage des cendres par suite des besoins très restreints d'acide sulfurique à Safi.

Dans le tableau VII-1, nous présentons un sommaire des frais d'investissement et d'exploitation pour une unité de désoufrage limitée à l'installation proprement dite, basée sur le grillage des cendres dans un lit fluidisé produisant 450.000 tonnes par an environ de cendres pauvres en soufre.

Les frais d'investissement comprennent l'équipement auxiliaire nécessaire pour l'opération en lit fluidisé tels que soufflantes et l'équipement d'aspiration des poussières. Nous avons supposé que les gaz perdus pauvres en soufre peuvent être évacués à l'atmosphère. Le coût de l'élimination du soufre par cette méthode est d'environ \$1,80 par tonne.

Dans le tableau VII-2, nous présentons le sommaire des frais d'exploitation et de capital pour l'unité de désoufrage basée sur une flottation et un séchage consécutif du gâteau de filtrat humide. L'investissement est limité à l'usine proprement dite, et contient le coût des installations de manutention des matériaux et des installations généralement associées à une unité de flottation tels que les convoyeurs, les bacs et les chargeurs, les pompes, les épaisseurs, les filtres et équipement similaire. Le coût du broyage et de la classification est exclu afin de pouvoir comparer les coûts de ce tableau avec ceux du tableau VII-1. Le coût du séchoir rotatif comprend celui de l'équipement d'aspiration des poussières. Le sommaire des frais d'exploitation comprend les frais supplémentaires causés par une plus grande quantité

TABEAU VII-1

REBOUVRAGE DES CENDRES PAR GRILLAGE EN LIT FLUIDISE

Base: Investissement au taux de U.S. \$4,40/tonne-an
450.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en soufre

	<u>Unité</u>	<u>\$/Unité</u>	<u>Unité/Tonne</u>	<u>\$/Tonne</u>
Fuel	Tonne	20,50	0,027	0,55
Eau	Tonne	0,04	1,0	0,04
Energie électrique	KWH	0,02	15,00	0,30
Main-d'oeuvre et avantages sociaux	Homme-Heures	0,40	0,13	0,05
Supervision	Homme-Heures	2,00	0,02	0,04
Frais généraux	100 % Main-d'oeuvre et supervision			0,09
Fournitures d'entretien à 4 % de l'investissement				0,18
				—
Frais d'exploitation directs				1,25
Amortissement - 10 ans				0,44
Taxes locales et assurances à 2,5 % de l'investissement				0,11
				—
FRAIS TOTAUX (A L'EXCLUSION DE L'INTERET SUR LE FONDS DE ROULEMENT)				1,80

TABLEAU VII-2

RECOURAGE DES CENDRES PAR FLOTTATION ET SECHAGE

Base: Investissement à \$2,30/tonne-an
\$450.000 tonnes/an de cendres puvres en soufre

	<u>Unité</u>	<u>\$/Unité</u>	<u>Unité/Tonne</u>	<u>\$/Tonne</u>
Fuel	Tonne	20,50	0,011	0,22
Eau	m ³	0,04	1,50	0,06
Energie électrique	KWH	0,02	5,50	0,11
Xanthate d'amyle	kg	0,77	0,12	0,09
Huile de pin	kg	0,33	0,05	0,02
Manutention supplémentaire de matériaux	Tonne	0,50	0,10	0,05
Main-d'oeuvre	Homme-Heures	0,40	0,125	0,05
Supervision	Homme-Heures	2,00	0,015	0,03
Frais généraux	100 X Main-d'oeuvre et supervision			0,08
Fourniture d'entretien à 4 X de l'investissement				0,09
Frais d'exploitation directs				0,80
Amortissement - 10 ans				0,23
Taxes locales et assurances à 2,5 X de l'investissement				0,06
FRAIS TOTAUX (A L'EXCLUSION DE L'INTERET SUR LE FONDS DE ROULEMENT				1,09

de cendree et le renvoi du concentré riche en soufre aux grilleurs. Le coût d'élimination du soufre est approximativement de \$1,09 le tonne, donc nettement inférieur à celui du découfrage des cendres par grillage. Nous avons donc choisi le procédé de flottation pour le découfrage des cendres.

C. L'USINE PROPOSEE

1. Introduction

Si l'on décide de construire une usine de traitement des cendres à Safi vers le milieu de 1972, trois années seront nécessaires pour les plans, l'engineering et la construction; l'usine pourrait donc fonctionner à plein rendement vers le milieu de 1975. Du milieu de 1971 au milieu de 1975, approximativement 1,2 millions de tonnes de cendres à basse teneur en silice (4 % de silice) obtenues à partir de pyrrhotine améliorée, auront été accumulées à Safi. L'usine de fabrication aurait trois sources de cendres, disponibles lors de son démarrage en 1975:

- 300.000 tonnes per an de cendres à basse teneur en silice (4 %);
- 1.200.000 tonnes de cendres stockées à basse teneur en silice;
- 2.000.000 tonnes de cendres stockées riches en silice.

Nous avons choisi une usine d'une capacité de 450.000 tonnes per an de pellete et 3.200 tonnes per an de cuivres de cémentation. Cette usine utiliserait 340.000 tonnes per an de cendres à basse teneur en silice provenant des grilleurs (y compris 300.000 tonnes/an de cendres de pyrrhotine améliorée et environ 40.000 tonnes/an de cendres provenant du recyclage du concentré de flottation riches en soufre), 100.000-120.000 tonnes/an de cendres provenant du stock de cendres à basse teneur en silice mélangées avec 30.000-50.000 tonnes/an de cendres stockées riches en silice. Ce mélange ferait diminuer le contenu en fer des pellets de 65 % Fe à environ 64 ou 64,5 % Fe. La récupération du cuivre de cémentation ne serait pas effectuée.

Dans 10 ou 12 ans, le stock de cendres à basse teneur en silice sera complètement employé, et environ 1,5 million de tonnes de cendres riches en silice resteraient disponibles. Nos estimations de coûts sont fondées sur une période d'amortissement de 10 ans. Nous pensons que l'opération d'élimination de la silice n'a pas encore été développée au point de pouvoir être incorporée actuellement dans une usine. L'annexe A présente une discussion détaillée des coûts estimés pour l'opération d'élimination du soufre. Nous supposons qu'entre temps le technologie d'élimination de la silice sera suffisamment développée pour pouvoir être utilisée dans une usine de production de pellets après consommation du stock de cendres à basse teneur en silice. L'usine alors complètement amortie pourrait, en variante, fonctionner à 75 % de sa capacité avec les seules cendres pauvres en silice produites en continu.

2. Description de l'Usine

La figure 1 montre un diagramme simplifié de l'usine comportant un désoufrage suivi du procédé Kowa Seiko. Les cendres provenant des grilleurs et les cendres récupérées des stocks à haute et basse teneur en silice seraient reçues dans des bacs. Comme les cendres employées dans le procédé Kowa Seiko ne peuvent contenir de chlorure de sodium, la méthode actuelle de refroidissement brutal de la décharge du grilleur avec de l'eau de mer devra peut-être être modifiée. Les autres solutions possibles sont soit une attaque du chlorure de sodium contenu dans les cendres avant la flottation, soit l'approvisionnement de Maroc Chimie en eau douce pour la trempe des cendres. Si l'eau de flottation ne doit pas être recyclée, il sera peut-être possible de dissoudre et d'éliminer le NaCl pendant la flottation, avec lavage final sur le filtre.

A leur sortie des bacs, les cendres seraient broyées en phase humide dans des broyeurs à billes et traitées par flottation en plusieurs étapes. Nous suggérons un broyage grossier avant l'étape de flottation en masse pour éviter les problèmes de filtrage et de décantation. Le diagramme détaillé pour le broyage et l'étape de flottation serait établi seulement après que des essais plus poussés auront été effectués par les laboratoires du BRPM.

Après enlèvement de l'eau, le concentré serait renvoyé aux grilleurs et les résidus seraient séchés dans un séchoir rotatif. La solution de CaCl_2 pourrait être pulvérisée dans le séchoir, ou sur les cendres chaudes à leur sortie du séchoir. Les méthodes possibles d'addition de la solution de CaCl_2 aux cendres devraient être étudiées.

La décharge du séchoir serait transportée par convoyeurs aux bacs de mélange de l'unité Kowa Seiko. Nous pensons que ces bacs sont nécessaires car le disque d'agglomération requiert une charge d'alimentation très uniforme. Le reste de l'usine serait basé sur le procédé Kowa Seiko, et comporterait le mélange et pétrissage des cendres, la mise en pellets dans un pelletiseur à disque, le séchage sur un tamis mobile, la calcination en four rotatif, le refroidissement et le stockage des pellets avant expédition. Un diagramme détaillé pour cette unité de l'usine, basé sur les procédures employées à l'usine de Tobata pour le procédé Kowa Seiko, est présenté dans la figure 2.

Les gaz perdus du four rotatif seraient lavés, épurés, déshumidifiés et relâchés dans l'atmosphère. La solution issue du lavage serait traitée essentiellement pour la récupération du cuivre. Les cendres de Safi contiennent également de petites quantités de plomb, de zinc, d'or, d'argent, de nickel, de cobalt et de manganèse. Ces métaux seraient récupérés pendant le traitement et la purification de la solution par le procédé Kowa Seiko. Un diagramme spécifique du traitement de cette solution devra être établi, basé sur les niveaux d'impuretés non-ferreuses contenues dans les cendres de Safi. Pour nos calculs de coût, nous n'avons pas tenu compte de crédits pour les sous-produits non-ferreux à l'exception du cuivre.

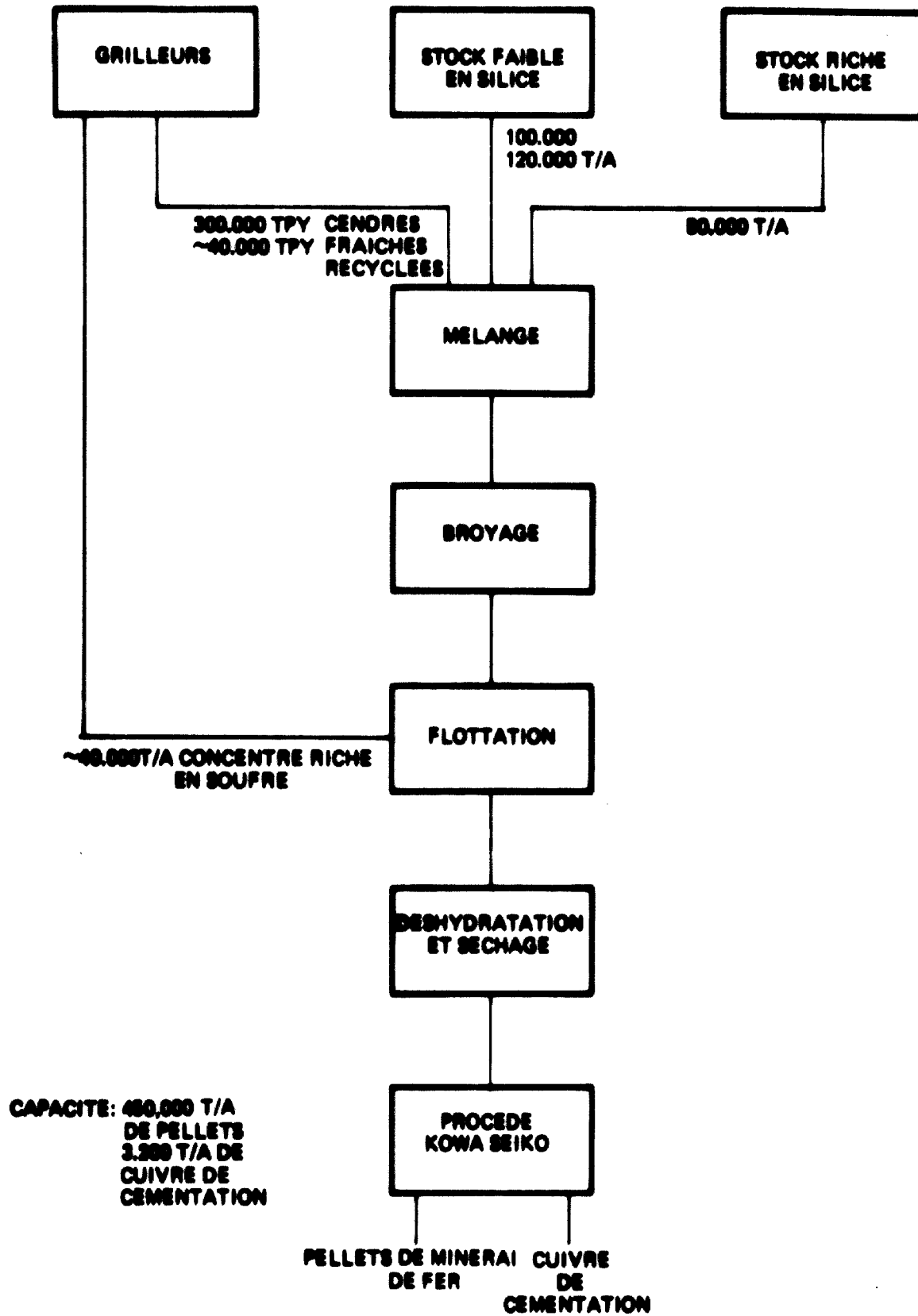


FIGURE 1 DIAGRAMME SCHEMATIQUE DE L'USINE PROPOSEE POUR LA PRODUCTION DE PELLETS DE MINERAL DE FER ET DE CUIVRE DE CEMENTATION

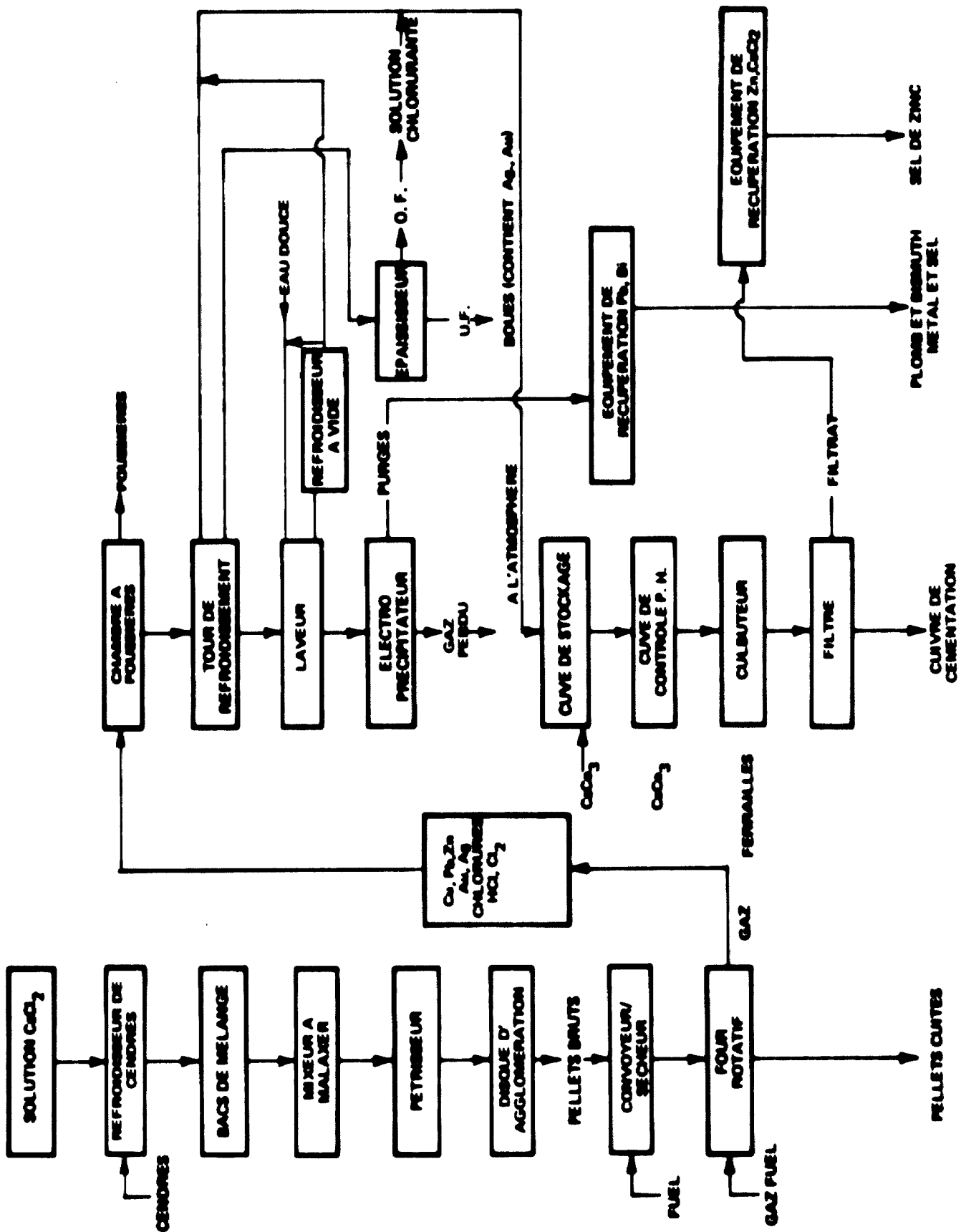


FIGURE 2 DIAGRAMME DE TRAITEMENT DES CENORES DE L'INSTALLATION DE L'USINE DE TOBATA (PROCEDE KOWA SEIKO)

3. Investissements

Les coûts pour l'usine proprement dite, y compris l'élimination du soufre, le séchage et les unités Kowa Seiko destinées à la production de cuivre et de pellets d'oxyde de fer, figurent dans les tableaux VII-3, VII-4 et VII-5, respectivement. Nous avons ajouté une taxe sur les importations de 16 % pour l'équipement qui devra être importé. L'investissement total de capital, compte tenu des installations supplémentaires de raccordement, celles hors site usine, les frais indirects sur chantier, les frais de construction et les frais extraordinaires figure dans le tableau VII-6 et s'élève à \$11.1 million pour l'usine produisant seulement des pellets d'oxyde de fer, et à \$12.6 million pour l'usine de pellets avec récupération du cuivre. Ce tableau comprend également les coûts de l'unité de découfrage et les dépenses anticipées pour des travaux supplémentaires sur le procédé Kowa Seiko.

4. Frais d'Exploitation

- a. Récupération du stock de cendres: nous avons assumé un coût de \$0.50 par tonne pour le ramassage à l'aide d'équipement des cendres stockées. Sur les indications BRPM, nous avons supposé que l'usine pouvait se procurer les cendres gratuitement.
- b. Broyage-Flottation-Séchage: les coûts de broyage et d'ueurs du métal sont basés sur des indices moyens correspondant aux matériaux traités. La demande en réactif pour la flottation provient du travail expérimental effectué par le BRPM.
- c. Kowa Seiko: les coûts de réactif, d'énergie, de fuel et de main-d'oeuvre sont basés sur les informations fournies par le BRPM. Le consommation d'énergie pour le broyage et le pétrissage a été ajustée pour tenir compte du broyage effectué avant la flottation.

5. Récapitulation de la Profitabilité

Le tableau VII-7 présente nos calculs de la profitabilité de cette entreprise pour la production de pellete avec et sans récupération de cuivre.

- a. Fonds de roulement: le fonds de roulement a été estimé sur la base d'un stockage d'un mois et demi de produit, et comprend les frais de fabrication, les frais d'exploitation, et une partie des frais fixes (environ \$520.000 pour les pellets et de \$106.000 pour le cuivre).
- b. Bénéfice: les pellets de minerai de fer contenant 64 % de fer se vendent à 0,24 dollars U.S. par unité, livraison

TABLEAU VII-3

FRAIS D'INVESTISSEMENT LIMITES A L'UNITE DE DESOUFRAGE PAR FLOTTATION

"BATTERY LIMITS"

(Milliers de dollars U.S.)

Capacité: 490.000 tonnes de cendres/an

Bacs	125
Convoyeurs	50
Broyeur à billes	756
Classification	8
Cellules de flottation	42
Pompes et lessiveurs	21
Epaississeurs	31
Filtres et Equipement associé	<u>17</u>
Frais d'équipement installé	1.050
Tuyautage et lessiveurs	238
Electricité	100
Peinture	7
Bâtiment	230
Equipement mobile de récupération du stock	<u>100</u>
COUT DE L'UNITE PHYSIQUE DE DESOUFRAGE	1.725

TABLÉAU VII-4

FRAIS D'INVESTISSEMENT POUR L'UNITÉ DE SÉCHOIRS ROTATIFS

(Milliers de dollars U.S.)

Capacité: 517.000 tonnes de gâteau de filtrat (humidité: 15 %)

Coût de l'équipement installé	200
Tuyautage et isolation	16
Electricité	30
Bâtiment	<u>40</u>

COUT DE L'UNITÉ PHYSIQUE DE SÉCHAGE 286

TABLERAU VII-5

FRAIS D'INVESTISSEMENT POUR LA SECTION KOWA SEIKO
DE PRODUCTION DE CUIVRE ET DE PELLETS D'OXYDE DE FER

(Milliers de dollars U.S.)

A. PRODUCTION DE PELLETS

Capacité: 450.000 tonnes de pellets/an	
Pré-traitement, pétrissage, séchage et calcination	2.470
Traitement au gaz	<u>600</u>
Coût de l'équipement installé	3.070
Tuyautage	460
Isolation	92
Electricité	307
Peinture	61
Bâtiment	<u>308</u>
Coût de l'unité physique de production de pellets	4.298

B. PRODUCTION DE CUIVRE

Capacité: 3.200 tonnes de cuivre/an	
Traitement en phase liquide (cémentation)	545
Tuyautage	82
Isolation	16
Electricité	53
Peinture	11
Bâtiment	<u>55</u>
Coût de l'unité physique de production de cuivre de cémentation	762
COUT TOTAL DE L'UNITE PHYSIQUE KOWA SEIKO	5.060

TABLEAU VII-6

RECAPITULATION DES FRAIS D'INVESTISSEMENT

(Milliers de dollars U.S.)

Capacité: 450.000 tonnes/an pellets
3.200 tonnes/an cuivre

	<u>Pellets seulement</u>	<u>Pellets et Cuivre</u>
<u>Coûts de l'Usine Physique</u>		
<u>Aux limites d'usine</u>		
Plottation: unité de désoufrage	1.725	1.725
Unité de séchage	286	286
Unité Kowa Seiko de production de pellets	4.298	4.298
Unité Kowa Seiko de récupération du cuivre	-	762
Installations d'entretien	38	40
<u>Installations de raccordement</u>		
Eau, pompage et distribution	44	50
Distribution de vapeur	18	20
Distribution d'électricité	44	50
Protection incendie	31	35
<u>Autres frais d'installations</u>		
Bâtiments	63	70
Cloture, routes, pavement, et tout-à-l'égout	<u>44</u>	<u>50</u>
Total des frais de l'usine	6.591	7.386
Ingenierie (13 %)	860	960
Frais indirects de chantier (12 %)	790	886
Commission de construction (7 %)	461	517
Provision pour frais extraordinaires (14 %)	923	1.034
Terrain, prix et préparation	370	400
Frais de développement	45	50
Frais de démarrage à 1/2 coûts pour 6 mois*	<u>1.060</u>	<u>1.350</u>
TOTAL	11.100	12.583

*Coûts basés sur les frais d'exploitation et une partie des frais fixes.

TABLEAU VII-7

FRAIS D'EXPLOITATION

					Milliers de \$ U.S./an	
Capacité: 450.000 tonnes de pellets/an 3.200 tonnes de cuivre de cémentation/an					Pellets seuls	Pellets et Cuivre
	<u>Unité</u>	<u>\$/Unité</u>	<u>Unité/ Tonne*</u>			
I.	Récupération du stockage	tonne	0,50	0,38	94,5	94,5
II.	Unités de broyage-flottation-séchage					
	Energie électrique	KWH	0,02	17,50	157,5	157,5
	Fuel	tonne	20,50	0,011	99,0	99,0
	Eau	m ³	0,04	1,50	27,0	27,0
	Xanthate d'amyle	kg	0,77	0,12	40,5	40,5
	Huile de Pin	kg	0,33	0,05	9,0	9,0
	Matières de broyage	kg	0,33	0,70	103,5	103,5
	Main-d'oeuvre	Hommes/heures	0,40	0,20	36,0	36,0
	Supervision	Hommes/heures	2,00	0,015	13,5	13,5
	Frais généraux - 100 % main- d'oeuvre et supervision		-	-	49,5	49,5
III.	Procédé Kowa Seiko					
	Energie électrique	KWH	0,02	60,00	490,0	540,0
	Fuel	tonne	20,50	0,061	567,0	567,0
	Eau	m ³	0,04	0,50	8,0	9,0
	CaCl ₂	kg	0,04	60,00	1.080,0	1.080,0
	Ca(OH) ₂	kg	0,01	11,00	49,5	49,5
	CaCO ₃	kg	0,004	40,00	-	72,0
	Ferrailles	kg	0,12	14,00	-	756,0
	Matières de broyage	kg	0,33	0,20	31,5	31,5
	Produits chimiques divers	kg	0,05	1,00	22,5	22,5
	Main-d'oeuvre	Hommes/heures	0,40	0,36	58,5	63,0
	Supervision	Hommes/heures	2,00	0,03	26,0	27,0
	Frais généraux - 100 % main- d'oeuvre et supervision				84,5	90,0
IV.	Fournitures d'entretien à 4 % de l'investissement				<u>444,0</u>	<u>504,0</u>
					3.491,5	4.441,5

* Tonnes métriques de pellets

ports européens. Nous nous sommes servi du chiffre de \$0,92 par kilogramme livré aux raffineries de cuivre européennes pour le cuivre contenu dans le cuivre de cimentation. Ceci correspond à un rebais de 18 cents par kilogramme sur le prix de la barre à fil qui est de \$1.10 par kilogramme. Ces rabais sont en harmonie avec les tarifs de vente du cuivre dans le monde entier. A partir de l'expérience acquise, nous supposons une récupération du cuivre de 90 %.

c. Frais de transport:

● Transport de l'usine au port (10 kilomètres):

Le BRPM a indiqué que le coût de transport per rail d'expéditions en masse varierait entre 0,35 et 0,59 dollar U.S. par tonne, ce qui a été confirmé par Maroc Chimie et correspond à notre expérience. Pour nos calculs nous nous sommes servi d'un prix de 0,50 dollars par tonne de pellette pour les transports per rail de l'usine au port.

● Stockage, ramassage et chargement: Ces coûts dépendent de l'échelle de l'opération. Nous avons retenu un prix de \$0,70 par tonne pour la mise en tas, le ramassage et le chargement des pellets.

● Expéditions par mer: A moins que des contrats spéciaux puissent être obtenus du Japon, la vente de ces pellets au Japon ne semble pas être la solution la plus profitable. En sus du coût élevé du transport per mer, il apparaît que le prix des pellets livrés au Japon (principalement d'Australis) est de plusieurs cents plus bas qu'en Europe. L'annexe B présente un résumé des frais de transport per mer établi pour l'expédition des pellets de Safi aux ports européens dans des navires d'une capacité de 21.000 tonnes. A partir de ces prix, nous nous sommes servi du chiffre de \$2,55 la tonne pour l'expédition des pellets aux ports européens.

● Les frais de transport seraient beaucoup plus élevés pour la faible volume de cuivre. Nous avons utilisé un chiffre moyen de \$0,05 par kilogramme pour l'expédition du cuivre de cimentation aux usines européennes. Ce chiffre couvre les frais de transport per cergo non spécialisé plus les transports per terre aux raffineries de cuivre européennes.

d. Frais fixes: Ils ont été estimés à partir des renseignements fournis par le BRPM et peuvent être trouvés dans la brochure "L'Investissement au Maroc" de juillet 1969, publié par le Centre de Promotion de l'Investissement du Gouvernement Marocain.

a. Amortissement: Bien que le Code de l'Investissement permette un amortissement accéléré deux fois plus rapide que le taux normal (c'est-à-dire 5 ans) nous avons employé un amortissement sur 10 ans pour cette usine.

La répercussion possible d'un amortissement accéléré est étudiée dans un chapitre ultérieur.

• Taxes et Assurances: A partir des chiffres obtenus du Centre de Promotion de l'Investissement Marocain, nous avons calculé que les taxes locales s'élevaient à environ 2 % de l'investissement auquel nous avons ajouté 0,5 % pour les assurances.

• Frais de commercialisation: Nous avons supposé que les frais de commercialisation s'élèveront à 0,5 % des ventes.

• Intérêt sur le fonds de roulement: Nous avons supposé que le taux d'intérêt était de 9 % pour le fonds de roulement.

• Intérêt sur le capital emprunté: Tous les calculs de rentabilité, dans cette étude, sont basés sur 100 % de capitaux propres à l'exclusion du tableau VII-9. Dans le tableau VII-9 nous nous sommes servi des mêmes données de coûts que dans le tableau VII-8 excepté que le financement est basé sur un emprunt de 60 % (à 9 % d'intérêt annuel) et sur 40 % de capitaux propres. La rentabilité des capitaux propres croît de 17,9 % à 26,4 %. Les frais financiers moyens ont été calculés en prenant la dette résiduelle moyenne sur une période de 10 ans et en la multipliant par le taux d'intérêt.

e. Taxes: La taxe sur les bénéfices d'entreprises est de 48 % du bénéfice brut. A notre connaissance il n'y a pas d'autres impôts ou taxes applicables aux produits d'exportation.

Dans le tableau VII-8, nous n'avons pas compris la part des bénéfices nets qui serait réservée pour l'achat d'obligations d'équipement. Cette part s'élèverait à 4 % du bénéfice net, soit environ \$0,09 la tonne, ce qui diminuerait la rentabilité de l'investissement de 17,9 à 17,6 %.

TABLEAU VII-8

RECAPITULATION DE LA PROFITABILITE

Capacité: 450.000 tonnes de pellets/an
3.200 tonnes de cuivre/an

	<u>Pellets seuls</u>	<u>Pellets et cuivre</u>
	(\$000 U.S./an)	(\$000 U.S./an)
I. <u>Investissement</u> (millions de \$ U.S.)	11,1	12,6
II. <u>Fonds de Roulement</u> (millions de \$ U.S.)	0,1	0,6
III. <u>Revenus</u>		
Pellets de minerai de fer - \$0,24/unité x 64 unités	6.912,0	6.912,0
Cuivre - \$0,92/kg x 7,18 kg	-	<u>2.972,5</u>
	<u>6.912,0</u>	9.884,5
IV. <u>Frais de Transport des Pellets</u>		
Expédition sur port européen	1.147,5	1.147,5
Stockage et chargement	315,0	315,0
Transport de l'usine au port	225,0	225,0
V. <u>Frais de Transport du Cuivre</u>	-	<u>160,0</u>
VI. <u>Revenus ramenés à l'Usine</u>	5.224,5	8.037,0
VII. <u>Frais d'Exploitation</u>		
Frais d'exploitation directs	3.491,5	4.441,5
Frais fixes		
Amortissement à 10 % de l'investissement	1.110,0	1.260,0
Taxes et assurances à 2,5 % de l'investissement	277,5	315,0
Frais de ventes à 0,5 % des ventes	34,6	49,5
Intérêt sur le fonds de roulement à 9 %	<u>45,0</u>	<u>54,0</u>
Total des frais d'exploitation	4.958,6	6.120,0
Bénéfice brut	265,9	1.917,0
Moins la taxe sur les bénéfices d'entreprises à 48 %	127,6	918,0
Bénéfices nets	138,3	999,0
Amortissement	<u>1.110,0</u>	<u>1.260,0</u>
Cash-flow	1.248,3	2.259,0
Rentabilité des capitaux propres (100 x cash-flow/investissement)	11,2 %	17,9 %

TABLÉAU VII-9

RECAPITULATION DE LA PROFITABILITE - 40 % CAPITAUX PROPRES

Capacité: 450.000 tonnes de pellets/an
 3.200 tonnes de cuivre de cémentation/an
 40 % Capitaux Propres - 60 % Dette - Emprunt sur 10 ans

I. <u>Investissement</u>	12,6
II. <u>Fonds de roulement</u>	0,6
	<u>Milliers de dollars U.S./an</u>
III. <u>Revenus Usine</u>	8.037,0
IV. <u>Frais d'Exploitation</u>	
Frais d'exploitation directs	4.441,5
Frais fixes	
Amortissement à 10 % de l'investissement	1.260,0
Taxes et assurances à 2,5 % de l'investissement	315,0
Frais de vente à 0,5 % des ventes	49,5
Intérêt sur le fonds de roulement à 9 %	54,0
Intérêt moyen de l'emprunt à 9 %	<u>337,5</u>
Total des frais d'exploitation	6.457,5
Bénéfice brut	1.579,5
Moins le taxe de 48 % sur les bénéfices d'entreprises	756,0
Bénéfice net	823,5
Amortissements	<u>1.260,0</u>
Cash-flow	2.083,5
Moins remboursement du principal	<u>756,0</u>
Cash-flow propre	1.327,5
 Rentabilité des capitaux propres (cash-flow propre/capitaux propres)	 26,4 %

f. Subventions, remise d'impôts et amortissement accéléré:

La "prime d'équipement" est une subvention directe fournie par le Gouvernement, qui s'élève à 15 % du coût de l'équipement et des bâtiments directement liés à la production. Si une telle subvention est accordée pour ce projet, son montant s'élèverait à approximativement \$1.100.000, ce qui augmenterait la rentabilité de l'investissement de 17,9 % à 19,8 %.

Si un amortissement sur 5 ans peut être autorisé par le Gouvernement, le taux de rentabilité augmenterait de 17,9 % à 22,7 %.

Si un amortissement sur 5 ans et une remise d'impôts sur 5 ans sont obtenus du Gouvernement, le taux de rentabilité augmenterait jusqu'à 25,2 %.

Si le financement est basé sur un emprunt de 60 % et 40 % de capitaux propres et un amortissement sur 5 ans et une remise d'impôts de 5 ans sont accordés, le taux de rentabilité croîtrait jusqu'à 26,5 %.

g. Rentabilité de l'investissement: Nous avons calculé la rentabilité de l'investissement par le rapport du cash-flow (bénéfice net plus dépréciation) aux capitaux propres.

Le tableau VII-8 indique qu'une usine traitant les cendres de Safi serait profitable, avec une rentabilité de l'investissement d'environ 18 % si le cuivre est récupéré. Tel que l'on peut le voir dans le tableau VII-8, la production de pellets sans récupération du cuivre n'est que marginalement profitable. Nous devons attirer l'attention sur le fait que la rentabilité d'une telle usine est liée à l'emploi de cendres à basse teneur en silice qui seront disponibles après 1971. En plus des valeurs cuprifères, ces cendres produisent des pellets de haute qualité recherchés par l'industrie de l'acier et de la fonte, et requièrent seulement une étape d'élimination du soufre avant le procédé Kowa Seiko. Nos calculs montrent qu'une usine similaire fabriquant des pellets pauvres en fer à partir des cendres stockées riches en silice, traitées seulement pour l'élimination du soufre, serait marginalement profitable, et qu'une autre usine basée sur le traitement des cendres riches en silice, avec l'élimination du soufre et de la silice, ne serait pas économique.

6. Economie de la récupération du cuivre

Le chapitre V montre que l'enlèvement du cuivre des cendres est nécessaire pour produire des pellets d'oxyde de fer commercialisables. Le cuivre est éliminé des pellets à l'état de chlorure volatil dans le four rotatif du procédé Kowa Seiko et se retrouve dans la solution de lavage des gaz. On peut facilement estimer les frais entraînés par le

la récupération du cuivre à partir de la solution de lavage pour déterminer si cette étape supplémentaire se justifie économiquement. Comme indiqué dans le tableau VII-6, l'étape de récupération du cuivre augmentera l'investissement de \$11.100.000 à \$12.600.000. Le tableau VII-8 montre que la rentabilité de l'investissement à 100 % de capitaux propres s'accroît de 11,2 % à 17,9 %. La récupération du cuivre (comme cuivre de cémentation) de la solution de lavage est donc clairement souhaitable. On peut également remarquer que le cuivre de cémentation obtenu a une valeur de \$0,88 par kilogramme à l'usine. Les frais d'exploitation supplémentaires pour la production de cuivre de cémentation sont les suivants:

Dollars U.S./kg de cuivre récupéré

• CaCO ₃	0,024
• Ferrailles	0,257
• Main-d'œuvre	0,002
• Divers	<u>0,022</u>
	0,305

Avec des frais d'exploitation de \$0,305 et des charges financières de \$0,05 à \$0,06 par kilogramme sur l'investissement supplémentaire par rapport à une usine de pellets d'oxyde, appliqués à un produit évalué à \$0,88, la récupération du cuivre des gaz de four perdus est une opération très profitable et les frais supplémentaires entraînés par cette opération sont amplement justifiés.

ANNEXES

ANNEXE A

ELIMINATION DE LA SILICE

Il est nécessaire d'éliminer la silice des cendres stockées, pour produire des pellets de bonne qualité. Deux méthodes peuvent être utilisées:

1. La flottation: Le BRPM est en train de faire des recherches sur cette méthode et elle semble être techniquement prometteuse.
2. La réduction par grillage avec séparation magnétique: Cette méthode est fondée sur la réduction d'hématite en magnétite en lit fluidisé et l'élimination de la silice par broyage et séparation magnétique. Cette méthode est employée à une échelle industrielle par Montecatini et n'a été essayée pour les cendres de Sefi qu'en laboratoire. Cette approche particulière pourrait être utilisée en conjonction avec un décuivrage en lit fluidisé ou un désoufrage en lit fluidisé. Cependant, les procédés de décuivrage en lit fluidisé n'ont pas encore fait leurs preuves commercialement.

Nous avons fait une estimation préliminaire des frais d'élimination de la silice dans les cendres stockées riches en silice à l'aide de données préliminaires de flottation établies par le BRPM pour la flottation d'hématite avec du sulfonate en milieu acide.

Le tableau A-1 montre le résumé des coûts pour l'étape de flottation d'hématite. Nous avons considéré seulement les frais supplémentaires nécessaires à l'adjonction de flottation d'hématite, la déshumidification du concentré et l'enlèvement des résidus dans une usine utilisant la flottation pour le désoufrage des cendres. On peut remarquer que l'élément principal des frais d'exploitation est le réactif consommé dans la flottation d'hématite. Ce coût est relativement insensible à l'échelle de l'opération. Si la flottation de la silice à l'aide de savons ou d'amines réussit, nous pensons que les coûts pourraient baisser de \$1,63 par tonne de réactif à \$0,50 par tonne.

D'après l'expérience acquise, nous pensons qu'un grillage réducteur, un broyage et une séparation magnétique coûteraient à peu près le même prix que la flottation au sulfonate. Cependant, cette seconde méthode n'a pas été utilisée à grande échelle pour les cendres de pyrrhotine, et il faudrait attendre à un effort considérable de

TABLÉAU A-1

COUTS SUPPLÉMENTAIRES POUR L'ÉLIMINATION DE LA SILICE PAR FLOTTATION

- I. **Base:** Flottation d'hématite au sulfonate, récupération à 60 % en poids
 Charge: 166.000 tonnes/an de cendres riches en silice.
 Produit: 100.000 tonnes de cendres pauvres en silice (4 %)

II. **Investissement:**

Coût de l'unité physique	180.000
Frais de développement	<u>20.000</u>
	200.000

III. **Frais d'Exploitation:**

	<u>Unité</u>	<u>\$/Unité</u>	<u>Unités/Tonne</u>	<u>\$/Tonne de Charge</u>
Energie	Kwh	0,02	5,0	0,10
Silicate de Sodium	kg	0,22	0,9	0,20
H ₂ SO ₄	kg	0,02	0,35	0,01
Collecteur	kg	0,33	4,30	1,42
Eau	m ³	0,04	1,00	0,04
Main-d'oeuvre	Homme-heures	0,40	0,07	0,03
Supervision	Homme-heures	2,00	0,005	0,01
Frais généraux - 100 % main-d'oeuvre et supervision				0,04
Fournitures d'entretien à 4 % de l'investissement				<u>0,03</u>
Frais d'exploitation directs				1,90
Amortissement - 10 ans				0,12
Taxes locales et assurances - 2,5 % de l'investissement				0,03
PRIX TOTAL PAR TONNE DE CHARGE POUR L'ÉLIMINATION DE LA SILICE				<u>2,05</u>

- IV. **Prix total par tonne de produit pour l'élimination de la silice =**
 $\frac{2,05}{0,6} = \$3,42$ par tonne de produit.

recherche et développement hors du Maroc pour déterminer la viabilité de cette approche. C'est la raison pour laquelle cette variante n'est pas recommandée.

Le tableau A-2 présente l'économie de deux installations de fabrication de pellete produisant 500.000 tonnes de pellets par an.

Cas X: 300.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en silice (4 %) provenant des grillaurs.

100.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en silice (4 %) stockées.

100.000 tonnes/an de cendres riches en silice et stockées.

Les pellets obtenus de cette manière contiendraient environ 63 % de Fer et seraient pénalisés de \$0,005 par unité.

Cas Y: 300.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en silice provenant des grillaurs.

100.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en silice en stock.

100.000 tonnes/an de cendres à basse teneur en silice provenant de la flottation d'hématite de 166.000 tonnes/an de cendres riches en silice.

Dans ce cas les pellets contiendraient environ 65 % de Fe.

Les calculs du tableau A-2 indiquent que l'élimination de la silice par la flottation peut être très intéressante au point de vue économique lorsque les cendres traitées de cette façon forment les 20 % de la charge pour l'usine de pellets. Par des calculs similaires, on peut démontrer que lorsque ce type de matériau s'élève à plus de 22 % de la charge de l'usine de pellets, l'élimination de la silice par flottation n'est plus profitable.

Les prix du tableau A-1 et A-2 sont très sensibles aux quantités de réactifs consommés dans la flottation, au taux de récupération de la flottation ainsi qu'aux pénalités de prix appliquées aux pellets riches en silice et pauvres en fer. Pour cette raison, nous recommandons que les prix de l'élimination de la silice soient réexaminés après que la consommation de réactif et l'efficacité du procédé aient été vérifiées sur des essais à plus grande échelle et après que des offres fermes d'achat de pellets aient été reçues de clients éventuels.

Le procédé proposé dans ce rapport est fondé sur l'adjonction de cendres riches en silice sans élimination de la silice. Ce n'est qu'après l'épuisement du stock de cendres à basse teneur en silice,

TABLERAU A-2

ECONOMIE DE L'ELIMINATION DE LA SILICE PAR LA FLOTTATION

Base: 500.000 tonnes de pellets par an

I. Cas X: Pellets à 63 % Fe; prix de vente \$0,235/unité ou \$14,80/tonne

II. Cas Y: Pellets à 65 % Fe; prix de vente \$0,24/unité ou \$15,60/tonne

Charges financières supplémentaires pour l'élimination de SiO₂ = \$200.000

Augmentation du prix de vente pour des pellets de haute qualité =

\$15,60 - \$14,80 = \$0,80 par tonne.

III. Economie

	<u>Milliers \$/an</u>
Augmentation du prix de vente pour le cas Y	400
Moins les frais supplémentaires pour déplacer 66.000 tonnes de cendres riches en silice à \$0,50/tonne	33
Moins les frais supplémentaires pour l'élimination de la silice	<u>342</u>
Bénéfice brut	25
Moins la taxe supplémentaire sur les bénéfices à 48 %	<u>12</u>
Bénéfice net	13
Amortissement supplémentaire	<u>20</u>
Cash-flow	33

Taux de rentabilité (Cash-flow/Investissement) 16,5 %

c'est-à-dire après une dizaine d'années d'exploitation de l'usine, qu'une étape d'élimination de la silice pourrait être utile. Pour cette raison, les recherches sur l'élimination de la silice devraient actuellement avoir un intérêt secondaire. Lorsque l'usine fonctionnera à pleine capacité, nous suggérons que les approches suivantes soient étudiées parmi les autres:

- Broyage et libération: Puisque la nouvelle usine d'amélioration produit de la pyrrhotine à basse teneur en silice avec un broyage réduit au minimum, nous pensons que les grains de silice contenus dans le stock de cendres sont probablement relativement gros et pourraient peut-être être libérés avec un broyage réduit. La consommation de réactif pour la flottation d'hématite serait diminuée si le grain reste grossier.
- Flottation: Nous pensons que l'on devrait étudier la flottation de silice à partir des cendres grossièrement broyées, en employant les approches suivantes:
 - a) Utiliser un collecteur de silice primaires à base d'amine, avec amidon, protéines, gommes ou tanins comme inhibiteurs d'hématite, et effectuer une flottation en milieu modérément alcalin.
 - b) Activer la silice à l'aide de calcium, baryum, cuivre, plomb, aluminium ou d'ions ferriques, mettre en flottation avec un collecteur carboxylique, en se servant des mêmes inhibiteurs pour l'hématite qu'auparavant, en milieu alcalin (pH: environ 11).

Dans le cas de réussites de l'un ou de l'autre de ces essais, ces méthodes offrent, par rapport à la flottation d'hématite, les avantages suivants:

- Coûts inférieurs de réactif pour la séparation de quantités faibles de silice à partir de grandes quantités d'hématite. Les coûts de réactifs sont approximativement de \$0,50 la tonne avec cette approche au lieu de \$1,60.
- Un équipement moins volumineux: la flottation à l'amine ou au savon s'effectue dans des temps relativement courts.
- Un taux de récupération amélioré: la perte de boue pendant la flottation de silice des cendres grossièrement broyées serait peut-être moindre.

Cette approche présente l'inconvénient d'exiger deux étapes de broyage et un épaisseur pour retirer l'eau des résidus provenant de la flottation de silice, avant broyage et la flottation de sulfure. Il est possible qu'un traitement supplémentaire soit nécessaire pour l'élimination du collecteur (amine ou carboxylique) absorbé superficiellement.

On doit souligner, cependant, que les essais limités effectués par L.H. Manderstam & Partners, Limited, sur le procédé de flottation cationique (amine) de silice à partir de cendres broyées au tamis -150 ont échoué et ont produit une cendre renfermant plus de 9 % de silice.

ANNEXE B

FRAIS DE TRANSPORT

Les frais de transport utilisés dans ce rapport sont basés sur des entretiens avec des spécialistes de la commercialisation du minerai de fer, aux Etats-Unis et en Europe, ainsi que sur les taux de fret établis par Smith & Johnson, Steamship Operators & Brokers, de New York. Des extraits de leur lettre se rapportant à cette question sont reproduits ci-dessous:

"Le tirant d'eau des transporteurs en vrac à un seul pont pour le transport des pellets est limité par le tirant d'eau à l'entrée du port de Safi, d'environ 29 pieds (8,7 mètres). Le navire le plus profond en provenance de Safi a un tirant d'eau de 32 pieds (9,6 mètres).

"Nous réalisons que le sujet de votre étude est la construction à Safi d'une installation de chargement de pellets en vrac, et nous avons supposé que sa capacité ne serait pas inférieure à celle du convoyeur de chargement de phosphate existant et du portique qui peuvent ensemble charger 1.000 tonnes par heure.

"En supposant un arrêt de 30 heures au port de chargement, la nombre de jours passés aux ports de chargement et de déchargement, pour les cinq ports de destination mentionnés, est indiqué dans le tableau ci-dessous, qui donne des tarifs basés sur des cargaisons d'environ 21.000 tonnes, correspondant au tirant d'eau acceptable à Safi.

"Nos estimations de prix de transport se basent sur les taux commerciaux actuels des transporteurs en vrac appropriés (FIOT Basis), déchargement et chargement à un seul poste sous contrat de voyages consécutifs, et retour aux ballast vers Safi, le trajet étant relativement court.

<u>de Safi</u>	<u>Jours aux ports</u>	<u>Barèmes (\$/tonne métrique)</u>
à Port Talbot	4	\$2,25
à Newport	5	\$2,40
à Rotterdam	4	\$2,45
à Immingham	7	\$2,90
à Middlesbrough	5	\$2,70

"Les taux de 'demurrage' et promptitude peuvent être estimés respectivement à environ \$2.000 et \$1.000 par jour. Les encombrements possibles au poste, ou au port de déchargement, doivent être envisagés par les expéditeurs et entrent dans les frais de transport par mer. Il faut définir le taux de demurrage et celui qui le paie: expéditeur ou destinataire. La différence entre pénalité de demurrage et prime de promptitude est un point qui ne peut être déterminé exactement et dépend également des termes du contrat d'affrètement négocié, en ce qui concerne le temps d'arrêt au port et le commencement de cet arrêt. Comme exemple d'encombrement, en septembre et en octobre derniers, nous avons enregistré des durées de 21, 16 et 13 jours d'arrêt au port de Rotterdam pour le déchargement de cargaison.

"Si la production et l'exportation de pellets à Safi devait totaliser 450.000 tonnes par an, un seul navire de 21.000 tonnes serait nécessaire avec un contrat de voyages consécutifs.

"En résumé, nous pensons que les tarifs de transport indiqués ci-dessus représentent une estimation honnête des frais de transport."

ANNEXE C

BIBLIOGRAPHIE

A. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE BRPM

1. BRPM notes n° 197, 202, 215, 259, 282, 286, 296, 297, et 298 - Annexe 7.
2. Rapport de L.H. Manderstam & Partners, Ltd., juillet 1969.
3. Rapport de Dr. A. Columbini de Montecatini, 6 septembre, 1966.
4. Rapport de CEEI, novembre 1968.
5. Description des Procédés CEEI (en anglais) avec diagrammes.
6. Estimations BRPM-DVM de prix pour le procédé Kowa Seiko.
7. Plan de l'Installation de Safi montrant l'Emplacement des Stocks de Cendres.
8. Rapport Kowa Seiko, septembre 1970.
9. Brochure sur les activités du BRPM.
10. "Investment in Morocco", juillet 1969, publié par le Centre de Promotion de l'Investissement (fourni par M. Dottridge du PNUD).

B. PUBLICATIONS PERTINENTES

a. Procédé Kowa Seiko

1. Anon., "Kowa Seiko Process for Overall Utilisation of Pyrites", Sulphur, No. 69, 29-31, mars/avril 1967.
2. Anon., "The Purification and Pelletization of Pyrite Cinders", Sulphur, No. 77, 34-35, juillet/août 1968.
3. Y. Okubo, "Kowa Seiko Pelletizing Chlorination Process - Integral Utilization of Iron Pyrites", J. of Metals, 20-3, 63-67, mars 1968.
4. R. Ramirez, "Japanese Process Makes Blast Furnace Feed from Pyrite Concentrate", Chemical Engineering, 75-8, 114-116, 8 avril, 1968.

3. Anon., "Chlorine Roast for Iron-Furnace Feed", Chemical Week, 87-88, 13 janvier, 1968.

b. Procédé DKH

1. F. Habashi, "The Recovery Empire Built on Fool's Gold", Engineering and Mining Journal, 12, 59-64, décembre 1969.

c. Procédé LDK

1. F. Habashi, loc. cit.

2. Anon., "The Chlorinated Volatilization Process for Pyrites Cinder Treatment", Sulphur, No. 79, 31-34, novembre/décembre 1968.

3. K.K. Lippert, et al., "Recovery of Non-Ferrous Metal Impurities from Iron Ore Pellets by Chlorination (CV or LDK Process)", Trans. Inst. of Mining and Metallurgy, 78 (751), C98-C107, 1969.

d. Procédé Montecatini

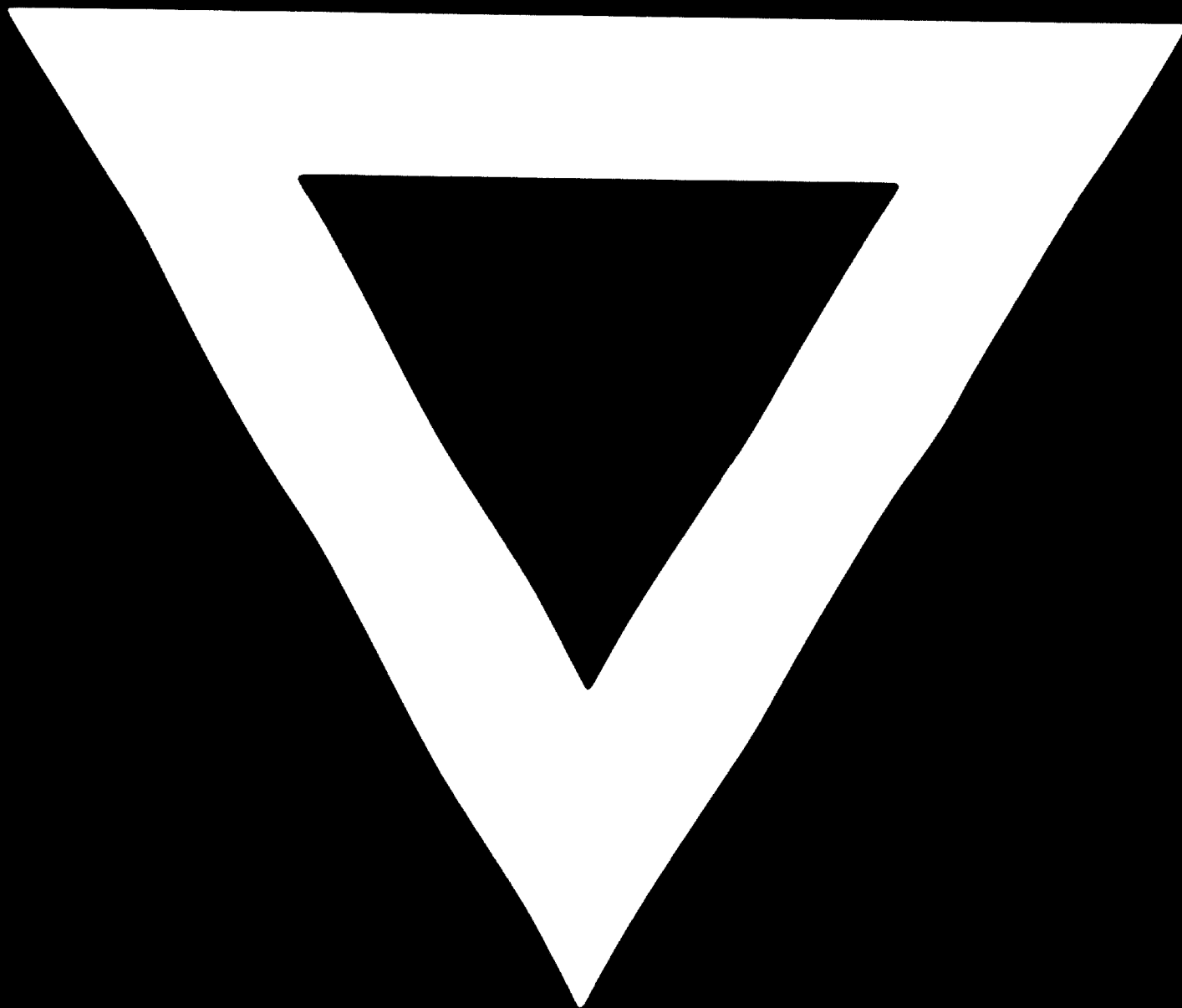
1. V. Colombo, et al., "Montecatini's Revamped Pyrite Flowsheet Overcomes the Heat-Iron Sulphur Snags", Engineering and Mining Journal, 166-4, 94-97, avril 1965.

2. V. Colombo, et al, "Fluo Solids Reduction of Hematite at Montecatini", J. of Metals, 17-12, 1317-1325, décembre 1965.

CAMBRIDGE
MASSACHUSETTS

CHICAGO
NEW YORK
SAN FRANCISCO
WASHINGTON
ATHENS
BRUSSELS
CARACAS
LONDON
MEXICO CITY
PARIS
RIO DE JANEIRO
TORONTO
ZURICH

B-570



84.11.27

AD.86.07

ILL4.0+10