

# BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

DIRECTION DES RECHERCHES MINIÈRES  
ET DES TRAVAUX A L'ÉTRANGER  
74, rue de la Fédération, 75 Paris (15<sup>e</sup>) – Tél.: (1) 783.94.00

CONFIDENTIEL

## ÉTUDE TECHNIQUE et ÉCONOMIQUE des PROCÉDÉS MOUSSOULOS de TRAITEMENT des MINÉRAIS OXYDÉS de NICKEL et de COBALT



Département d'ÉTUDES MINIÈRES  
74, rue de la Fédération, 75 Paris (15<sup>e</sup>)  
Tél.: (1) 783.94.00

Département VALORISATION DES MINÉRAIS  
B.P. 6009 – 45 Orléans (02)  
Tél.: (38) 66.06.60

**71 RME 005 VDM**

Février 1971

## TABLE des MATIERES

	Pages
<b>I. ETUDE TECHNIQUE</b>	<b>1</b>
1. INTRODUCTION	2
2. PRINCIPAUX PROCEDES UTILISES POUR LE TRAITEMENT DES MINERAIS DE NICKEL	3
2.1. Traitement des minerais sulfurés	3
2.2. Traitement des minerais oxydés	5
3. LES PROCEDES L-M et M-LAR	8
3.1. Principe	8
3.2. Références des essais et de leurs applications	9
3.2.1. Le minerai de LARYMNA	9
3.2.2. Le minerai de MADAGASCAR	11
3.2.3. Le minerai de YOUGOSLAVIE	11
3.2.4. Le minerai des PHILIPPINES	12
3.3. Informations techniques complémentaires	13
3.3.1. Brevets	13
3.3.2. Réduction en deux phases	13
3.3.3. Problèmes technologiques	14
3.3.4. Récupération du nickel et du cobalt	15
3.3.5. Valorisation du fer par M-LAR	16
3.3.6. Teneurs commerciales des ferro-nickels	17
3.4. Informations économiques	18
4. LE PROCEDE M-P	19
<b>II. ETUDE ECONOMIQUE</b>	<b>21</b>
1. INTRODUCTION	22
2. PLAN de TRAVAIL	23
3. COUT DE FONCTIONNEMENT TYPE DU PROCEDE M-L RAMENE A LA TONNE SECHE METRIQUE DE LATERITE TRAITEE - Cadence d'environ 750 000 t/an	24
4. VALORISATION PAR TONNE SECHE DE LATERITE TRAITEE	25
5. MONTANT des INVESTISSEMENTS de l'USINE de TRAITEMENT et des SERVICES ANNEXES (Centrale exclue)	26

Table des matières (suite 2)

---

	Pages
6. CRITERE de RENTABILITE pour UNE TENEUR LIMITE.....	27
7. TENEURS LIMITES.....	28
8. REMARQUES DIVERSES.....	30
9. LE PROCEDE M-LAR.....	31
10. LE PROCEDE M-P.....	32
o ooo	
CONCLUSIONS GENERALES.....	33

I.- ETUDE TECHNIQUE .

## 1. - INTRODUCTION .

La SOUTHLAND MINING LIMITED , en la personne de son Chef-géologue M. ESPIRAT , a confié au Bureau de Recherches Géologiques et Minières l'étude critique, sur les plans technique et économique, des procédés MOUSSOULOS de valorisation des minerais oxydés de nickel .

Cette demande est essentiellement motivée par le caractère apparemment très concurrentiel des procédés Moussoulos qui ne sont actuellement utilisés industriellement que par la Société LARCO, à LARYMNA, en Grèce .

Cette société exploite un minerai latéritique à teneur en Ni comprise entre 0,9 et 1,1 % , c'est-à-dire à une teneur très inférieure aux limites d'exploitabilité généralement admises.

La Southland Mining Limited a chargé le B.R.G.M. de prendre directement contact avec le Professeur MOUSSOULOS et, si possible, d'effectuer une visite à LARYMNA, en vue de rassembler les informations nécessaires pour faire le point de ces procédés et de présenter un rapport technique et économique actualisé sur leur applicabilité .

La visite à M. MOUSSOULOS par MM. COHEN-ALLORO et LAUFFENBURGER, ingénieurs au département Valorisation des Minerais du B.R.G.M. , a été faite le 11 janvier 1971, mais celle de l'usine de LARYMNA n'a pas été autorisée, pour des raisons de confidentialité .

Aussi bien l'étude suivante reflètera-t-elle, dans ses renseignements chiffrés le point de vue et l'autorité du Professeur MOUSSOULOS, qui dirigea l'usine de LARYMNA depuis l'avant-projet de sa création jusqu'à son plein fonctionnement, mais qui, il faut l'ajouter, n'appartient plus à la Société LARCO depuis qu'un différend les a séparés il y a quelques années. Les données fournies par M. MOUSSOULOS sont puisées de son expérience et de ses documents personnels. Elles ont été notées sous le seul engagement de leur auteur, et sous réserve, le cas échéant, à l'occasion d'une étude plus poussée relative à un problème précis, d'en faire confirmer la fidélité au cours d'un programme d'essais .

Il convient, enfin, de rappeler qu'il existe trois procédés Moussoulos, respectivement désignés par les initiales L-M , M-LAR , et M-P . Les deux premiers, appliqués d'ailleurs conjointement, sont utilisés à LARYMNA depuis 1958 . Ils ont fait l'objet, en 1967, d'une communication à LONDRES au cours d'un Symposium sur la Métallurgie extractive. Le troisième procédé, mis au point au laboratoire, n'en est qu'à la phase d'étude en pilote .

## 2. - PRINCIPAUX PROCÉDES UTILISÉS POUR LE TRAITEMENT DES MINÉRAIS DE NICKEL .

Avant d'aborder l'étude technique des procédés Moussoulos, il a paru utile de présenter un bref aperçu des autres procédés existants de traitement de minerais de nickel, en se limitant, dans un but comparatif et sans considérations économiques, aux principales teneurs des minerais traités, au principe des procédés utilisés, et à la qualité du produit obtenu .

Les gisements, actuellement exploités, se classent en deux catégories :

- . les gisements sulfurés
- et les
- . gisements oxydés .

### 2.1. TRAITEMENT des MINÉRAIS SULFURÉS .

#### SHERRITT GORDON :

Ce procédé est appliqué au concentré de flottation du minerai de LYNN LAKE ( Manitoba ) qui est transporté à l'usine de FORT SASKATCHEVAN ( Alberta ). Le concentré traité présente l'analyse suivante :

Ni	Co	Fe	Cu	S	
10	0,5	38	2	31	% .

Le procédé, entièrement hydrométallurgique, consiste en une lixiviation par l'ammoniaque sous pression suivie de la réduction du nickel de la solution par l'hydrogène sous pression .

Le nickel en poudre ainsi obtenu est aggloméré sous forme de briquettes dont la composition chimique est la suivante :

Ni	Co	Fe	Cu	Cr	S	Pb	As
99,9	0,07	0,015	0,005	0,004	0,003	< 0,0005	< 0,0005

INCO : Valorisation des pyrrhotites .

Ce procédé est appliqué au minerai de COPPER CLIFF dont la composition chimique est la suivante :

Ni	Fe	Cu	S	SiO <sub>2</sub>	% .
0,75	58	0,05	35	2	

Après valorisation du fer sous forme d'un concentré d'oxyde de fer à 68 % Fe et 0,15 % Ni , le nickel est précipité à l'état de carbonate basique , puis calciné à l'état d'oxyde :

Ni	Co	Fe	Cu	S	% .
77	0,15	< 0,035	< 0,035	< 0,15	

Le taux de récupération du fer est de 90 % , celui du nickel est de 75 % .

FALCONBRIDGE : Valorisation des pyrrhotites .

Ce procédé est appliqué au minerai de composition suivante :

Ni	Co	Fe	Cu	S	SiO <sub>2</sub>	% .
1,1	0,03	57	0,1	36	1,8	

Le minerai est soumis à un grillage sulfatant qui transforme le nickel, le cobalt et le cuivre en sels solubles. Une lixiviation à l'eau conduit à une solution de sulfates d'où l'on extrait un concentré contenant le nickel :

Ni	Co	Fe	Cu	S	SiO <sub>2</sub>	% .
10,9	0,3	30	1,6	26	2,1	

Ce procédé permet de récupérer 87 % de Ni.

INCO : Procédé " carbonyle " .

Ce procédé s'applique aux granules d'oxyde de nickel obtenus par grillage des sulfures. Ces granules sont d'abord réduits par l'hydrogène .

Un premier procédé consiste à traiter le nickel obtenu, par l'oxyde de carbone en vue de former du nickel carbonyle. Ce dernier est ensuite décomposé en oxyde de carbone et en nickel .

Le nickel obtenu en billes, est caractérisé par sa grande pureté :

Ni	Co	Fe	Cu	S	C	As	Pb	% .
> 99,95	0,0005	0,01	0,001	0,001	0,01	0,0001	0,0001	

## 2.2. TRAITEMENT des MINERAIS OXYDES .

### LE NICKEL :

La Société LE NICKEL traite dans son usine de DONIAMBO ( Nouvelle Calédonie ), un minerai oxydé du type garniérite :

Ni	Co	Fe	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% .
2,8	0,06	13	2	37	24	2	

Dans un premier procédé, le minerai additionné de gypse et de charbon est fondu en une matte titrant 25 % Ni. Cette dernière est expédiée à l'usine du HAVRE, où s'effectue un grillage à l'état d'oxyde, suivi d'un grillage réducteur :

Ni	Co	Fe	Cu	S	C	% .
99,25	0,45	0,1	0,07	0,004	0,04	

Dans un second procédé, le minerai est réduit par le charbon au four tournant puis au four électrique à l'état de ferro-nickel :

Ni + Co	S	P	C	Si	%
29	0,02	0,02	0,02	0,02	

HANNA .

Ce procédé, employé par la HANNA Nickel Smelting Company à RIDDLE ( Oregon ) , est appliqué à un minerai oxydé du type garniérite :

Ni	Co	Fe	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	% .
1,65	0,02	12	1,5	50	25	1,3	1,2	

Le minerai est fondu et réduit à l'état de ferronickel :

Ni	Co	Cu	S	P	C	Cr	Si	% .
48,5	0,5	0,1	0,005	0,01	0,02	0,02	0,9	

NICARO :

Ce procédé est appliqué au minerai oxydé de CUBA :

Ni	Co	Fe	MgO	SiO <sub>2</sub>	% .
1,4	0,1	38	8	14	

Le procédé comprend la réduction sélective du minerai suivie de lixiviation ammoniacale à pression atmosphérique. Le nickel est précipité de la solution à l'état de carbonate basique, puis calciné à l'état d'oxyde, enfin, soumis à une réduction aboutissant à un nickel partiellement oxydé :

Ni	Co	Fe	Cu	S	SiO <sub>2</sub>	Pb	% .
88	0,7	0,3	0,04	0,05	1,7	0,0005	

Le taux de récupération du nickel est de 76 % .

FREEPORT SULPHUR .

Ce procédé hydrométallurgique est appliqué au minerai de MOA BAY ( Cuba ) :

Ni	Co	Fe	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Cu	% .
1,35	0,146	47,5	2,9	3,7	8,5	1,7	0,02	

Le minerai est attaqué par l'acide sulfurique sous pression. On obtient un résidu d'oxyde de fer et une solution d'où le nickel est ensuite précipité par l'hydrogène sous pression. La poudre de nickel obtenue est agglomérée en briquettes :

Ni	Co	Fe	S	C	Cu	% .
99,8	0,15	< 0,005	0,01	0,02	< 0,005	

Le taux de récupération du nickel et du cobalt est de 90 % .

### 3.- LES PROCEDES L-M et M-LAR .

---

#### 3.1. PRINCIPE .

La description de ces procédés a fait l'objet d'une communication au Symposium de LONDRES, en 1967, sur la Métallurgie extractive .

Le schéma figurant à la page 8<sup>2</sup>, tiré de cette publication, représente, dans son principe, les deux procédés MOUSSOULOS. Appliqués en série, ils ont pour but d'extraire, par des méthodes pyrométallurgiques, le Nickel, le Cobalt, le Fer et le Chrome de minerais latéritiques. La communication de Londres décrit avec beaucoup de détails techniques la suite théorique et pratique des opérations et expose de nombreux résultats chiffrés obtenus au cours des essais. Il suffit, par conséquent, d'en rappeler l'essentiel, à partir d'ailleurs des propres arguments de l'auteur .

Le procédé L-M comporte deux phases principales :

- . une réduction carbothermique en four tournant  
suivie
- . d'une réduction métallothermique en four  
électrique .

A la lecture de la publication de M. MOUSSOULOS, eu égard à sa simplicité, le caractère essentiel du procédé L-M réside, dans la récupération élevée du Ni et du Co, à partir de latérites pauvres et particulièrement complexes, dont le traitement conduit à obtenir un ferro-nickel de très haute pureté. Ainsi, un minerai latéritique titrant 1,2 % de Ni et 0,2 % de Co pourraient fournir un alliage à 20 % de Ni + Co avec une récupération de 98 % environ pour le Nickel et 85 % pour le Cobalt .

Après concassage à 12,5 mm, le minerai est divisé en deux fractions : l'une est additionnée d'une quantité calculée de combustible de qualité économique, tel que le lignite et est soumise à la réduction contrôlée dans un four tournant de conception spéciale. Ce traitement a pour effet de fournir un produit presque exempt de carbone (0,3 % C environ) renfermant une quantité, déterminée à l'avance, de fer élémentaire finement disséminé dans la masse . A la sortie du four tournant, ce produit, dont la température atteint 900° C, est mélangé à la seconde fraction de minerai brut et l'ensemble est fondu à 1550°C dans un four électrique. Au cours de la fusion, les oxydes de Nickel et de Cobalt du minerai traité sont réduits par le fer élémentaire, cependant qu'une importante proportion de ce fer est oxydée à l'état de FeO par l'oxygène des oxydes ferriques. On obtient alors, d'une part un ferro-nickel titrant en général 15 à 20 % de Ni + Co, d'autre part une scorie riche en fer et très épuisée en nickel (0,1 %) . Ce ferro-nickel ne doit pas titrer plus de 25 % Ni pour des raisons de conditions d'équilibre et de risques de pertes de ce métal dans la scorie .

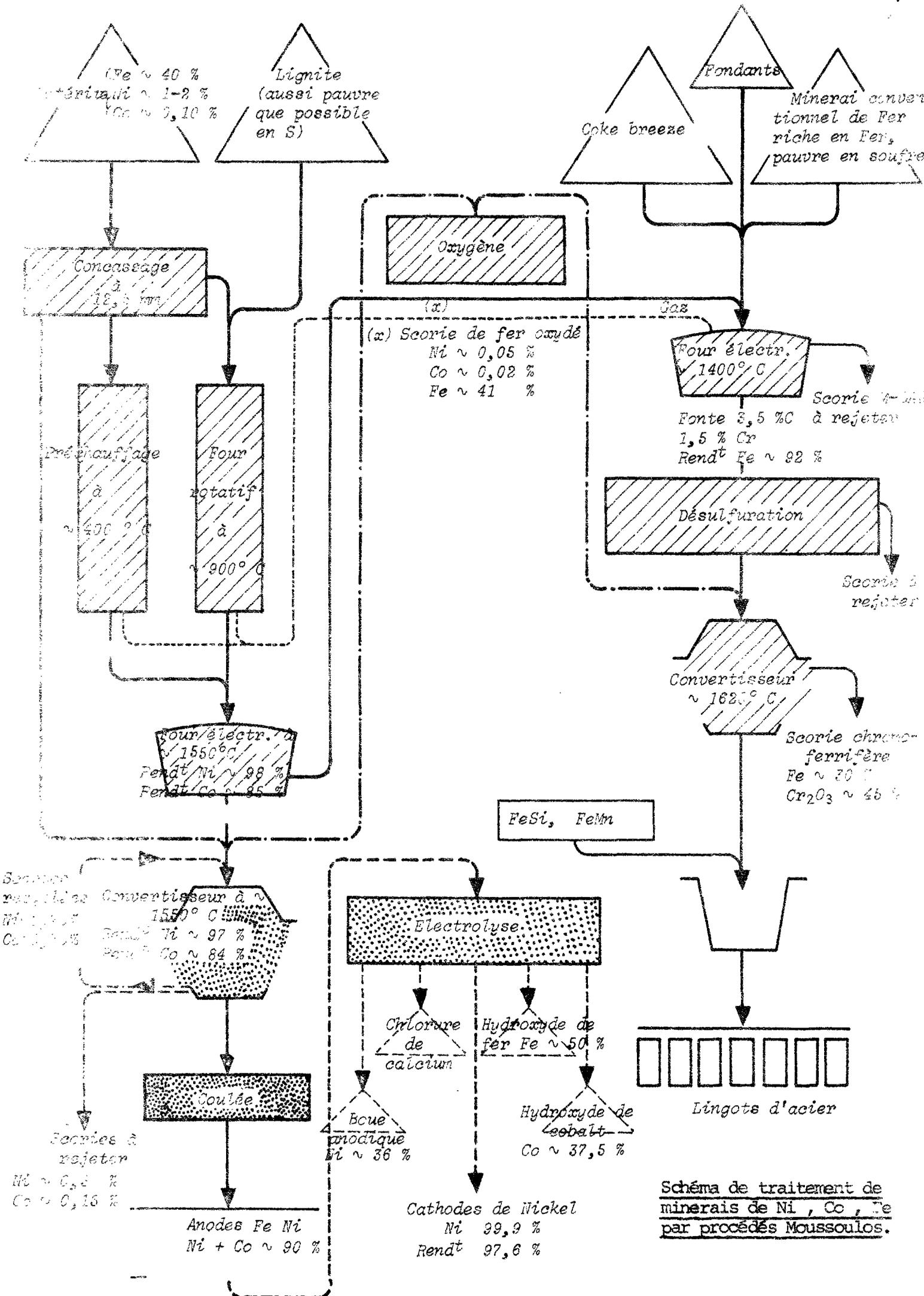


Schéma de traitement de minerais de Ni, Co, Fe par procédés Mosoulo.

L'alliage obtenu répond aux spécifications commerciales, du point de vue de sa qualité et de son titre en Ni. Il ne requiert aucun affinage, à condition que le lignite ne soit pas excessivement riche en soufre .

Une installation complémentaire du procédé L-M consiste, d'une part à enrichir le ferro-nickel dans un convertisseur qui en élève la teneur à 90 % Ni , d'autre part et éventuellement, à soumettre cet alliage à une électrolyse destinée à fournir du nickel pur .

A la sortie du four électrique destiné à produire le ferro-nickel, la scorie, dont la température atteint 1 550°C , peut être valorisée pour son fer ( 40 à 50 % ) et son chrome ( dont la teneur peut atteindre, suivant les minerais, quelques unités % ) . Le traitement de cette scorie fait l'objet du procédé M-LAR , qui tire parti de l'énergie thermique qu'elle emmagasine et qui ne met en oeuvre, pour sa réduction, que des combustibles à bas prix ( poussier de charbon , coke brœzø . A partir d'une technique d'alimentation appropriée, la scorie liquide, le combustible et une quantité calculée de minerai de fer, sont introduits simultanément, sous forme d'un mélange visqueux, à l'intérieur d'un four électrique. A la faveur du contact intime des oxydes métalliques et du combustible, une réduction énergique s'opère aussitôt et les résultats expérimentaux montrent que, en 80 à 100 minutes, 90 % du fer peuvent être réduits sous forme d'une fonte chromifère à 3,5 % de Carbone .

Après désulfuration classique, cette fonte est convertie en acier par soufflage à l'oxygène. Le chrome est oxydé et extrait sous forme de scorie pâteuse de  $Cr_2O_3$  flottant en flaques à la surface du bain. On obtient ainsi, successivement, une fonte ( éventuellement chromifère ) au cours d'une réduction en four électrique, puis un acier en convertissant cette fonte par soufflage à l'oxygène .

### 3.2. REFERENCES des ESSAIS et de leurs APPLICATIONS .

Les principales sources de référence des procédés Moussoulos sont limitées à quatre types de minerais, respectivement situés en Grèce, à Madagascar, en Yougoslavie et dans les Philippines. Les travaux auxquels ils ont donné lieu sont tous confidentiels et ce caractère interdit malheureusement d'assurer une garantie totale d'objectivité dans la réponse aux informations cherchées, ne serait-ce qu'à cause d'omissions obligatoires ou de chiffres ronds donnés de mémoire, aucun document ni rapport d'essais n'ayant le droit d'être communiqué. Cette réserve est applicable dans tout ce qui suit. Il convient, dès lors, de citer les minerais testés par M. MOUSSOULOS :

#### 3.2.1. Le minerai de LARYMNA .

C'est le seul minerai de nickel exploité industriellement par les procédés Moussoulos. Mais il importe de souligner que, à l'origine, en mars 1956, l'usine de LARYMNA n'a pas utilisé ces procédés, mais le procédé Krupp-Renn et que, d'après M. MOUSSOULOS lui-même, "c'est pour sauver Larymna que le traitement Krupp-Renn a été abandonné et remplacé par les traitements L-M et M-LAR " .

Or, le gisement de Larymna, d'origine sédimentaire, a présenté deux horizons nickelifères. Une étude publiée en 1957 par M. MOUSSOULOS dans les " Annales géologiques des Pays Helléniques " ( 9-1957, pages 1-58 ) , cite la présence d'un premier horizon souvent très argileux et caractérisé par des teneurs élevées en nickel ( 1 à 3 % ). Et l'auteur précise que " c'est à l'existence de cet horizon qu'il faut surtout attribuer l'intérêt rattaché au gisement, dans les conditions économiques actuelles " . Le second horizon est constitué par les couches surmontant la formation nickelifère. Ces couches sont, en général, riches en fer et pauvres en nickel ( 0,8 à 1 % ) de sorte que, dans certains cas, elles peuvent être exploitées " pour minerai de fer " . " L'attitude du marché ( en 1957 ) vis-à-vis d'un tel minerai est à présent très défavorable en raison de sa teneur en chrome et en nickel. On ne doit cependant pas exclure la possibilité de pouvoir en tirer avantageusement parti d'autant plus que son tonnage est considérable " .

En outre, d'après l'étude citée, la mise en valeur de l'horizon nickelifère fit l'objet d'un contrat entre le Gouvernement Hellénique et la Société des Engrais et Produits Chimiques d'ATHENES. Cette Société s'engageait à développer, organiser et équiper l'exploitation du gisement de fer nickelifère des Mines de LARYMNA, pour une production annuelle minimum de 130 000 tonnes. Le contrat imposait le traitement du minerai sur place et indiquait, pour ce traitement, l'application du procédé Renn. Il était, en effet, expressément stipulé qu'on devait obtenir la valorisation simultanée du fer et du nickel sous la forme d'un fer spongieux nickelifère. Un délai de trente mois seulement était accordé pour l'érection de l'ensemble des installations et le démarrage définitif.

D'après le procédé Krupp-Renn , le minerai subit la réduction totale à 1 300°C dans un four tournant en vue de fournir des granules métalliques de fer et de nickel avec un rapport Fe/Ni identique à celui du minerai. Ces granules passent ensuite en scorification pâteuse puis, après refroidissement, sont broyés et soumis à la séparation électromagnétique.

Il est possible que la substitution au procédé Krupp-Renn des procédés Moussoulos ait été motivée par la récente mise au point de ces derniers et par leur meilleure adaptation technique ou économique à un minerai de plus en plus pauvre, à mesure que s'épuisait l'horizon des fortes teneurs. Ce n'est là qu'une hypothèse. Toujours est-il que le minerai de Larymna a présenté, en 1969, d'après M. MOUSSOULOS, une teneur moyenne de 0,9 à 1 % de Ni et, selon des renseignements d'origine locale, sa teneur actuelle serait sensiblement voisine de 0,9 % de Ni. Mr MOUSSOULOS rappelle, de plus, que l'exploitation du minerai est faite en galeries et que selon lui, si elle s'était présentée à ciel ouvert, un minerai à 0,8 % de Ni eût été exploitable à partir de ses propres procédés.

### 3.2.2. Le minerai de MADAGASCAR .

Il s'agit d'un minerai limonitique très friable, dont 40 % en poids sont inférieurs à 74 microns, et qui titre 1,1 % de Ni, 0,10 % de Co et 49,1 % de fer total. Les oxydes de fer sont essentiellement constitués de goethite et, en moindre importance, d'hématite, tandis que, du fait de leurs finesses, les minéraux de nickel et de cobalt n'ont pu être identifiés .

Le minerai latéritique de Madagascar a fait l'objet d'essais de réductibilité, de réduction contrôlée au four rotatif et de réduction métallothermique au four électrique. Au cours de la réduction en four rotatif, une notable agglomération a été constatée et les grains de fer métallique obtenus ont eu une grosseur de 0,1 à 1 mm. L'influence de ce facteur est importante dans le traitement ultérieur au four électrique. Les essais effectués au laboratoire, au nombre d'une vingtaine, ont abouti à la production de ferro-nickel titrant, suivant les conditions opératoires, 11 à 19 % de Ni. Les teneurs correspondantes des scories oscillent entre 0,14 et 0,06 % de Ni, avec des teneurs en fer total de 42 à 49 % .

D'après M. MOUSSOULOS, la latérite de Madagascar peut s'élaborer à partir des procédés L-M et M-LAR, de manière semblable à celle de Larymna, et l'alliage obtenu est capable de répondre aux spécifications commerciales, sauf toutefois en ce qui concerne le soufre dont la teneur dépend du combustible employé en réduction contrôlée mais dont l'élimination ne saurait poser de problème, la désulfuration étant une opération classique .

Il importe, toutefois, de rappeler que les essais des procédés Moussoulos sur le minerai de Madagascar, effectués en 1964, n'ont jamais dépassé le stade du laboratoire ( 80 kg d'échantillon mis en oeuvre ).

Bien qu'une étude de rentabilité appliquée à ce minerai ait fait suite à l'étude technique, et que les conclusions de M. MOUSSOULOS en aient été favorables, ces travaux n'ont pas connu de prolongement en vue d'une exploitation industrielle. Les raisons en sont inconnues de M. MOUSSOULOS et ne lui semblent pas être en rapport quelconque avec la technique ou l'économie de ses procédés .

### 3.2.3. Le minerai de YOUGOSLAVIE ( latérites de RZANOVO ) .

Ce minerai latéritique, à 1,03 % de Ni en moyenne, a fait l'objet, en 1962, d'importants travaux de laboratoire et de traitement en pilote à LARYMNA . Un lot de 7 000 tonnes a été testé à un débit de 50 t/h, dans un four rotatif de 90 m de long et 4,2 m de diamètre extérieur puis dans un four électrique de 7 200 kVA, pourvu d'une sole d'un diamètre de 4 m, enfin dans un convertisseur à oxygène soufflé de 8 tonnes.

Toutes les phases de l'étude, en laboratoire et en continu, ont été étroitement contrôlées et les résultats obtenus ont été reproduits dans de nombreux protocoles techniques à caractère officiel, signés par M. MOUSSOULOS et contresignés par une demi-douzaine d'experts yougoslaves. L'étude a été poussée jusqu'à la rédaction de l'avant-projet de réalisation industrielle. La somme considérable de données chiffrées et de renseignements technique et économique que représentent les documents rassemblés à l'occasion de cette étude aurait été fort utile pour juger critiquement de la valeur des procédés et de leur applicabilité, mais ils ne sont pas divulguables. Il a été, toutefois possible, d'en écouter quelques conclusions généralement favorables, et de noter la composition chimique moyenne suivante du minerai, déclaré apte à la valorisation du nickel par les procédés L-M et M-LAR :

	%
Fer total	34,58
Ni	1,03
Co	0,11
SiO <sub>2</sub>	28,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	2,91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,59
CaO	0,97
MgO	11,30
S	0,068
P	0,013
As	0
Perte au feu à 950°C	3,23
Humidité	2,73
FeO	4,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45,05 .

Le ferro-nickel obtenu titre 16 % de Ni + Co et le rendement d'extraction du Ni est supérieur à 95 %. Les impuretés contenues dans ce ferro-nickel titrent 0,02 % Cr, 0,02 % C et 0,02 % Si. Ces impuretés sont, selon M. MOUSSOULOS, inférieures aux tolérances commerciales. La scorie a une teneur de 34 % en Fer et est remarquablement épuisée en nickel (0,06 %).

#### 3.2.4. Le minerai des PHILIPPINES .

Il s'agit d'une latérite titrant 1,3 % de nickel et 30 % de fer . L'étude n'a été effectuée qu'en laboratoire, en 1970, et les conclusions sur l'applicabilité des procédés Moussoulos ont été favorables. Cette affaire est récente et il n'est pas encore possible d'en connaître les prolongements .

### 3.3. INFORMATIONS TECHNIQUES COMPLEMENTAIRES .

#### 3.3.1. Brevets .

Les procédés L-M et M-LAR sont protégés par des brevets déposés dans plusieurs pays, notamment en France (n°s 1232722/1960 et 1245260/1960), en République Fédérale Allemande (n° 1225216/1967) et aux USA (n°s 3077396/1963 et 3002832/1961).

Il importe de rappeler qu'il existe entre la Société LARCO et M. MOUSSOULOS, un contentieux sur lequel le tribunal d'Athènes n'a pas encore statué. Les droits d'exploitation en Grèce ou à l'Etranger des brevets Moussoulos mériteraient, par conséquent, d'être vérifiés et parfaitement garantis, avant toute négociation de cession de licence.

#### 3.3.2. Réduction en deux phases .

A l'issue de l'exposé de M. MOUSSOULOS au Symposium de Londres, le Dr J. J. PRINS, de l'université hollandaise de DELFT , a critiqué le procédé de réduction en deux phases. Il a semblé à M. PRINS que le préchauffage séparé d'une fraction de minerai et la réduction totale de la seconde fraction devaient entraîner une consommation d'énergie plus grande que dans le cas d'un traitement global du minerai entièrement préchauffé et sélectivement réduit. Il n'y aurait alors plus de raison de préférer utiliser une source de combustible à bon marché plutôt qu'une énergie électrique plus coûteuse. Mais, dans sa réponse , le Professeur MOUSSOULOS ne prétend nullement que sa réduction en deux phases ait pour objectif une économie de consommation d'énergie. Le mérite qu'il attribue à son procédé tient à la réalisation de récupérations élevées de nickel et de cobalt. Ces récupérations n'apportent pas seulement un avantage économique; elles permettent également d'obtenir une scorie ferreuse à teneur très faible en nickel (  $< 0,10\%$  ), favorable à la production d'un acier qui titre moins de  $0,25\%$  de nickel. ( *Advances in Extractive Metallurgy. Compte-rendu du Symposium ( p. 313 ) édité par ELSEVIER PUBLISHING Co. ESSEX - Angleterre* ). M. MOUSSOULOS a encore insisté sur cet avantage que représente une scorie bien épuisée en Ni , au cours de ses entretiens à ATHENES, le 11 janvier 1971 , avec les ingénieurs du B.R.G.M.

Par ailleurs, a-t-il répondu à M. PRINS, la sélectivité de réduction réalisée avec le fer spongieux, est également un autre avantage. Il faudrait admettre, tout d'abord, comme tout à fait exceptionnelle, la présence d'impuretés prohibitives dans les latérites, et l'existence de faibles teneurs d'arsenic dans le minerai de LARYMNA est le seul exemple que connaisse M. MOUSSOULOS. Dans ces conditions, le procédé L-M n'est pas soumis à l'impératif d'une phase complémentaire d'affinage et peut pratiquement toujours être limité à ses deux phases principales de réduction ( four tournant et four électrique ) conduisant à la production d'un alliage commercial de teneur réglable. Là encore, Monsieur MOUSSOULOS a confirmé à ATHENES que seul l'arsenic doit être encore considéré comme impureté gênante dans ses procédés .

Ainsi, pourvu que le minerai à traiter soit exempt d'arsenic, le domaine d'application des procédés Moussoulos n'est pas limité à un type restreint de latérite. Si l'un des avantages de ces procédés réside dans la valorisation simultanée du fer et du nickel, une haute teneur en fer dans les latérites ne constitue pas un caractère exclusif d'applicabilité et, selon M. MOUSSOULOS, les types variés de minerais oxydés de nickel, à teneur en fer même inférieure à 25 %, sont justifiables de ses procédés. Le procédé M-LAR de fabrication d'acier ne fait que consolider l'économie du traitement, mais il n'est pas indissociable du procédé L-M qui pourrait ainsi être appliqué, seul, à la production unique de nickel ou de ferromnickel. C'est d'ailleurs ce qui se passe actuellement et depuis un ou deux ans à LARYMNA où l'accroissement du prix du nickel, dû à la forte demande à la suite des grèves canadiennes de 1969, a conduit la direction de LARCO - contre l'avis de M. MOUSSOULOS - à doubler sa production de nickel en renonçant à la valorisation du fer et en utilisant à 100 % pour le nickel les installations du M-LAR.

### 3.3.3. Problèmes technologiques.

Les entretiens échangés avec le Professeur MOUSSOULOS impriment la conviction que l'applicabilité de ses procédés dépend beaucoup de particularités technologiques acquises au cours de la mise au point des essais pilote ainsi que durant la période de maturité industrielle du traitement à LARYMNA.

Il est intéressant de signaler, par exemple, que M. MOUSSOULOS lie assez étroitement l'efficacité de ses procédés, à la configuration du four de fusion, spécialement conçue pour utiliser au mieux le fer élémentaire obtenu au four tournant dans un état physique particulier, et pour en favoriser la décantation dans la scorie. Ce four électrique est garni de réfractaires dont l'entretien est pratiquement nul grâce à un système d'autogarnissage, et dont la durée, selon M. MOUSSOULOS, est capable d'être aussi longue que la vie de l'usine. Ces réfractaires sont constitués de chamottes à très bon marché, titrant 30 à 35 % d'alumine. L'usine de LARYMNA utilise les mêmes réfractaires depuis 1966 sans le moindre entretien, sauf de façon presque négligeable à la voûte. Le seul problème de réfractaire se manifeste au convertisseur de ferromnickel mais du fait du faible tonnage traité, cet entretien est insignifiant. Aussi, dans le cas d'une étude d'applicabilité à un minerai donné, devrait-il être vivement recommandé, par mesure de sécurité, de confier à M. MOUSSOULOS lui-même, ou tout au moins de l'y associer, l'élaboration complète des essais comprenant, non seulement les tests de laboratoires, mais également et surtout les travaux et contrôles du pilote ainsi que l'avant-projet d'ingénierie. M. MOUSSOULOS, à qui ont été précisément posées des questions d'ordre technologique sur les appareillages à prévoir, leurs dimensionnements et leurs capacités, les références des principaux constructeurs, etc..., s'est borné à faire savoir que l'usine de LARYMNA a été installée essentiellement par les ingénieurs de la

KRUPP, mais qu'il serait prêt, éventuellement, à se charger de la responsabilité d'une étude particulière complète qui pourrait lui être confiée. Cette responsabilité s'étendrait, naturellement, à la fois au domaine technique et à celui des prix de revient .

### 3.3.4. Récupération du nickel et du cobalt .

Les chiffres remarquablement élevés de récupération de nickel ( 98 % ) et de cobalt ( 85 % ) avancés par le Professeur MOUSSOULOS, au cours d'un traitement pyrométallurgique, n'ont pas manqué de retenir l'attention des spécialistes ( Dr TOUGARINOFF , de HOBOKEN , et Dr TOWNSHEND , de l'International Nickel ). Au cours de la discussion qui a fait suite, à Londres, à la communication de l'auteur , le Dr TOWNSHEND a exprimé que, sans doute, cette performance est liée étroitement à la fluidité de la scorie. Cette fluidité dépend, elle-même, de la teneur de la scorie en magnésie, produit éminemment réfractaire. Or, les latérites grecques, sur le traitement desquelles se fonde M. MOUSSOULOS, sont relativement pauvres en chaux ( 2,5 % ) et en magnésie ( 2,6 % ), ce qui n'est pas le cas de plusieurs autres types de latérites. Aussi M. TOWNSHEND a demandé à M. MOUSSOULOS quelle serait la fluidité d'une scorie à 10-15 % de MgO et quelles récupérations du Ni et du Co une telle fluidité permettrait d'escompter .

Dans sa réponse ( cf. ouvrage cité p. 312 ), le Professeur MOUSSOULOS précise que les récupérations exceptionnelles obtenues avec ses procédés sont dues à plusieurs facteurs :

#### - l'état physique du fer élémentaire

qui entre dans le four électrique à un degré de dispersion très élevé. Lorsque la réduction en four rotatif a été bien conduite, ce fer se trouve divisé en très fines particules, d'un diamètre variant entre 2 et 10 microns ;

#### - la technique d'alimentation du four électrique

cette alimentation est réglée de telle sorte que la charge se maintient pendant un certain temps à la surface de la scorie, à une température ambiante élevée. Pendant cette période s'effectue la réduction des oxydes de Ni et de Co tandis que les petites particules de fer résiduaire se développent en fusionnant, ce qui permet une meilleure sédimentation ;

#### - la nature de l'élément réducteur

après avoir permis la réduction des oxydes de nickel et de cobalt à la surface de la scorie ( les réactions ayant eu lieu entre phases solides ), le fer réducteur fond et traverse la scorie, achevant de réduire, dans son trajet, ce qui reste des oxydes de Ni et de Co. Il en résulte en quelque sorte un équilibre dynamique avec épuisement continu et efficace de la scorie ;

### - la fluidité de la scorie

le diagramme tertiaire  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{CaO}$  (MgO étant comptée comme CaO), reproduit dans la communication de M. MOUSSOULOS, fait apparaître, rappelle l'auteur, une zone hachurée de grande surface traduisant la grande souplesse des conditions de fusion et de fluidité de la scorie nécessaires à l'application du procédé L-M. Il est ainsi possible de traiter, sans addition supplémentaire de fondants, une grande variété de latérites. M. MOUSSOULOS cite des essais effectués lorsque la teneur en MgO est élevée - particulièrement lorsqu'elle atteint 10 à 15 % - . Il s'agit des latérites yougoslaves de RZANOVO, testées à l'échelle pilote (sur 7 000 tonnes) et titrant 11,3 % de MgO. La fluidité de la scorie a été excellente et les taux habituellement élevés de récupérations ont été aisément et régulièrement atteints. Naturellement, à Athènes, le Professeur MOUSSOULOS a confirmé, de vive voix, au B.R.G.M. ces affirmations, tempérées toutefois par une valeur un peu moins spectaculaire des chiffres de récupération (80 % environ pour le Co, 96,5 % pour le Ni de Larymna, 95 % pour le Ni de Yougoslavie, 93 % pour le Ni de Madagascar, sur des alliages de ferro-nickel titrant respectivement 25 %, 16 % et 15 % de Ni + Co).

### 3.3.5. Valorisation du fer par M-LAR.

Si, techniquement, le procédé L-M seul est suffisant et indépendant pour extraire le nickel des latérites, comme le montre le fonctionnement actuel (et provisoire) de l'usine de LARYMNA, il n'en demeure pas moins que l'appréciation du procédé L-M appliqué aux minerais pauvres (à 1 % Ni) doit tenir compte du procédé M-LAR qui lui est associé et qui en assure peut-être, dans les cas marginaux, la rentabilité générale. Cette remarque a, d'ailleurs, été soulignée à Londres, par le Professeur REY, de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de PARIS, lorsqu'il a affirmé que (ouvrage cité p. 300), "généralement des teneurs en nickel et cobalt n'étaient pas suffisamment élevées pour couvrir les frais de traitement par un procédé coûteux, mais la production simultanée d'acier pourrait rendre économique ce traitement". M. MOUSSOULOS a affirmé, à Athènes, qu'une latérite à 1 % de Ni était, selon ses procédés, exploitable, sous réserve, bien entendu, non seulement de conditions locales de prix de revient, mais sans doute aussi de l'utilisation du M-LAR pour la valorisation du fer. Une telle réserve implique une teneur suffisamment élevée en fer dans la latérite.

Il convient, en outre, de signaler que le procédé M-LAR, en prolongement du L-M, permet de récupérer le chrome, soit par une technique spéciale liée au M-LAR et utilisant du poussier de charbon à bas prix, soit sous forme de scorie finale à 30 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Enfin, le traitement du M-LAR appliqué aux scories permet de réduire considérablement les frais qu'aurait entraînés, pour leur élimination, les opérations nécessaires de refroidissement, stockage, broyage et enlèvement .

### 3.3.6 Teneurs commerciales des ferro-nickels .

Il existe différents types de ferro-nickel commerciaux, variables essentiellement par leurs teneurs en nickel. A titre indicatif, les renseignements suivants tirés de l'ouvrage récent de J.R. BOLT ( The Winning of the Nickel, 1967 ) donnent un aperçu des teneurs généralement rencontrées dans les principales impuretés .

	Ni+Co %	S %	P %	C %	Si %	Cr %	Cu %
Sté LE NICKEL : (DONIAMBO)	29	0,02	0,02	0,02	0,02		
-d°-	24	0,3		2	3		
-d°-	26	0,03		1,5	1,5		
Sumitomo Metal Mining Cy	20			0,02 à 3			
Taiheiyo Nickel Cy	25	0,02	0,01	0,02			
Shimura Kako Cy	20			0,02 à 3			
Nippon Mining Cy	20	0,05	0,03	3	< 3	< 2	
Nippon Yakin Kogyo Cy	26	0,03	0,03	0,15	0,01	0,1	0,1
Morro do Niquel (Brésil)	30	0,03	0,03	0,03	0,03		
Procédés MOUSSOULOS	15-25	0,1 à 0,3	0,01 à 0,03	0,03 à 0,1	0,01 à 0,02	0 à 0,02	

### 3.4. INFORMATIONS ECONOMIQUES .

Tenu par des engagements de confidentialité, le Professeur MOUSSOULOS n'a pas pu découvrir ses documents d'étude économique et s'est borné à répondre à certaines questions d'ordre général en ajoutant, toutefois, quelques renseignements chiffrés autorisés .

C'est ainsi qu'il faut exclure toute association de la rentabilité du traitement du minerai pauvre de LARYMNA, à un privilège fiscal quelconque ou à un tarif préférentiel de vente interne. Il existe, certes, un accord bilatéral entre la Société LARCO et l'administration de l'Etat sur le prix de cession du kWh, qui coûte 0,0056 dollar U.S., et ce prix jouit ainsi d'un abattement de 50 % dû à son utilisation industrielle. M. MOUSSOULOS a même ajouté qu'il serait encore deux à trois fois moins élevé si l'exploitant disposait d'une usine hydroélectrique. La Grèce est membre, à part entière, du Marché Commun et la tonne de nickel de LARYMNA est vendue actuellement, selon M. MOUSSOULOS, 1 246,5 livres, ce qui correspond à la cotation internationale des tarifs de ce métal. Ce nickel grec est essentiellement exporté en Angleterre et en Amérique .

Le prix de revient du nickel de LARYMNA , vendu sous forme de ferro-nickel à 30-40 % de Ni, se situe aux environs de 1,40 dollar le kg ( le chiffre exact est confidentiel ). M. MOUSSOULOS estime que ce prix de revient peut être réduit de 15 % grâce à une économie possible de personnel , dont le recrutement aurait subi un certain népotisme quelque peu coûteux . Il est bon de noter, à ce propos, que la simplicité des procédés L-M et M-LAR dispense de l'utilisation d'un personnel de haute technicité, et qu'à LARYMNA, le recrutement s'est fait " chez les bergers des alentours " , dont la formation professionnelle n'a demandé que deux à trois mois .

Le prix de revient de l'effectif dépend des données locales. En Grèce, le poste " matériaux et salaires " coûte 51 dollars par tonne de nickel produit, soit 0,5 dollar par tonne de latérite traitée. Ce calcul est basé sur un coût horaire moyen actuel du personnel de 1,1 dollar .

Par ailleurs, un calcul effectué en 1968 pour le compte des yougoslaves, a permis d'établir le prix de revient maximum d'une usine à 20 dollars la tonne annuelle de minerai. Un autre calcul relatif à une latérite philippine, pour une usine de 2,4 millions de tonnes par an, a conduit à prévoir, en mai 1968, un chiffre d'investissements de 28,75 millions de dollars pour la construction de l'usine de traitement. Ces chiffres comprennent les investissements, les stockages et les services généraux. Il conviendrait d'y ajouter 23,4 millions de dollars pour une éventuelle centrale électrique .

#### 4.- LE PROCEDE M-P .

Le procédé M-P, abrégé de N-M-P ( New Moussoulos Process ) est issu de préoccupations économiques. La rentabilité des procédés L-M et M-LAR dont l'étude fait l'objet d'un chapitre séparé, dépend, dans une très large mesure, du prix de revient de l'énergie électrique. S'il existe un privilège classique d'abattement du kWh, celui-ci tend à favoriser la rentabilité du traitement, mais il n'en est pas moins un facteur de servitude. Certes, l'installation d'une centrale électrique pourrait conférer une certaine autonomie de gestion, mais il faudrait payer, au départ, le prix d'investissements élevés .

Le procédé M-P a précisément pour objet de traiter, plus économiquement, les minerais latéritiques de nickel, en n'utilisant que la réduction carbométallique, à l'exclusion de la fusion coûteuse au four électrique. Son principe reste actuellement secret, et les brevets qui le décrivent n'ont pas encore été publiés .

Etudié et mis au point au laboratoire par M. MOUSSOULOS, il est sur le point de subir l'épreuve du pilote en continu auprès d'une Société importante de l'Allemagne de l'Ouest ( M. MOUSSOULOS ne l'a pas nommée, mais il s'agit certainement de la Société POLYSIUS ) qui a accepté d'engager les capitaux nécessaires à l'installation des équipements et aux travaux de mise au point. Une étude technique et économique comparée des procédés Moussoulos classiques ( L-M et M-LAR ) et du nouveau procédé Moussoulos ( M-P ) a fait apparaître les avantages de ce dernier, qualifiés de " révolutionnaires " par leur inventeur. S'il n'a pas été possible d'en recueillir des preuves techniques, du moins une première appréciation peut-elle apparaître, en première approximation et sous toutes réserves de confirmation en essais continus, à partir des renseignements économiques succincts et inédits suivants :

	Procédés L-M & M-LAR	Procédé M-P
Prix de revient technique métallurgique (par kg de Ni produit) (x)	0,61 dollar	0,35 dollar
Investissements pour l'installation de l'usine	31,150 millions de dollars	26,750 millions de dollars
Centrale électrique	23,400 -d°-	5,400 -d°-
(x) Ces chiffres comparés sont donnés avec une certaine marge de sécurité, car ils supposent un rendement d'extraction du Nickel de 95 % avec L-M et de 90 % avec M-P .		

Il est évidemment hors de question d'y porter le moindre jugement critique, en l'absence de toute information technique. Le Professeur MOUSSOULOS lui-même, questionné sur ce point, n'engagerait pas encore un nouvel exploitant à utiliser son procédé M-P dont il reconnaît le manque de maturité, contrairement au L-M qui a atteint, selon les termes de son auteur, " un degré de mise au point absolu " .

Toutefois, M. MOUSSOULOS accepterait volontiers de tester, éventuellement, le nouveau procédé M-P sur un minerai donné, dans les conditions suivantes :

- a) essais de laboratoire, à partir d'un échantillon de 50 kg , en vue de déterminer les paramètres de fonctionnement. Pour des raisons de confidentialité, cette étude serait effectuée en l'absence de l'intéressé ;
- b) essais, à l'échelle pilote, à partir d'un échantillon important pour la mise au point du fonctionnement en continu. Après toutes les mises au point, les essais pourront être poursuivis en présence de l'intéressé .

II.- ETUDE ECONOMIQUE .

## I. - INTRODUCTION .

Si on laisse de côté pour le moment les procédés M-P , encore au stade des essais, l'ensemble des procédés dont le schéma figure en page 8<sup>1</sup> peut se diviser en trois étapes :

<p style="text-align: center;">A Procédé L-M</p>	<p>{ Four rotatif suivi d'un four électrique . Obtention d'un Fe Ni à 15-25 % de Ni + Co .</p>
<p style="text-align: center;">B Phases d'affinage du procédé L-M</p>	<p>{ B 1 : Passage au convertisseur. Obtention de Fe Ni à 90 % de Ni + Co . B 2 : Electrolyse . Obtention de Ni à 99,9 % .</p>
<p style="text-align: center;">C Procédé M-LAR</p>	<p>{ Utilisation de la scorie L-M du four électrique en mélange avec du minerai de fer conventionnel pour fabrication d'acier .</p>

Les étapes B et C ne sont pas obligatoires. On peut très bien envisager de s'arrêter à A , ce que fait actuellement la Société LARCO. On pourrait aussi envisager de réaliser d'abord les investissements de l'étape A et de réserver la décision pour les étapes B et C en prévoyant, néanmoins , la possibilité de les réaliser dans le projet .

## 2.- PLAN de TRAVAIL .

Nous examinerons, en premier lieu, la rentabilité de l'étape A seule, ce qui nous paraît la question préalable essentielle ; ( l'opportunité de prévoir ou non un raffinage pour obtenir le nickel pur, est subordonnée et on peut en reporter l'étude à un stade ultérieur ) .

Utilisant les déclarations du Professeur MOUSSOULOS et les autres sources d'information dont nous disposons, nous déterminerons des ordres de grandeur de teneurs limites .

Nous examinerons, ensuite , si la réalisation de l'étape C ( procédé M-LAR pour aciérie ) est susceptible d'abaisser ces teneurs limites .

**3. - COUT de FONCTIONNEMENT TYPE du PROCEDE M-L  
RAMENE à la TONNE SECHE METRIQUE de LATERITE  
TRAITEE - CADENCE D'ENVIRON 750 000 T / AN .**

---

Les coûts unitaires indiqués dans le tableau ci-dessous sont estimés pour l'essentiel d'après les propres indications du Professeur MOUSSOULOS , représentant les conditions grecques actuelles :

Postes	Unité	Coût unitaire \$	Unité par Tonne	\$ par Tonne
Main d'oeuvre (toutes catégories)	Heure	1,10	0,9	0,99
Energie de fusion	kWh	0,0056	580	3,24
Pate d'électrode	kg	0,16	7,2	1,15
Combustible de réduction (semi coke de lignite)	kg	0,012	260	3,12
Entretien, rechanges et divers				2,13
				10,63
Frais généraux et services	20 % du total précédent			2,13
				12,76
Imprévus	10 %	"	"	1,28
<b>TOTAL GENERAL</b>				<b>14,04</b>

**N.B.** Le coût de 14,04 \$ la tonne correspond pour du minerai à 1 % de nickel récupérable - très approchée de la valeur actuelle du gisement de LARYMNA - à environ 1,40 \$ par kg de nickel contenu dans le ferro-nickel produit.

4. - VALORISATION par TONNE SECHE  
de LATERITE TRAITEE .

---

Soit  $t$  % la teneur sur sec en nickel .

Nous ne tiendrons pas compte du cobalt dont la valorisation est aléatoire et, dans le meilleur des cas, faible par rapport à celle du nickel .

Admettons une récupération de 90 % ; pour une tonne sèche de latérite traitée on récupérera 9 t/kg de nickel ou 19,9 t/lbs .

Sur la base du cours actuel de l'INCO de 1,33 \$ / lb , nous déduisons 5 ¢ /lb pour frais de commercialisation - transports - etc... et retenons pour le nickel contenu dans une tonne de ferro-nickel carreau usine, la valeur de 1,28 \$ .

On aura donc par tonne sèche entrée usine, une valorisation de :

$$1,28 \times 19,9 \text{ t} = 25,5 \text{ t} .$$

5.- MONTANT des INVESTISSEMENTS de l'USINE  
de TRAITEMENT et des SERVICES ANNEXES  
( Centrale exclue ) .

---

Nous retiendrons le chiffre de 20 dollars par tonne/an de capacité, valable pour des conditions grecques, pour une cadence se situant aux alentours de 750 000 tonnes traitées par an ( 1 ) .

Certes, ce chiffre de 20 dollars cité par le Professeur MOUSSOULOS, serait valable pour le procédé complet L-M + M-LAR , donc à réduire sensiblement si on n'envisage que le L-M , mais, en revanche, d'autres sources d'information très sérieuses nous font penser que les estimations données par le Professeur MOUSSOULOS seraient très optimistes .

En réalité, le chiffre de 20 dollars/tonne/an de capacité nous semble un minimum, si on veut tenir compte des installations annexes en amont et en aval, de l'engineering et du fonds de roulement .

Les voies d'accès, les logements et les infrastructures ne concernant pas directement l'usine de traitement, ne sont pas incluses dans ce chiffre .

---

( 1 ) A noter que l'économie d'échelle joue très peu si l'augmentation de capacité est obtenue par une addition de lignes parallèles (fours tournants limités à 40 t/h).

6. - CRITERE de RENTABILITE pour UNE  
TENEUR LIMITE .

---

Le critère de rentabilité que nous retenons est celui d'un DCF de 20 % hors taxes sur l'ensemble des investissements supposés intégralement en capital. Suivant le régime de taxation, la possibilité de constituer des provisions pour reconstitution de gisement, etc... ce DCF se trouverait, évidemment, notablement diminué .

Nous supposons, en outre, une période de construction de trois ans suivie d'une période de marche de dix ans .

On raisonne en dollars constants, c'est-à-dire que les dépréciations monétaires entraînant des " glissements de prix " sont supposées compensées par des dévaluations ou des augmentations du cours du nickel .

Le critère que nous nous fixons correspond à un rapport B/I de 28 % , ou B est le bénéfice brut annuel et I le montant total des investissements .

## 7.- TENEURS LIMITES .

Nous les calculerons sur deux modèles correspondant à deux types de gisement .

### Modèle A

Il correspond à un ciel ouvert, taux de recouvrement S/M de l'ordre de 2/1 , latérites à 40 % d'humidité pour lequel nous prendrons :

. Coût de fonctionnement d'extraction ( par tonne sèche traitée)	2 \$ /T
. Investissements pour la carrière ( par tonne sèche annuelle traitée )	4,5 \$ /T .

Ces coûts et investissements tiennent compte de tous services généraux dépendants .

On aurait donc :

$$\text{Coût de fonctionnement global } 14,1 + 2 = 16,1 \text{ \$ /T}$$

$$I = \text{Investissements totaux : } 20 + 4,5 = 24,5 \text{ \$/T annuelle}$$

Soit T le tonnage annuel traité

$$I = 24,5 T$$

$$\text{Recette annuelle : } 25,5 \text{ t T .}$$

$$\text{- Dépenses de fonctionnement annuelles } 16,1 T$$


---

$$= \text{Bénéfice brut annuel : } B = (25,5 t - 16,1) T$$

$$\text{D'ou } B/I = (25,5 t - 16,1) / 24,5 = 1,04 t - 0,66 .$$

Le critère que nous nous sommes fixés exige :

$$1,04 t - 0,66 \geq 0,28$$

$$\text{D'ou } t \geq 0,91 \% \text{ de Ni .}$$

Modèle B

Il correspond à un gisement souterrain peu penté et peu profond -  
puissance d'au-moins 1,80 m . Bonnes conditions d'exploitation .

. Coût de fonctionnement d'extraction ( par tonne sèche traitée)	3 \$/ T
. Coût des investissements ( par tonne sèche annuelle traitée )	6,5 \$ /T

D'ou :

$$\text{Coût de fonctionnement global : } 14,1 + 3 = 17,1 \text{ \$ /T}$$

$$I = \text{Investissements totaux : } 20 + 6,5 = 26,5 \text{ \$ /T}$$

teneur limite est donnée par :

$$B/I = ( 25,5 \text{ t} - 17,1 ) / 26,5 = 0,96 \text{ t} - 0,65 \geq 0,28$$

$$\text{D'ou } t \geq 0,97 \% .$$

## 8. - REMARQUES DIVERSES .

Il est inutile d'insister sur la large part d'approximation que comportent les estimations et calculs qui précèdent .

Ils sont basés, pour une part essentielle, sur les propres déclarations du Professeur MOUSSOULOS et concernent, dans les conditions grecques , un minerai pour lequel le procédé s'appliquerait tel quel sans augmentation de coût . On peut envisager de nombreux motifs d'une telle augmentation par exemple :

- . Nécessité d'une désulfuration du ferro-nickel ;
- . Nécessité d'ajouter un fondant, par exemple de la silice , à la charge ;
- . Nécessité de pelletiser la charge à l'entrée, en raison d'un pourcentage excessif de fines entraînant des pertes mécaniques élevées .

Nous avons, néanmoins, forcé les estimations du Professeur MOUSSOULOS en ce qui concerne les investissements, pour lesquels l'ensemble des informations dont nous disposons nous donne à croire que ses estimations sont très optimistes. Nous aurions même tendance à penser que nous sommes restés au-dessous de leur valeur probable .

En tout cas, il y aurait lieu d'y ajouter, le cas échéant, le coût d'une centrale et d'une cité, voire de voies d'accès ou d'installations portuaires .

## 9.- LE PROCEDE M-LAR .

La réalisation de l'étape C ( fabrication de l'acier par le procédé M - LAR ) est-elle susceptible d'abaisser les teneurs limites en nickel en compensant une rentabilité insuffisante de l'étape A ( fabrication du ferro-nickel ) ?

Un calcul économique sommaire, nous conduit à estimer le coût de fonctionnement de l'acier produit à une valeur voisine de son prix de vente. Certes, les trois quarts du minerai et un certain apport de thermies sont gratuits mais, en compensation, il y a des inconvénients, résultant de la composition de la scorie notamment de sa teneur en S , de la nécessité d'un apport de chaux et d'une cadence relativement réduite .

Nous n'avons pas d'éléments suffisants pour conclure que le procédé M-LAR associé au L-M ne présente pas d'intérêt à titre de complément et nous nous garderons de le faire. Nous dirons, seulement, que ces deux problèmes peuvent être étudiés indépendamment mais qu'il serait très hasardeux de compter sur le complément éventuel de l'acier pour abaisser les teneurs limites en nickel, calculées sur la base d'une valorisation par le seul ferro-nickel .

## 10.- LE PROCÉDE M-P .

Nous n'en parlerons que brièvement puisque des essais sont encore en cours. Il est certain que si les chiffres cités en page 19 étaient confirmés, il s'agirait bien d'une " révolution " puisque le coût de fonctionnement serait diminué de plus de 40 % et les investissements de plus de 10 % .

En prenant un coût de fonctionnement usine de 57,5 % du coût précédemment estimé soit  $0,575 \times 14,2 = 8,20$  \$ / T et des investissements usine de 86 % soit  $0,86 \times 20 = 17,2$  \$ /T.an , les teneurs ci-dessus calculées deviendraient, toutes choses égales d'ailleurs :

- . Modèle A :  $t \geq 0,64$  (au lieu de 0,91)
- . Modèle B :  $t \geq 0,70$  (au lieu de 0,97).

—

## CONCLUSIONS GENERALES

Sur le plan technique, d'après les données fournies par le Professeur MOUSSOULOS, les procédés de valorisation des latérites nickelifères qu'il a mis au point aboutissent à des taux d'enrichissement intéressants .

### Le procédé L-M

appliqué à un tout-venant latéritique à 1,2 % Ni et 0,2 % Co, permet d'obtenir un alliage commercial à 20 % Ni + Co , avec une récupération de 98 % en nickel et 85 % en cobalt .

### Le procédé M-LAR

peut reprendre les scories du traitement précédent et les valoriser sous forme de fonte chromifère à 3,5 % de carbone convertible en acier .

### Le procédé N-M P

englobe les procédés L-M et M-LAR , sans nécessiter d'affinage au four électrique. Il reculerait donc sensiblement les limites de valorisation des minerais oxydés de nickel, l'absence de preuves techniques ne confirmant pas encore sa portée exacte .

Sur le plan économique, l'étude de la rentabilité des procédés MOUSSOULOS ramenée à la tonne sèche métrique T de latérite traitée pour une production de 750 000 T/an conduit aux résultats suivants :

### Le procédé L-M

a un coût de fonctionnement de 14,1 \$ /T et entraîne une valorisation de 25,5 t \$/T si t est la teneur sur sec en nickel. En se fixant un critère de rentabilité de 28 % , on peut déterminer une teneur limite de :

- 0,91 % en nickel pour une exploitation à ciel ouvert avec recouvrement de 2/1 et humidité de 40 % .
- 0,97 % en nickel pour un gisement souterrain exploitable dans de bonnes conditions sur une puissance supérieure à 1,80 m .

Le procédé M-LAR

paraît abaisser, de façon hasardeuse, les teneurs limites en nickel en produisant de l'acier .

Le procédé N-M-P,

en première estimation , abaisserait le coût de fonctionnement à 8,20 \$/T et ramènerait les teneurs limites à :

- 0,64 % en carrière
- 0,70 % en mine .

Au vu de ces résultats, et compte-tenu de certaines restrictions géologiques ( impuretés prohibitives ) , techniques ( configuration du four de fusion ) , et économiques ( estimation des investissements ) , il est nécessaire de passer par une échelle-pilote avant toute conclusion définitive . Cela permettrait de tester, sur un type donné de minerai, l'efficacité du procédé L-M , éventuellement associé au procédé M-LAR , et de le comparer au procédé N-M-P qui est moins utilisé .

Pour être valables, ces essais ne peuvent se faire que sous la direction du Professeur MOUSSOULOS dont la compétence fait autorité en la matière, mais ils doivent être effectués en présence de techniciens-experts étrangers à l'équipe MOUSSOULOS, et accrédités par le demandeur dans un but de contrôle et d'appréciation évident. Ces conditions permettraient d'obtenir le maximum de garanties sur la validité des paramètres expérimentaux ainsi déterminés .