

# RP 270

LE FOUR ELECTRIQUE DANS L'OBTENTION DE MATTES A PARTIR DE MINERAIS ET DE CONCENTRES DU CUIVRE

Documents complémentaires

*Additional Files*



Licence



Licence

Cette première page a été ajoutée  
au document et ne fait pas partie du  
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources  
naturelles

Québec 

PROVINCE DE QUÉBEC. CANADA  
MINISTÈRE DES MINES  
SERVICE DES LABORATOIRES

---

LE FOUR ÉLECTRIQUE DANS L'OBTENTION  
DE MATTES À PARTIR DE MINÉRAIS  
ET DE CONCENTRÉS DE CUIVRE

PAR

J. U. MACÉWAN



QUÉBEC  
1953

R. P. No 270



L'auteur désire exprimer ses remerciements à l'Honorable C.D. French, Ministre; au Dr A.C. Dufresne, Sous-ministre et au Dr Maurice Archambault, Directeur des Recherches du Ministère des Mines, pour leur approbation et leurs conseils ainsi que pour l'aide financière sans laquelle ces travaux n'auraient pas été possibles.

Il remercie également monsieur J.W. Goth de l'aide qu'il lui a apportée dans la partie expérimentale de l'étude.



## TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
INTRODUCTION .....	1
METHODES COURANTES D'ELABORATION .....	1
Four à réverbère .....	1
Haut fourneau .....	2
CHIMIE DE LA FUSION DES MATTES POUR LA RECUPERATION DU CUIVRE .....	2
Constitution des mattes .....	3
Elimination du soufre .....	5
Qualité optimum de la matte .....	6
CONSTITUTION DES SCORIES .....	7
CONDUCTIBILITE DES SCORIES .....	7
LE FOUR ELECTRIQUE .....	8
MATERIEL EXPERIMENTAL .....	9
Four électrique .....	9
Source d'énergie .....	10
Appareillage auxiliaire .....	10
MATIERES PREMIERES .....	10
Concentrés bruts .....	10
Concentrés grillés .....	10
Silice .....	11
Calcaire .....	11
Pyrites grillées .....	11
PROCEDE EXPERIMENTAL .....	11
Généralités .....	11
Mise en route .....	12
Marche de l'opération .....	12
Fusion de concentrés grillés .....	12
Fusion de concentrés non grillés .....	12
COMPTE RENDU SOLENNEL DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX .....	13
Analyse des produits du four .....	15
Etude des mattes et des scories .....	16
Comptes rendus numériques des expériences .....	19

	<u>Page</u>
Comptes rendus numériques de l'expérience no 3.....	20
DONNEES SUR LA CONDUCTIBILITE .....	21
BILAN CALORIQUE DU FOUR .....	22
CONCLUSIONS .....	23
FOUR COMMERCIAL RECOMMANDE .....	24
BIBLIOGRAPHIE .....	26

ILLUSTRATIONS(A la fin de la brochure)Figures

- Figure 1 - Energies libres de formation des sulfures métalliques communs relatives à des réactions ne faisant intervenir qu'une molécule gramme de soufre gazeux  $S_2$ . (1)
- Figure 2 - Diagramme d'équilibre  $Cu_2S$  et  $FeS$ . (3)
- Figure 3 - Pourcentage de cuivre contenu dans la scorie en fonction de la qualité des mattes. (4)
- Figure 4 - Diagramme d'équilibre ternaire  $SiO_2 - FeO - CaO$ . (5)
- Figure 5 - Schéma coté du four électrique.

Planches

- Planche I - Le four électrique expérimental.
- Planche II A - Vue au microscope de la matte de la seconde expérience contenant 53.2 pour cent de cuivre. C'est une solution solide et homogène de bornite avec des plages de cuivre métallique.
- Planche II B - Vue au microscope de la matte de l'expérience No 4 contenant 29.7 pour cent de cuivre. On distingue quelques plages de magnétite. Les régions noires sont denses.
- Planche III A - Vue au microscope (x100) de la scorie de la seconde expérience. Les plages pâles sont constituées de matte occluse. Le fond noir est dû à la magnétite.
- Planche III B - Vue au microscope (x100) de la scorie de l'expérience No 4. Là encore apparition de matte non décantée.
- Planche IV - Diagramme de diffraction des rayons X des substances trouvées dans les échantillons de matte et de scorie.



I I

T A B L E A U X

			<u>Page</u>
Tableau	I	- Analyses des mattes et des scories.....	15
Tableau	II	- Analyses des mattes par diffraction de rayons X.....	16
Tableau	III	- Analyses des scories par diffraction de rayons X.....	17
Tableau	IV	- Valeurs de d (en Å) trouvées pour la magnétite, la bornite, le pyroxène et la composante X.....	18
Tableau	V	- Résumé sommaire sur la marche du four.....	19
Tableau	VI	- Données expérimentales de l'opération No 3.....	20
Tableau	VII	- Détermination des conductibilités.....	21

## LE FOUR ELECTRIQUE DANS L'OBTENTION DE MATTES A PARTIR

### DE MINERAIS ET DE CONCENTRES DE CUIVRE

#### INTRODUCTION

La fusion de tous les minerais à base de sulfure de cuivre et des concentrés correspondants se fait actuellement en Amérique du Nord soit au four à réverbère, soit au haut-fourneau. Le four à réverbère étant toutefois le plus souvent employé. Les deux types de fours ont été poussés à un haut degré de perfectionnement, mais leurs grandes dimensions ne permettent de les utiliser que dans une production à grande échelle.

Bien que ce rapport préconise la fusion des minerais et des concentrés de cuivre au four électrique, nous ne suggérons nullement une concurrence avec les méthodes actuelles, sauf dans les régions où les conditions sont à la fois défavorables aux fours à combustibles et favorables aux fours électriques. Les petites quantités de minerais de pourcentages acceptables situées dans des régions plus ou moins reculées, loin des fonderies et des réserves de combustibles, ont peu de valeur économique. Le faible tonnage ne justifie pas la construction d'un four à réverbère ou d'un four à cuve, et le coût élevé du transport ne permet pas l'envoi du minerai aux fonderies déjà existantes. Si, cependant, on dispose d'énergie électrique à bon marché, qu'elle soit locale ou transmise, les possibilités de son utilisation sont d'un intérêt certain pour les propriétaires de ces mines.

#### METHODES COURANTES DE FUSION

Le four à réverbère est idéal pour les opérations à grande échelle, il absorbe les charges pulvérisées produites par des installations modernes de flottation ainsi que des combustibles et fondants broyés. Le charbon pulvérisé est le combustible employé dans les fours à réverbère du Canada, bien qu'ailleurs là où ils sont abondants et bon marché, on utilise les gaz naturels et l'huile. La longueur d'un tel four a été standardisée à 100 pieds, une longueur de 70 pieds constitue la zone de fusion tandis que les 30 autres pieds constituant l'avant du four servent de zone de décantation où la scorie se sépare de la matte. La largeur varie de vingt-huit à trente-quatre pieds lorsque le toit est formé d'une arche de silice ou lorsque celui-ci, suspendu, est en magnésite. Les dimensions déterminent plus ou moins la capacité du four pour une opération donnée.

La charge du four à réverbère peut être grillée ou non. Les teneurs en cuivre, en métaux précieux et en soufre de la charge doivent être rigoureusement connues, afin de déterminer la composition la plus économique de la matte que l'on doit essayer d'obtenir pour l'opération considérée. De ces données, le degré de désulfuration est fixé, il peut varier de zéro à un fort pourcentage.

Un four à réverbère avec ses installations auxiliaires pour le grillage et la transformation des minerais nécessite une usine aux larges dimensions et, par conséquent, une mise de fonds considérable. La production

quotidienne varie d'une usine à l'autre, mais une production journalière minimum de 400 tonnes est considérée comme indispensable pour que l'opération soit rentable et certains fours ont deux ou trois fois cette capacité. Une opération continue durant plusieurs années doit être prévue marchant à pleine capacité ou presque, pour justifier la construction d'une telle usine.

L'élaboration au haut-fourneau présente une certaine importance. Les fours traitent des minerais grossièrement concassés, des fines et des concentrés agglomérés, car ils ne conviennent seulement que pour traiter des charges grossières. Les hauts-fourneaux peuvent fonctionner avec des capacités très variables, aussi les emploie-t-on en général là où la production quotidienne est insuffisante pour l'utilisation de fours à réverbère. Néanmoins, la charge journalière minimum doit être d'environ 250 tonnes, pour que l'opération soit rentable. Le capital initial à engager pour la construction d'un haut-fourneau, de ses grilleurs et des convertisseurs accessoires est moindre que pour celui d'une usine à four à réverbère, mais il représente néanmoins des investissements considérables. Lorsqu'il ne s'agit pas de pyrites, le seul combustible à envisager est le coke, son coût est particulièrement élevé surtout si le transport est lui-même onéreux. De plus, d'importantes réserves de minerai sont nécessaires, pour assurer une production quotidienne pendant plusieurs années à un niveau tel que les charges fixes d'amortissement par livre de cuivre ne soient pas prohibitives.

Les prix élevés des combustibles ont conduit à deux innovations intéressantes, dans le traitement des mattes de cuivre au four à réverbère. En Finlande, un four fonctionne sans l'utilisation de combustibles carbonés. La chaleur nécessaire est fournie par l'oxydation des sulfures de fer et du soufre de la charge, à l'aide de l'air préchauffé fourni de la manière suivante: Les gaz sortant du four à une température d'environ 2300°F. circulent dans des récupérateurs où ils réchauffent l'air avant son entrée dans le four. L'autre procédé, actuellement en cours d'essais, utilisera l'oxygène commercial pour l'oxydation des minerais sulfurés. Les quantités de chaleur dégagée par ces réactions sont suffisantes pour porter le four à la température de fusion de la charge, car il n'y a que peu d'azote présent pour absorber les calories. Ces deux derniers procédés exigent d'importantes mises de fonds et ne peuvent, par conséquent, servir que pour des opérations à grande échelle.

C'est à la lumière de ces quelques observations, qu'il convient de considérer la possibilité d'employer de petits fours électriques de fusion. Les fours électriques d'une grande variété de dimensions peuvent facilement être mis en service, ceci sans un nombre excessif de techniciens, leur contrôle étant assuré mécaniquement. L'énergie électrique est disponible dans beaucoup de régions isolées, soit à l'aide de lignes de transport, soit grâce à des installations locales hydroélectriques ou à des groupes électrogènes (diésel-génératrice). Si ce mode de fusion est démontré satisfaisant, les propriétaires de petites mines isolées pourront envisager de transformer eux-mêmes leurs concentrés, en mattes et même en cuivre noir. Ces derniers pourront être alors expédiés, en vue d'un raffinage plus poussé, à un prix plus avantageux que les concentrés.

#### CHIMIE DE LA FUSION DES MATTES POUR L'OBTENTION DU CUIVRE

La fusion des mattes est basée d'une part sur la grande

affinité que présente le cuivre pour le soufre, en formant le composé  $\text{Cu}_2\text{S}$  qui est stable à haute température et d'autre part, sur le peu d'affinité que présente le cuivre pour l'oxygène. Les autres métaux (Fe, Ni, Co, Zn) se trouvant dans les minerais de cuivre forment des sulfures stables, dans les conditions normales de fusion.

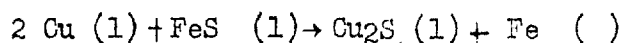
Les stabilités de ces différents sulfures, en fonction de la température, sont traduites par les courbes de la Figure 1. Ainsi, dans une charge contenant du cuivre, du fer et du soufre accompagnés de petites quantités d'autres métaux, le cuivre se combinera au soufre résiduel pour former des sulfures. L'ordre dans lequel se produisent ces combinaisons dépend de la stabilité des sulfures métalliques, des oxydes correspondants et de leur concentration. La pratique montre qu'habituellement, le cuivre se combine au soufre pour former  $\text{Cu}_2\text{S}$  et que le soufre résiduel se combine au fer pour former  $\text{FeS}$ , ainsi qu'avec les autres métaux pour former les sulfures correspondants. Pratiquement le Zn est préjudiciable, parce que le  $\text{ZnS}$  formé tend à faire apparaître une masse infusible sur la sole du four.

En se basant sur les données de K.K. Kelley (2) et en faisant quelques hypothèses plausibles, on peut calculer que:

$\Delta G$  est égal à

$$3560 - 54.5T \quad (T \text{ en degrés Kelvin})$$

dans la réaction suivante:



En faisant l'évaluation à 1227 dég. C. (1500°K) nous obtenons

$$\Delta G_{1227^\circ\text{C}} = -78160$$

De la relation

$$\Delta G = -RT \log_e K_p$$

on peut tirer la valeur de  $K_p$  à 1227°c. on a successivement

$$\begin{aligned} -78160 &= -RT \log_e K_p \\ &= -8.4572 \times 1500 \log_e K_p \end{aligned}$$

d'où:

$$\begin{aligned} \log_e K_p &= \frac{78160}{8.4572 \times 1500} \\ &= 11.37 \end{aligned}$$

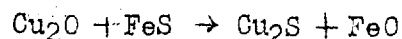
et pour la réaction ci-dessus:

$$K_p = \frac{(a \text{ Cu}_2\text{S}) (a \text{ Fe})}{(a \text{ Cu})^2 (a \text{ FeS})}$$

Le Fe et le Cu métalliques présents auront chacun une activité très voisine de l'unité et la relation précédente se réduira donc à:

$$K_p = \frac{(a \text{ Cu}_2\text{S})}{(a \text{ FeS})}$$

Etant donné la grande valeur de la constante d'équilibre, presque tout le cuivre se combinera avec le soufre dans le système soufre, cuivre et fer (lequel contient plus de soufre qu'il n'en faut) pour former  $\text{Cu}_2\text{S}$ . L'excès de soufre formera ensuite  $\text{FeS}$ . S'il y a du  $\text{Cu}_2\text{O}$  il réagira avec le  $\text{FeS}$  pour former du  $\text{Cu}_2\text{S}$  selon l'équation.



En se servant encore des données de K.K. Kelley (2) on peut calculer que pour cette réaction à  $1227^\circ\text{C}$  ( $1500^\circ\text{K}$ )

$$\log_e K_p = 3.86 \quad \text{ou} \quad K_p = 7240$$

$$\text{ou} \quad K_p = \frac{(a \text{ Cu}_2\text{S}) (a \text{ FeO})}{(a \text{ Cu}_2\text{O}) (a \text{ FeS})}$$

Même quand le rapport  $\frac{(a \text{ FeO})}{(a \text{ Cu}_2\text{O})}$  est grand, la valeur de la constante d'équilibre est suffisamment grande pour que la réaction aille vers la droite. En effet, l'activité de  $\text{FeO}$  ne sera pas élevée, car  $\text{FeO}$  réagira avec la scorie pour former des composés stables de Fe. Cela signifie que la réaction sera presque complète et qu'il n'y aura que peu de  $\text{Cu}_2\text{O}$  dans la scorie.

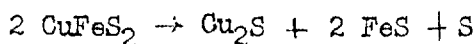
Les deux illustrations justifient le fait bien connu et souvent publié que le  $\text{Cu}_2\text{S}$  est beaucoup plus stable que le  $\text{FeS}$ . De ce fait découle tout l'intérêt du procédé, la fusion des mattes de cuivre est alors une opération avantageuse.

Le diagramme d'équilibre du système  $\text{FeS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$  avec la température est schématisé par la Figure II. En pratique, la teneur en cuivre des mattes varie de 15 à 60 pour-cent. Leurs températures de fusion dans les fours sont bien supérieures à  $1100^\circ\text{C}$ . de telle sorte que les mattes  $\text{Cu/Fe}$  constituent une seule phase bien homogène.

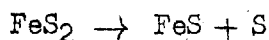
Les métaux précieux sont très solubles dans les mattes de cuivre, cette dissolution est une méthode effective et efficace pour la récupération de l'or et de l'argent des minerais cuivreux et des concentrés de cuivre; de même que des fondants contenant de l'or.

La qualité de la matte obtenue au cours d'une opération dépend des quantités de cuivre et de soufre que la charge renferme, et aussi de la forme sans laquelle le soufre existe dans cette charge.

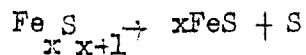
La chalcoppyrite perd le quart de son poids lorsqu'elle est chauffée suivant la réaction:



Les minerais sulfurés de Fe perdent aussi du soufre aux hautes températures, avec formation de FeS suivant la réaction:

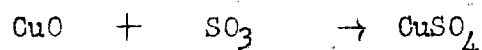
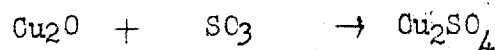
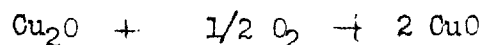
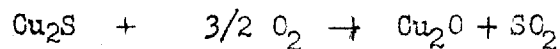
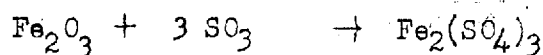
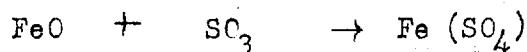
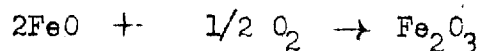
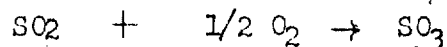
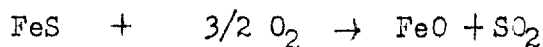


ou plus généralement:



Les résultats expérimentaux obtenus lors de ces présents travaux montrent que la matte contient du soufre en excès, plus qu'il n'en est nécessaire pour former  $\text{Cu}_2\text{S}$  et FeS. Des examens radiographiques, d'échantillons de matte, par diffraction de rayons-X montrent que le composé prédominant est la bornite  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , qu'on pourrait écrire  $5 \text{Cu}_2\text{S} \cdot 2 \text{FeS} \cdot \text{S}$ . Des renseignements communiqués à titre privé par d'autres chercheurs confirment cette découverte. La seule explication que l'on puisse admettre est que la matte au repos dans le four électrique se prête mal à la formation de soufre gazeux et l'excès de soufre correspondant à la formation de la bornite n'est pas libéré aux températures de fusion. Cet excès de soufre ne devrait pas être nuisible lors de la fusion et devrait tendre plutôt à faire disparaître tout le cuivre oxydé de la scorie.

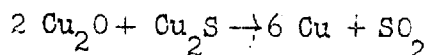
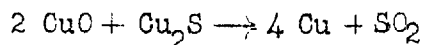
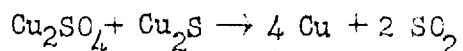
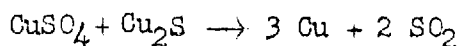
La qualité de la matte peut être améliorée par l'élimination du soufre au moyen d'un grillage oxydant antérieur à la fusion. Ce grillage provoque un certain nombre de réactions dont voici les plus communes:



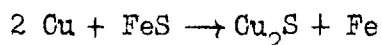
Les réactions donnant les oxydes métalliques sont facilitées par un excès d'air et par les températures élevées, tandis que la formation de sulfates résulte de basses températures avec excès d'air et d'anhydride sulfuré. Cette dernière condition provenant du fait que la réaction  $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$  s'oriente vers la droite aux basses températures.

Quand un produit grillé est fondu dans un four en atmosphère

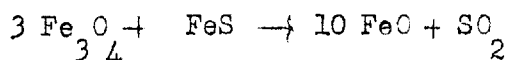
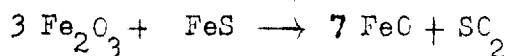
neutre, telle qu'elle existera dans le four électrique des réactions secondaires éliminant le soufre sous forme de gaz sulfureux se produiront comme suit:



Le cuivre métallique ainsi formé réagira avec le SFe pour donner le  $\text{Cu}_2\text{S}$



le fer libéré réagira à son tour avec les gaz du four pour donner FeO qui rentrera dans la scorie. D'autres réactions secondaires provoquant l'élimination du soufre sont les suivantes:



Les réactions sont plutôt assez lentes, mais ne sont nullement les moins importantes.

La qualité de la matte dépendra par conséquent des quantités de cuivre et de soufre se trouvant dans la charge, de la quantité de soufre volatil et du degré de désulfuration dû au grillage ainsi que des réactions chimiques dans le four de fusion. La détermination de la qualité optimum de la matte pour une opération donnée est le problème le plus important à résoudre pour que la fusion soit rentable. La récupération du cuivre et des métaux précieux ainsi que le coût du grillage et du convertissage dépendent de celle-ci.

Les facteurs à considérer lors de la détermination de la qualité optimum de la matte sont les suivants:

- a) une matte de haute qualité signifie une désulfuration très poussée donc un grillage onéreux,
- b) la récupération des métaux précieux est fonction de la décantation de la matte,
- c) les pertes en cuivre et en métaux précieux dans la scorie varient plus ou moins directement avec la qualité de la matte.

La perte de cuivre dans la scorie est causée principalement par de petites inclusions de matte qui n'ont pas eu le temps de décanter;

étant donné qu'elles sont finement divisées, le nombre et la grosseur de ces particules varient peu avec la qualité de la matte et, par conséquent, la perte de cuivre sera d'autant plus importante que la matte sera de meilleure qualité. La relation entre la quantité de cuivre dans la scorie et la qualité de la matte est donnée par la Figure III (4).

Il y a d'autres facteurs qui causent des pertes de cuivre dans la scorie, tels que la viscosité de celle-ci, sa composition, les densités réciproques de la matte et de la scorie. La sélection de la composition optimum de la scorie dépend de considérations économiques et, dans le cas de la fusion au four électrique, le choix dépend également de sa conductibilité.

### CONSTITUTION DES SCORIES

Les scories formées lors de la fusion sont essentiellement des silicates ferreux avec des quantités appréciables de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{ZnO}$  ainsi que des substances occluses telles que de la matte et du  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  non-dissout. On ajoute souvent de la chaux pour abaisser le point de fusion, diminuer la viscosité et la densité, ce qui fait tomber la teneur en cuivre de la scorie. Le plus souvent, la composition de la scorie est trop complexe pour qu'on puisse l'adapter aux données publiées, mais si l'on admet que  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{ZnO}$  sont en faibles quantités et équivalent à  $\text{CaO}$ , le diagramme ternaire  $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$  devient intéressant. Ce diagramme est donné par la Figure IV (5).

D'une étude de ce diagramme ternaire, il ressort qu'une scorie à bas point de fusion aura pour composition:

$\text{SiO}_2$	35 à 50 pourcent
$\text{FeO}$	35 à 45 pourcent
$\text{CaO}$	20 pourcent

Une scorie calculée pour que le rapport  $\text{SiO}_2 : \text{FeO} : \text{CaO}$  4: 4: 2, et ayant 7 pourcent de substances inertes, telles que:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{FeS}$ , etc., donnera à l'analyse:

$\text{SiO}_2$	37.2 pourcent
$\text{FeO}$	37.2 pourcent
$\text{CaO}$	18.6 pourcent
inertes	7.0 pourcent

Une telle scorie présente un bas point de fusion, une densité et une viscosité relativement faibles et une conductibilité convenable, afin de n'avoir qu'une faible solubilité pour la matte.

### CONDUCTIBILITE DES SCORIES

Les scories fondues et plus particulièrement celles employées



dans la fusion des mattes de cuivre possèdent une haute conductibilité, et il y a lieu de croire que ces scories sont fortement ionisées. Les travaux de Martin et Derge (7) mentionnent que la conductibilité croît en même temps que la température. Cette augmentation résulte certainement d'une diminution de viscosité et d'une augmentation du degré d'ionisation. Il est important de remarquer qu'une diminution très marquée de la conductibilité se produit quand une phase cristalline apparaît, aussi la température de fusion doit être assez élevée pour assurer une fusion complète de la scorie.

### LE FOUR ELECTRIQUE

La fusion des mattes cuivreuses exige que l'on atteigne aussi rapidement que possible les températures requises, puisque le procédé consiste essentiellement à traiter une matte et une scorie fondues. Comme nous l'avons vu, ces températures sont assez élevées pour permettre aux réactions chimiques de se produire.

Le four à arc direct et le four à résistance constitué par la résistance qu'offre la scorie au passage du courant électrique sont les plus pratiques pour la fusion des mattes, et sont les seuls qui ont été considérés sérieusement. (6) Le four à arc direct possède une température d'arc très élevée qui cause une volatilisation excessive de plusieurs composants de la charge. Une telle volatilisation de la charge ne donne pas des conditions satisfaisantes de travail. On doit installer des collecteurs de fumée coûteux et les pertes de chaleur dues aux substances volatilisées diminuent le rendement thermique du procédé. La température n'est pas uniforme à travers toute la masse en fusion, très élevée dans l'arc elle le sera beaucoup moins entre les électrodes dans la scorie fondue. Le degré de fusion variera donc d'un endroit à l'autre du four, la charge s'affaissera de façon irrégulière et la partie fondue sera exposée à l'air dans le voisinage des arcs. En cours d'expérience, on s'est aperçu que cette partie fondue en contact avec l'air donnait lieu à la formation d'une croûte qu'il était difficile de refondre à nouveau et qui gênait le mouvement des électrodes. Il est impossible de s'opposer à la formation de cette croûte autour des électrodes d'un four à arc.

Dans le four à résistance, la scorie est chauffée très uniformément, aussi bien autour qu'entre les électrodes. Il y a peu de bulles gazeuses et par suite, pas d'expulsions de scorie pour former des croûtes. Une épaisseur importante de charge solide doit être maintenue au-dessus de la partie fondue, pour empêcher la formation de croûtes par refroidissement ou par contact avec l'air. Ceci assure également un meilleur transfert de chaleur de la scorie vers la charge solide. Ainsi il y a peu de pertes de chaleur par la surface supérieure de la charge solide. Les pertes de chaleur seront réduites aux pertes par conduction à travers les parois, le long des électrodes et par les gaz qui se dégagent. Elles seront donc minimes dans un four convenablement calorifugé.

Une objection à l'emploi des électrodes immergées est la possibilité de réduire l'oxyde de fer de la scorie et d'augmenter aussi la consommation d'électrodes. Ceci est vrai pendant la demi-heure nécessaire pour chauffer le four, mais la perte devient insignifiante une fois la couche de scorie formée et le chargement régulier commencé. Le peu de fer fondu réagira avec

la charge pour être à nouveau oxydé ou bien s'unira avec l'excès de soufre pour former du sulfure de fer.

Après avoir considéré tous ces facteurs, le four à résistance scoritique a été choisi comme étant le plus satisfaisant, ce choix a été justifié par des travaux expérimentaux. Plusieurs fois au cours des expériences, les électrodes furent levées afin de produire volontairement des arcs, à chaque fois nous avons formé des croûtes. L'opération s'effectuait normalement tant que les électrodes étaient bien immergées dans la scorie et quand celle-ci était recouverte d'une épaisseur convenable de charge solide.

#### MATERIEL EXPERIMENTAL

La Figure V. montre le four utilisé pour ces présents travaux. A l'origine, il était destiné à la fusion de minerais de fer, mais nous l'avons transformé pour permettre la fusion des concentrés de cuivre. Les dimensions du four sont indiquées sur la Figure VI.

Le four avait un fond en acier d'un quart de pouce d'épaisseur et reposait sur un plan horizontal, de manière à pouvoir être basculé pour faciliter la coulée de la matte et de la scorie, après percement du trou de coulée.

Les colliers porte-électrodes étaient refroidis par une circulation d'eau froide et solidaire à un système à vis sans fin, leur assurant un mouvement vertical d'une hauteur de sept pouces. La distance entr'axes des électrodes était susceptible de varier d'environ deux pouces et demi. La combinaison des mouvements des électrodes permettait un réglage adéquat durant le temps d'un essai. La consommation d'électrodes était minime et l'ajustement vertical était seulement nécessaire pour maintenir le contrôle de la puissance, en faisant varier la profondeur d'immersion des électrodes dans la scorie. Les électrodes pouvaient également être soulevées pour que l'arc électrique jaillisse entre l'électrode et la scorie, si on le désirait.

Le four était garni intérieurement d'une épaisseur de  $4\frac{1}{2}$  pouces de briques réfractaires, elles-mêmes entourées d'une couche de  $2\frac{1}{2}$  pouces de briques isolantes HW-26, soit une épaisseur totale de calorifuge de sept pouces. Les briques étaient maintenues entr'elles sans liant, elles étaient ajustées par meulage. Afin de conserver la chaleur, les parois isolantes dépassaient le dessus de la cuve de 13 pouces, un toit en forme d'arche était placé au-dessus. L'ensemble était maintenu par un léger châssis d'acier. Durant les expériences, la partie supérieure du toit était ouverte, afin de faciliter le chargement et la surveillance de la marche de l'opération.

Au cours des premières expériences, on a constaté qu'une lentille de matte restait fixée à la partie inférieure du four, parce que le creuset était trop grand par rapport à la puissance du four et que toute la matte ne pouvait pas rester en fusion. L'intérieur du four fut briqueté et sa largeur fut réduite, par suite de la pose d'une épaisseur de  $4\frac{1}{2}$  pouces de briques isolantes. Les dimensions du creuset étaient alors de 11.3 pouces de largeur, 21.3 pouces de longueur et 14.2 pouces de profondeur.

Les électrodes amenant l'énergie à la charge étaient en graphite. Elles avaient 2 pouces de diamètre et 48 pouces de longueur. Elles servaient à plusieurs opérations successives, vu leur faible usure.

La source d'énergie utilisée était un groupe tournant de 220 volts, 25 hertz, ("cycles") entraîné par un moteur de 35 c.v. 550 volts. Habituellement, on utilise un générateur triphasé de 30 KW. que l'on connecte à deux transformateurs de manière telle qu'on puisse obtenir un courant mono, di ou triphasé. Les secondaires des transformateurs sont connectés pour fournir 110, 55 ou 27.5 volts aux bornes principales, quand le générateur est alimenté avec du courant de 220 volts ou seulement la moitié de ces tensions, si le courant d'alimentation n'est seulement que de 110 volts. Des rhéostats en série avec l'inducteur du générateur permettent de faire varier la tension d'excitation entre les valeurs ci-dessus indiquées. Les appareils de mesure comprennent des voltmètres, un ampère-mètre et un wattmètre. Au cours de ces travaux, nous avons uniquement utilisé du courant monophasé. Le courant était amené des bornes du transformateur aux électrodes, par l'intermédiaire de câbles flexibles capables de laisser passer 1000 Ampères.

#### MATIERES PREMIERES

Le produit employé était un concentré humide de cuivre provenant de la société anonyme des mines de Noranda (Noranda Mines Ltd.). Nous reçûmes environ 2000 livres de celui-ci. L'analyse était la suivante:

Cuivre	(Cu)	21.66	pourcent
Soufre	(S)	29.33	" "
Fer	(Fe)	26.50	" "
Silice	(SiO <sub>2</sub> )	9.54	" "
Zinc	(Zn)	4.46	" "
Alumine	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.21	" "
Chaux	(CaO)	0.10	" "
Or	(Au)	0.194	oz./ tonne
Argent	(Ag)	6.004	oz./ tonne

Les minéraux prédominants étaient la chalcoppyrite, la pyrrhotine et la pyrite.

Environ 1200 livres de ce concentré furent grillées sur un foyer de notre fabrication, durant cette opération, la charge s'est sensiblement enrichie en fer. L'analyse du concentré grillé donnait:

Cuivre	(Cu)	21.16	pourcent
Fer	(Fe)	29.36	" "
Soufre	(S)	14.10	" "

Comme fondant, nous achetâmes un sable siliceux; son analyse donna:

Silice	(SiO <sub>2</sub> )	97.04	pourcent
Sesquioxyde ferrique	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.40	" "
Oxyde de titane	(TiO <sub>2</sub> )	0.85	" "
Alumine	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.41	" "

L'analyse du calcaire, obtenue gratuitement grâce à la courtoisie de la société anonyme des produits chimiques Shawinigan (Shawinigan Chemicals Ltd.), était la suivante:

Chaux	(CaO)	54.16	pourcent
Silice	(SiO <sub>2</sub> )	2.09	" "

Pour sa part, la Compagnie des produits chimiques Nichols (Nichols Chemicals Company) nous fournit de la pyrite grillée dont l'analyse était:

Fer	(Fe)	66.32	pourcent
Silice	(SiO <sub>2</sub> )	1.43	" "

Ces diverses analyses et celles des mattes et des scories ont été faites par le Ministère des Mines de la Province de Québec, grâce à la courtoisie du Dr. Maurice Archambault, directeur des Recherches du Ministère des Mines.

#### PROCEDE EXPERIMENTAL

Les expériences furent divisées en deux groupes. Dans le premier groupe, la composition de la charge ressemblait beaucoup à celle employée dans les fours à réverbère usuels. Elle comprenait des concentrés grillés et des fondants calculés pour donner le rapport FeC: CaO: SiO<sub>2</sub>: 4: 1: 4. Dans le second groupe, les concentrés et les fondants étaient mélangés afin de donner le même rapport pour la scorie.

La scorie froide fond à une température bien inférieure à la température de fusion d'un mélange des oxydes constituant correspondants, et exige moins d'énergie. Nous avons donc fait plusieurs expériences préliminaires, pour obtenir une scorie pour la fusion de la première matte. Nous

employions de la silice, de la chaux et de l'oxyde de fer et nous obtenions plus de trente livres de scorie satisfaisante. Ces expériences servirent également à essayer l'appareillage.

Le mode opératoire suivi au début dans tous les essais de fusion des mattes consistait à placer dans le fond du four une couche de scories broyées provenant d'une opération antérieure et à poser ensuite sur celle-ci, une auge de fer mince immédiatement au-dessous des électrodes. Le fond de l'auge était ensuite garni de graphite broyé et les électrodes fortement appliquées sur cette couche de graphite. De la scorie broyée additionnelle était empilée de chaque côté de l'auge, afin d'absorber la chaleur irradiée par le graphite chauffé. Le courant électrique était ensuite appliqué, le graphite de l'auge devenait bientôt incandescent et pendant ce temps, le fer brûlait. Bientôt, il se formait de la scorie fondue et on obtenait un bain pouvant laisser passer un fort courant sous une faible tension, au bout d'une demi-heure à trois quarts d'heure. Dès que le bain avait un volume suffisant pour supporter un fort ampérage, on ajoutait le mélange de fondant et de cuivre.

On s'est aperçu que si l'on maintenait une couche de charge solide de plusieurs pouces de profondeur au-dessus de la scorie fondue, peu de chaleur était perdue par radiation et le degré de fusion était maximum. On empêcha ainsi l'exposition de la scorie à l'air et la formation de croûte par refroidissement. Quand le creuset était à peu près rempli de matte et de scorie fondues, on extrayait une partie de la matte en fusion par le trou de coulée près du fond du creuset. La plus grande partie de cette coulée était constituée de matte qui avait gravité vers le fond du creuset. Il fallait vider le four soigneusement, afin de laisser dans le creuset assez de scorie pour supporter le maximum d'intensité et ne pas affecter la fusion ultérieure. On évaluait la conductivité lorsque la matte était enlevée et que le courant circulait seulement dans la scorie fondue. Au début, de temps à autre, on retarda le chargement, afin de permettre à la couche de scorie solide de diminuer; il arrivait alors parfois que de la scorie fondue montait en surface, surtout près des électrodes. Comme mentionné plus haut, cette scorie formait une croûte difficile à fondre. Dans les expériences ultérieures, nous laissons une épaisse couche de charge solide et il n'y eut plus de difficultés avec cette formation de croûtes.

A la fin d'une expérience, nous cessâmes le chargement et, quand la majeure partie de la charge solide fut fondue, on vida le four de toutes les parties fondues. Une mince couche de scorie resta le long des parois. On estima sa quantité et on l'additionna à la charge de l'expérience suivante. La coulée ayant duré plusieurs minutes, le courant ayant été interrompu durant la fin de celle-ci, une mince couche se forma au-dessus de la scorie en fusion. On enleva cette couche et on l'ajouta à la charge suivante.

A des intervalles réguliers, nous notions les lectures de tension, d'intensité et de puissance. A la page 22 on trouvera ces valeurs pour l'une des expériences. Nous calculions la conductibilité en relevant la tension aux bornes des électrodes pour des grandeurs connues d'intensité, de distance interpolaire et de profondeur d'immersion de celles-ci. Nous rapprochions ensuite les électrodes de deux pouces et relevions la lecture du volt-mètre, les autres paramètres étant maintenus constants. La différence de tension relevée entre ces deux positions nous donnait la variation de tension en

fonction de la distance interpolaire. Les effets de polarisation étant éliminés, les résultats étaient comparables dans tous les cas. L'intensité et la densité du courant ne changeaient pas, puisque les électrodes conservaient une section constante et se trouvaient à une distance constante de la surface en fusion. En même temps que ces mesures, on repérait la température et on prenait un échantillon de la scorie. Les conductivités des scories suivaient des relations semblables à celles de Martin et Derge (7) à des températures analogues. Les calculs sont indiqués dans ce rapport.

Le trou de coulée était percé à l'aide d'un chalumeau à oxygène, cette opération ne présentait pas de difficultés particulières. La scorie et la matte étaient recueillies dans des poches d'une contenance de 50 livres environ. Comme la matte et la scorie se prenaient facilement en masse, la scorie contenait beaucoup d'inclusions de matte, mais dans une opération effectuée à grande échelle, ces inclusions devraient décanter pour donner une scorie ne contenant que peu de cuivre.

Dans le second groupe d'expérience, les concentrés bruts mélangés aux fondants étaient directement chargés dans le four. La fusion s'effectuait comme d'habitude, mais la qualité de la matte était bien inférieure à celle obtenue avec des charges préalablement grillées.

Nous pensions que peut-être nous pourrions combiner le grillage avec la fusion dans le four électrique et dans les expériences 4 et 5, on essaya cette méthode. De l'air à faible vitesse fut envoyé au-dessus de la surface libre de la charge du four. Il est évident qu'une partie du soufre chargé fut éliminée, puisque le pourcentage en  $SO_2$  des gaz du four augmentait.

Il fut impossible d'obtenir un grillage rapide, car la surface de la charge était relativement froide, et il n'y avait pas de gaz de ville disponible au laboratoire, lequel aurait permis de chauffer préalablement la charge jusqu'à la température de grillage.

Pratiquement, on pourrait néanmoins effectuer le grillage dans le four, en employant de petits brûleurs à l'huile pour maintenir si nécessaire, la température de grillage. Il est possible que si l'on amorçait un grillage rapide, il se poursuivrait de lui-même, grâce à l'exothermicité des réactions surtout si la charge était introduite régulièrement dans le four, afin de ne pas étouffer la zone de grillage par des additions brusques de charge. De plus, ceci préchaufferait la charge et faciliterait une fusion plus rapide. Lors des travaux expérimentaux, le pourcentage de poussière n'était pas augmenté par le soufflage de l'air dans le four.

Cette modification éliminerait les frais importants occasionnés par une installation de grillage et diminuerait ainsi les sommes à investir ainsi que le prix de revient des opérations.

#### COMPTE RENDU SOMMAIRE DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Comme nous l'avons décrit plus haut, nous avons effectué quelques expériences préliminaires, mais comme nous n'avons pas ajouté de charges cuivreuses, les données de ces expériences ne sont pas incluses dans les

tableaux. En fait, l'expérience No. 1 avait pour but de mettre le procédé à l'épreuve, en effectuant la fusion d'une matte. Comme la mise au point fut longue et qu'il convenait de surmonter plusieurs difficultés, les résultats ne sont pas inclus dans les analyses des expériences. L'expérience No. 6 a été effectuée en utilisant la scorie des expériences précédentes, ainsi que les râclures provenant d'un essai ayant pour but d'obtenir des lectures permettant d'évaluer la conductibilité, et pour déterminer si l'on pouvait préparer une scorie convenable.

Les analyses de la matte et de la scorie sont données par le Tableau I.

TABLEAU I  
ANALYSES DES PRODUITS DU FOUR

Exp. No.	Echan. No.	Matte - Pour Cent				Scorie - Pour Cent						oz/tonne	
		Cu	Fe	S	Zn	Cu	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Au	Ag
1	A 1	46.23	20.83	22.94	-	-	-	-	-	-	-	0.224	13.79
	A 2	-	-	-	-	1.15	25.10	43.09	5.01	-	-	-	-
2	B 6/7	-	-	-	-	2.76	45.1	26.0	5.83	-	-	-	-
	B 8	53.17	16.73	21.43	-	-	-	-	-	-	-	0.128	5.98
3	C 2	-	-	-	-	1.43	49.0	24.1	7.12	2.64	-	0.004	0.382
	C 4	53.61	16.71	21.27	-	-	-	-	-	-	-	0.378	14.42
4	D 1/2	-	-	-	-	5.07	32.98	30.9	10.62	-	4.5	-	-
	D 3/4	27.86	36.36	24.64	-	-	-	-	-	-	-	0.228	7.48
5	E 1/2	-	-	-	-	2.05	29.22	34.72	13.22	-	3.7	-	-
	E 3/4/5	26.19	38.51	23.81	4.29	-	-	-	-	-	-	-	-
6	F 1	-	-	-	-	0.40	35.05	35.15	10.22	-	3.55	-	-



Le pourcentage total de cuivre, fer et soufre dans la matte est d'environ 90 dans chacune des expériences. Il y a un pourcentage important de zinc dans la charge et une partie se retrouve dans la matte; ainsi la moyenne des analyses E 3/4/5 est de 4,29 pourcent. Des examens microscopiques et radiographiques par diffraction de rayons-X indiquent que la matte est constituée de bornite contenant plus de soufre que la quantité exigée par les études d'équilibres aux hautes températures. Il est intéressant de remarquer que plusieurs échantillons de matte contenaient à la fois de la bornite et de la magnétite qui devraient réagir pour former de l'anhydride sulfureux et de l'oxyde ferreux ou du fer métallique. Cette réaction doit évidemment progresser très lentement.

Un résumé des résultats de l'examen des mattes par diffraction de rayons-X est donné par le Tableau II.

TABLEAU II

ETUDES DES MATTES PAR DIFFRACTION DES RAYONS X

<u>Echantillon No.</u>	<u>Composition</u>
A 1	Bornite
B 8	Bornite
C 4	Bornite
D 3	Bornite, magnétite
D 4	Bornite, magnétite
E 3	Bornite, magnétite
E 4	Bornite, magnétite
E 5	Bornite, magnétite

Un autre fait intéressant est que la magnétite se trouve seulement dans les mattes provenant de charges composées de concentrés bruts, de sable siliceux, de calcaire et de pyrites grillées. La magnétite doit évidemment provenir du "grillé de fer" qui était probablement formé, la majeure partie, de magnétite à l'origine.

La qualité de la matte dépend du coût de l'opération qui, elle-même, est fonction de la teneur en cuivre de la charge, de sa teneur en métaux précieux et du degré de désulfuration.

Un examen des scories au microscope a montré qu'elles n'étaient pas homogènes, mais contenaient beaucoup de matte et de cuivre poreux. La haute teneur en cuivre de ces scories était sans doute due à un refroidissement rapide de la matte et de la scorie, lors de leur transvasement dans de petits moules. Dans une opération à plus grande échelle, la matte et la scorie

seraient versées dans une lingotière largement dimensionnée et bien isolée, de laquelle une scorie bien homogène déborderait. L'échantillon de scorie F 1 de l'expérience No. 6 a été lingoté et donne une indication de ce que l'on peut attendre de la teneur en cuivre d'une telle scorie, c'est-à-dire environ 0.40 pourcent. L'échantillon de scorie C 2 de l'expérience No. 3 indique une teneur très faible en métaux précieux, celle-ci serait encore plus faible s'il y avait pour réduire la teneur en cuivre de 1.43 pourcent à 0.40 pourcent.

Les pourcentages d'or et d'argent récupérés devraient être plus élevés que dans le cas des fours à combustibles, car les pertes par entraînement de poussières sont minimales dans le four électrique. Même si l'on emploie de l'air à basse pression pour le grillage dans le four lui-même, les pertes par entraînement de matières premières sont insignifiantes, comme on l'a constaté au cours des expériences 4 et 5.

Les échantillons de scorie furent examinés par diffraction de rayons-X et le tableau III donne les résultats obtenus.

TABLEAU III

ANALYSE DES SCORIES PAR DIFFRACTION DES RAYONS-X

<u>Echantillon No.</u>	<u>Composition</u>
A 2	pyroxène monoclinique en majeure partie probablement de l'hédenbergite
C 1	composante X, magnétite, bornite
C 2	composante X, magnétite, bornite
C 3	composante X, magnétite
D 1	composante X, magnétite, bornite
D 2	composante X, magnétite, bornite
E 1	composante X, magnétite, bornite
E 2	composante X, magnétite, bornite
F 1	composante X, magnétite, bornite

Les substances sont données par ordre décroissant de concentrations dans les scories.

Les termes employés dans cette description sont:

<u>Bornite</u>	Sulfure de cuivre et de fer - approximativement $Cu_5FeS_4$
<u>Pyroxène</u>	Probablement l'hédenbergite synthétique
<u>Magnétite</u>	$Fe_3O_4$
<u>Composante X</u>	Une substance ou mélange non-identifié.

TABLEAU IV

Les valeurs d (en A) que l'on a observées pour la magnétite, la bornite, le pyroxène et la composante X sont:

<u>Magnétite</u>	<u>Bornite</u>	<u>Pyroxène</u>	<u>Composante X</u>
2.98	3.12	3.20	3.58
2.54	2.71	3.03	2.83
2.09	2.30	2.91	2.52
1.61	2.09	2.57	1.77
1.48	1.91	2.50	1.51
	1.64	2.14	
		2.04	
		1.63	
		1.54	
		1.50	
		1.40	

Un résumé des données sur le fonctionnement du four est présenté dans le Tableau V. Ce tableau donne les composants de la charge, la production de matte et de scorie, la durée des expériences, la consommation d'électrodes, l'énergie fournie et la consommation en kWh par tonne chargée. Le tableau V indique les résultats expérimentaux obtenus pour l'expérience No. 3. C'est à l'aide de ce tableau que le V a été calculé avec des données semblables des autres expériences.

T A B L E A U V  
RESUME DES DONNEES SUR LE FONCTIONNEMENT DU FOUR

COMPOSANTS DE LA CHARGE								PRODUITS DE LA FUSION		DUREE DE L'EXPERIENCE		CONSOMMATION D'ELECTRODES	CONSOMMATION D'ENERGIE ELECTRIQUE	
Essai No.	Charge totale	Concentré grillé	Concentré non grillé	Calcaire	Sable siliceux	Pyrite grillée	Scorie	Scorie	Matte	Totale	Après chargement		Moyenne pour la charge	Moyenne pour une tonne de charge
	lb.	lb.	lb.	lb.	lb.	lb.	lb.	lb.	lb.	hres.	hres.	lb.	K.W.H.	K.W.H.
1	133.6	100	-	6.0	2.6	-	25	106	16	5	4	21	1.75	1252
2	406.4	301	-	18.0	7.9	-	79.5	266	115	8	7.5	22.7	2.25	997
3	357	212	-	17.1	6.0	-	122	253	49	7.25	6.75	20.9	2.25	793
4	293	37	180	13.3	6.0	26.8	30	160	124	6.5	6.0	20.8	1.6	855
5	460	61	264	26.4	6.3	14.0	88	341	289	9.0	8.5	22.1	2.5	817
6	398	20	-	0.8	22.3	-	355	-	-	4.45	4.30	21.8	-	495

TABEAU VI

CARACTERISTIQUES DE L'EMPERIENCE NO. 3

<u>Temps</u>	<u>Potentiel au secondaire du transformateur</u>	<u>Alimentation du Four</u>			<u>Remarques</u>
		<u>Ampères</u>	<u>Volts</u>	<u>Kilowatts</u>	
0915	110	256	97.0	25.6	
0935	110	352	69.0	27.2	Début du char- gement
1000	55	800	36.0	24.0	Scorie fondue
1015	55	640	35.0	22.4	
1030	27.5	640	29.0	19.2	
1050	27.5	575	28.5	16.0	
1100	27.5	505	-	-	Echantillonnage de scorie, et mesures de tem- pérature et de conductibilité
1125	55	575	38.5	22.4	
1145	55	750	28.0	20.8	
1200	27.5	830	27.5	22.4	Le four fonc- tionne très bien
1220	27.5	895	27.0	24.0	de 1125 hres à 1440 hres
1240	27.5	1020	25.0	24.8	(5 hres, 15 min)
1300	27.5	945	21.0	22.4	
1320	27.5	970	21.5	21.6	
1410	27.5	795	26.5	20.8	
1440	27.5	825	26.5	21.6	
1455	27.5	890	17.0	12.8	Coulée de la scorie
1510	27.5	645	27.5	17.6	
1525	27.5	670	27.5	18.4	
1550	27.5	670	27.0	18.4	
1610	27.5	810	19.0	15.2	
1650	27.5	-	-	-	Coulée totale

DONNÉES SUR LA CONDUCTIBILITÉ

Les mesures de conductibilité ont été faites, soit avant la formation de la couche de matte, soit immédiatement après sa coulée du four. On procédait ainsi pour s'assurer que le courant était conduit uniquement par de la scorie et non par l'ensemble de la scorie et de la matte.

Les électrodes étaient soulevées de manière que leur profondeur d'immersion dans la scorie soit telle que leur distance du fond soit suffisante. L'intensité traversant le four était réduite à une valeur telle que la tension du four soit de 24 volts. La distance interpolaire était mesurée, et une lecture du voltmètre étant effectuée, on rapprochait les électrodes de deux pouces et on réglait la tension du four de manière que l'intensité soit la même que précédemment. On lisait alors le voltmètre et on mesurait la distance interpolaire. On repérait en même temps la température de la scorie avec un thermocouple à métaux nobles. Cette méthode élimine les effets de polarisation, puisqu'ils sont les mêmes au cours des deux mesures. La variation de tension dépendra uniquement de la distance interpolaire et par suite, uniquement de la conductibilité de la scorie.

Le Tableau VII indique les données relatives à la détermination de la conductibilité.

TABIEAU VII

Exp. No.	Largeur en pces du bain de scorie	Profondeur en pces du bain de scorie	Voltage du four	Ampérage dans le four	Distance des Electr.	Temp. en °C
3	10.5	4	25.1	576	15.25	1180
3	10.5	4	22.8	576	13.0	1180
5	10.5	4	25.0	704	15.25	1180
5	10.5	4	22.6	704	13.25	1180
6	10.5	6	25.2	576	15.25	1140
6	10.5	6	23.7	576	13.0	1140

Calculs de la conductibilité de la scorie pour l'expérience No. 3

$$R \text{ totale} - R (\text{polarisation}) + R (15.25 \text{ pces scorie}) = 25.1 \text{ volts}$$

$$R \text{ totale} - R (\text{polarisation}) + R (13.0 \text{ pces scorie}) = 22.8 \text{ volts}$$

$$R (2.25 \text{ pces scorie}) = 2.3 \text{ volts}$$

$$\text{Section de la scorie} = 4 \times 10.5 \times (2.54)^2 = 270.3 \text{ cm}^2.$$

Longueur du bain: 2.54 x 2.25 pces - 5.72 cm.

$$R = \frac{E}{I} \quad \text{et} \quad R = r \frac{l}{a}$$

$$r = R \cdot \frac{l}{a} = \frac{E}{I} \cdot \frac{a}{l} = \frac{2.3}{576} \times \frac{270.3}{5.72} = 0.189 \text{ ohms/cm}$$

$$K = \frac{1}{r} = \frac{1}{0.189} = 5.30 \text{ mhos/cm.}$$

Des calculs semblables ont été faits pour les expériences Nos. 5 et 6, et les conductibilités de la scorie sont:

<u>Exp. No.</u>	<u>Conductivité mhos/cm.</u>	<u>Temps scorie °C.</u>
3	5.30	1180
5	5.51	1180
6	5.42	1140

Les mesures de conductibilité sont comparables à celles déterminées par Martin et Derge (7) pour des scories semblables, sous des conditions de températures analogues.

#### BILAN CALORIQUE DU FOUR

Il est important de connaître le bilan thermique du four, afin de pouvoir estimer la consommation d'énergie électrique imputable à une tonne de charge fondue. Vu le manque de renseignements, on ne peut pas calculer les quantités de chaleur exactes des réactions chimiques qui ont lieu dans le procédé mais, comme nous l'avons vu plus haut, la majeure partie de l'énergie est employée à fondre la charge. Nous pouvons donc négliger les énergies des différentes réactions chimiques, sans introduire d'erreur sérieuse.

Des calculs des pertes de chaleur du four par radiation et convection donnent 2000 kilogrammes-calories par heure. La température majeure de la scorie est prise comme étant de 1200°C., et en utilisant les données de Butts (8) les capacités calorifiques de la scorie fondue et de la matre sont respectivement de 330 et de 235 millithermies par kilogramme.

#### BILAN CALORIQUE DE L'EXPERIENCE NO. 3

Energie électrique fournie

$$7.5 \times 20.9 \times 860.3 = 133300 \text{ kilogrammes-calories}$$

Energie consommée

Quantité de chaleur contenue dans la scorie	$\frac{253}{2.204}$	x	330	=	38000
Quantité de chaleur contenue dans la matte	$\frac{49}{2.204}$	x	235	=	5200
Quantité de chaleur maintenue dans le four				=	20000
Quantité de chaleur perdue par radiation, etc.	7.5	x	200	=	15000
Pertes de chaleur inexplicables					$\frac{55100}{133300}$

Le rendement calorique du four au cours de cette opération est alors de:

$$\frac{78200}{133300} \times 100 = 58.7 \text{ pourcent}$$

Des calculs identiques relatifs aux expériences 2, 4 et 5 accusent des rendements successifs de 56.5, 61.0 et 52.5 pourcent, soit une moyenne de 57.2 pourcent pour ces quatre expériences.

On n'a pas fait de calculs pour l'expérience No. 1, parce qu'elle était de courte durée et effectuée dans le but d'obtenir des indications sur la marche du four. Dans le cas de l'expérience No. 6, il s'agissait d'une charge composée principalement de scories d'expériences précédentes qui fondaient facilement, l'expérience était donc peu caractéristique.

Les petits fours se prêtent mal à l'obtention de rendements thermiques élevés, à cause du fort rapport surface / volume et à cause des imprécisions des mesures. En effet, avec des expériences de courte durée, une grande partie de l'énergie est employée pour la mise en température du four, facteur négligeable dans le cas d'une opération continue. Dans la pratique, on peut s'attendre à atteindre un rendement calorique de 75 à 80 pourcent, ce qui correspondrait à une consommation de 600 KWH par tonne chargée. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues en Scandinavie.

CONCLUSIONS

La fusion des mattes et des concentrés de cuivre au four électrique apparaît du point de vue technique, comme une opération relativement simple. La chaleur nécessaire pour la fusion est obtenue par effet Joule au passage du courant électrique à travers la résistance constituée par la scorie fondue et non par la consommation de combustible, comme dans les techniques courantes. L'absence de fumée due aux gaz de combustion simplifie l'opération, les poussières sont réduites à un tel point qu'il ne faut aucun système de récupération ou tout au plus, un système très élémentaire.



La tranquillité de la masse en fusion et l'absence de gaz de combustion rendent possible l'élimination du soufre, par une méthode de grillage au sein même du four, en employant des jets d'air de faible vitesse au-dessus de la charge. L'utilisation de petits brûleurs à l'huile avec l'air, pour atteindre la température de grillage à la surface des matières premières fraîchement chargées, sera peut-être nécessaire.

La consommation d'électrodes est faible, celle de briques réfractaires sera minime.

Il ne devrait pas y avoir de difficultés pour l'obtention de matre de qualité acceptable. Même avec une matre de qualité assez élevée, la récupération des métaux précieux sera satisfaisante, puisque toute la matre formée peut traverser la couche de scories, venant ainsi au contact des métaux précieux qu'elle entraîne après les avoir dissous.

La mise en application pratique de la fusion au four électrique dépendra du coût de l'énergie électrique comparé au coût d'expédition des concentrés vers une usine de conversion.

Il devrait être possible d'entreposer des matres pour de courtes périodes, et d'employer des convertisseurs pour transformer les matres de cuivre en cuivre noir; cela réduirait encore le tonnage à expédier et permettrait le transport à une raffinerie rapprochée du marché.

#### FOUR COMMERCIAL RECOMMANDÉ

Les résultats de ces travaux ainsi que ceux d'autres chercheurs, comme le mentionne la littérature, font ressortir qu'il n'y a pas de difficultés d'ordre technique d'employer le four électrique pour la fusion des matres de cuivre, en utilisant la scorie comme résistance. L'emploi de ce genre de four doit être sérieusement considéré dans les régions où l'énergie électrique est disponible et où le coût élevé des combustibles et les petites quantités de minerai à traiter interdisent l'emploi des fours classiques, ou encore lorsque les prix d'expédition du minerai à des usines appropriées sont prohibitifs.

Les possibilités et les sommes à investir pour deux petits fours électriques sont mentionnées ci-dessous, mais le coût d'opération n'est pas indiqué. Néanmoins, il serait possible de le faire avec les données de ce rapport.

En se basant sur le chiffre de 600 K.W.H. par tonne de charge solide introduite et en prenant un facteur de puissance de 0.95 et un facteur de charge de 0.95, on fondrait avec un four d'une puissance de 100 K.W.:

$$\frac{1000 \times 24 \times 0.95 \times 0.95}{600} = 36 \text{ tonnes de charge solide par jour, tandis qu'un}$$

four de 1500 K.W. fondrait 54 tonnes par jour.

M. H.S. Newhall, Gérant de la Division Electrothermique, Lectromelt Furnaces of Canada Limited, Toronto, Ont., a confirmé ces chiffres et nous a fourni quelques détails sur le coût des fours. Ces coûts ne sont qu'approximatifs mais peuvent servir pour l'avant projet d'une usine.

Capacité du four en tonnes par jour	Puissance du four en K.W.	Dimensions du creuset en pieds		Dimensions des électrodes Dia. en pces	Nombre d'elec- trodes	Tension pratique	Distance interpo- laire C&C en pces	Nom- bre de pha- ses	Capacité du four
36	1000	12½	5½	20	3	80/120	40/50	3	36 tonnes
54	1500	15	6½	24	3	80/120	50/60	3	54 tonnes
		<u>Coût du four</u>		<u>Coût de l'installation y compris les réfractaires</u>		<u>Coût total à part les bâtiments</u>			
		\$75,000		\$25,000		\$100,000			
		\$90,000		\$30,000		\$120,000			

1  
25  
1

B I B L I O G R A P H I E

- (1) OSBORN, C.J. The Graphical Representation of Metallurgical Equilibria, A.I.M.E., Journal of Metals, Vo. 188, pp 600-607, 1950.
- (2) KELLEY, K.K., Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy U.S.B. M. Bulletins 371; 393; 406; 476; 477.
- (3) HAYWARD, C.R., An Outline of Metallurgical Practice, D. Van Nostrand Company Inc., New York, Second Edition, 1940, p. 35.
- (4) NEWTON, J., and C.L. WILSON, Metallurgy of Copper, John Wiley and Sons, New York, 1942.
- (5) BOWEN, N.L., J.F. Scheirer and E. POSHJAK, The System,  $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ , Am. J. Science, ser. 5, V. 26, 1933, pp. 193-234.
- (6) LYON, D.A., and R.M. KEENEY, The Smelting of Copper Ores in the Electric Furnace. U.S.B.M. Bulletin 81, 1915.
- (7) MARTIN, A.E. and G. DERGE, The Electrical Conductivity of Molten Blast-furnace Slags, Trans. A.I.M.E., Vol. 154, 1943, pp. 104 - 115.
- (8) BUTTS, A., Metallurgical Problems, McGraw-Hill Book Company Inc., New-York, Second Edition, 1943.

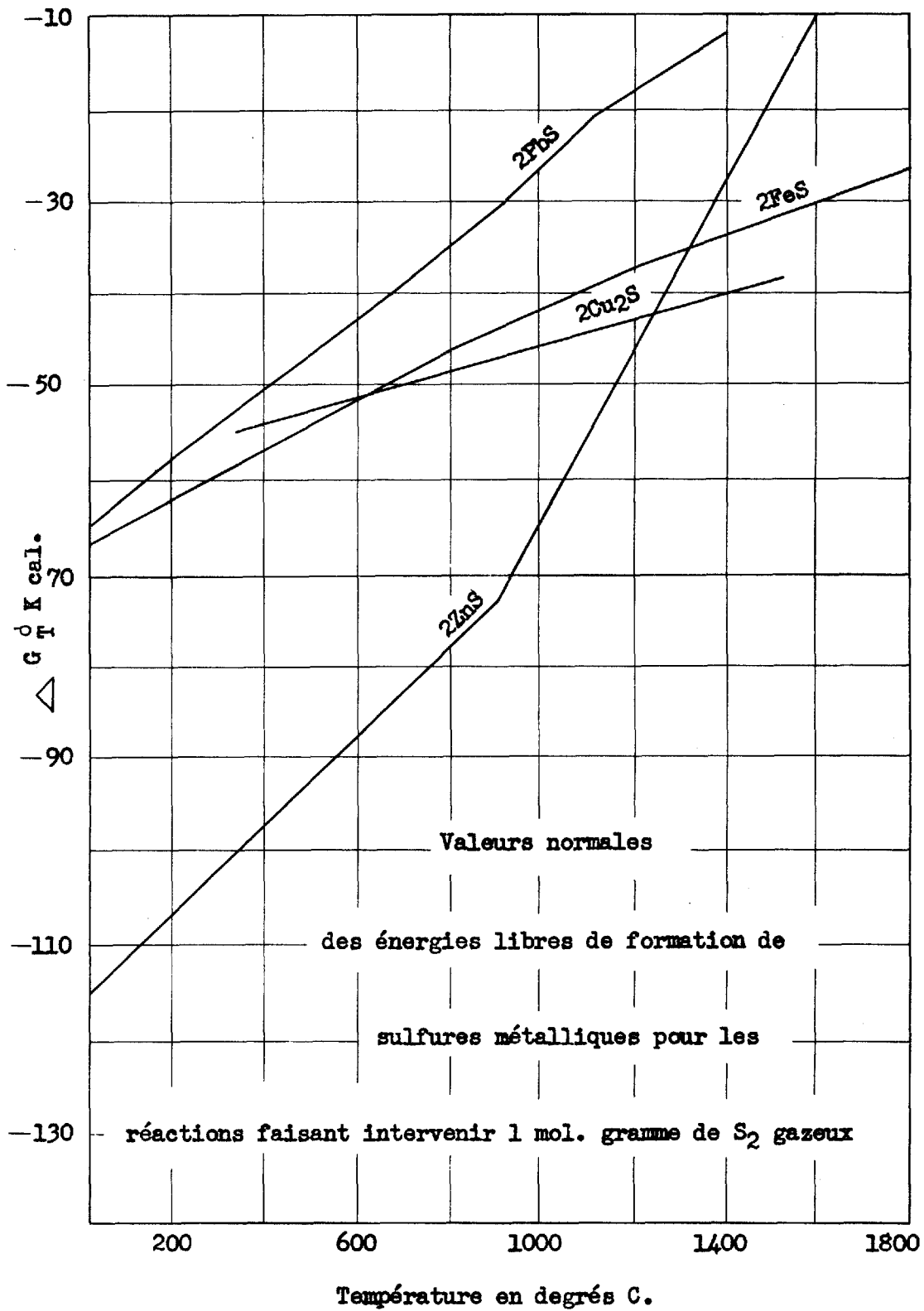


Figure I

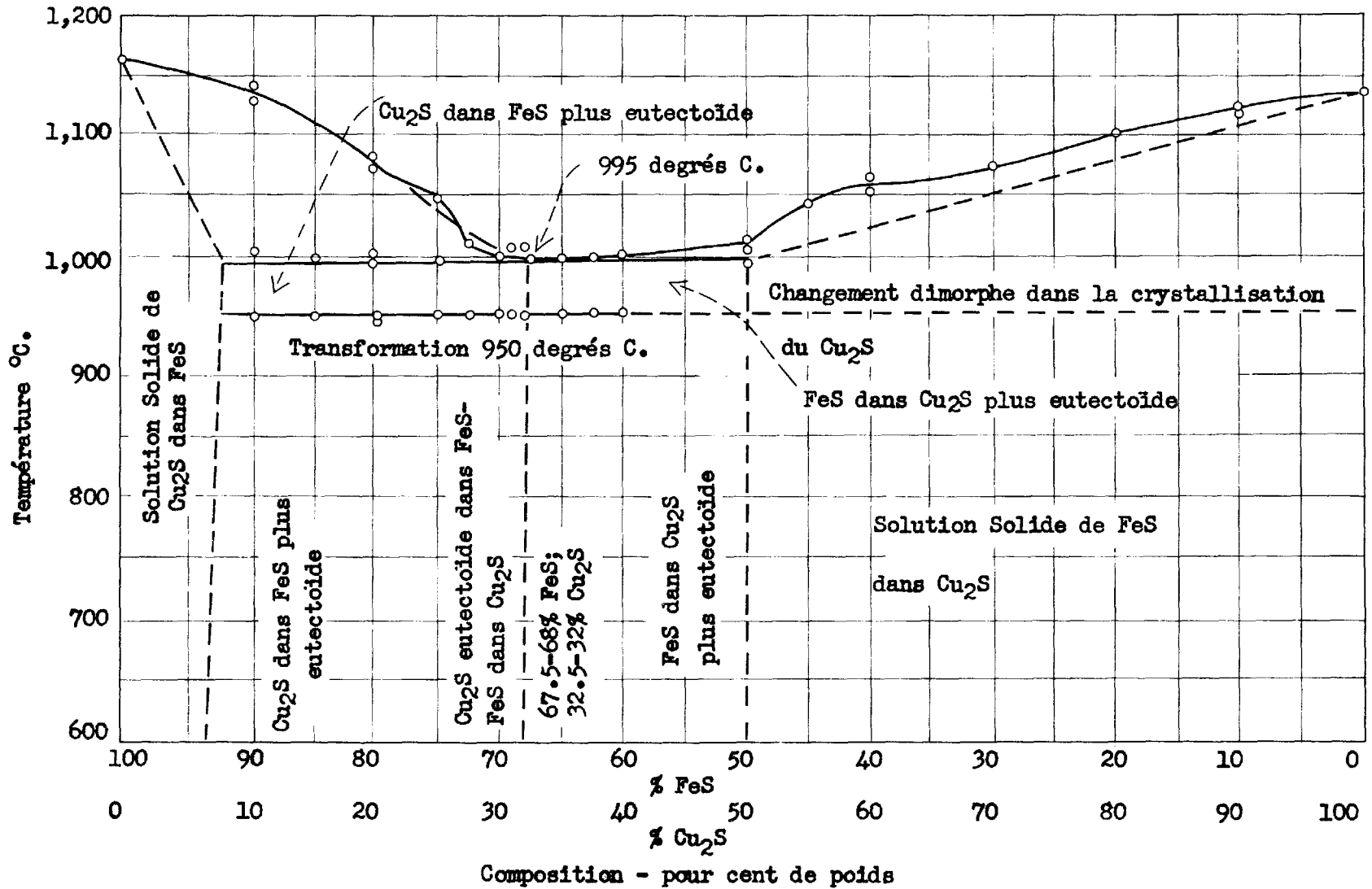
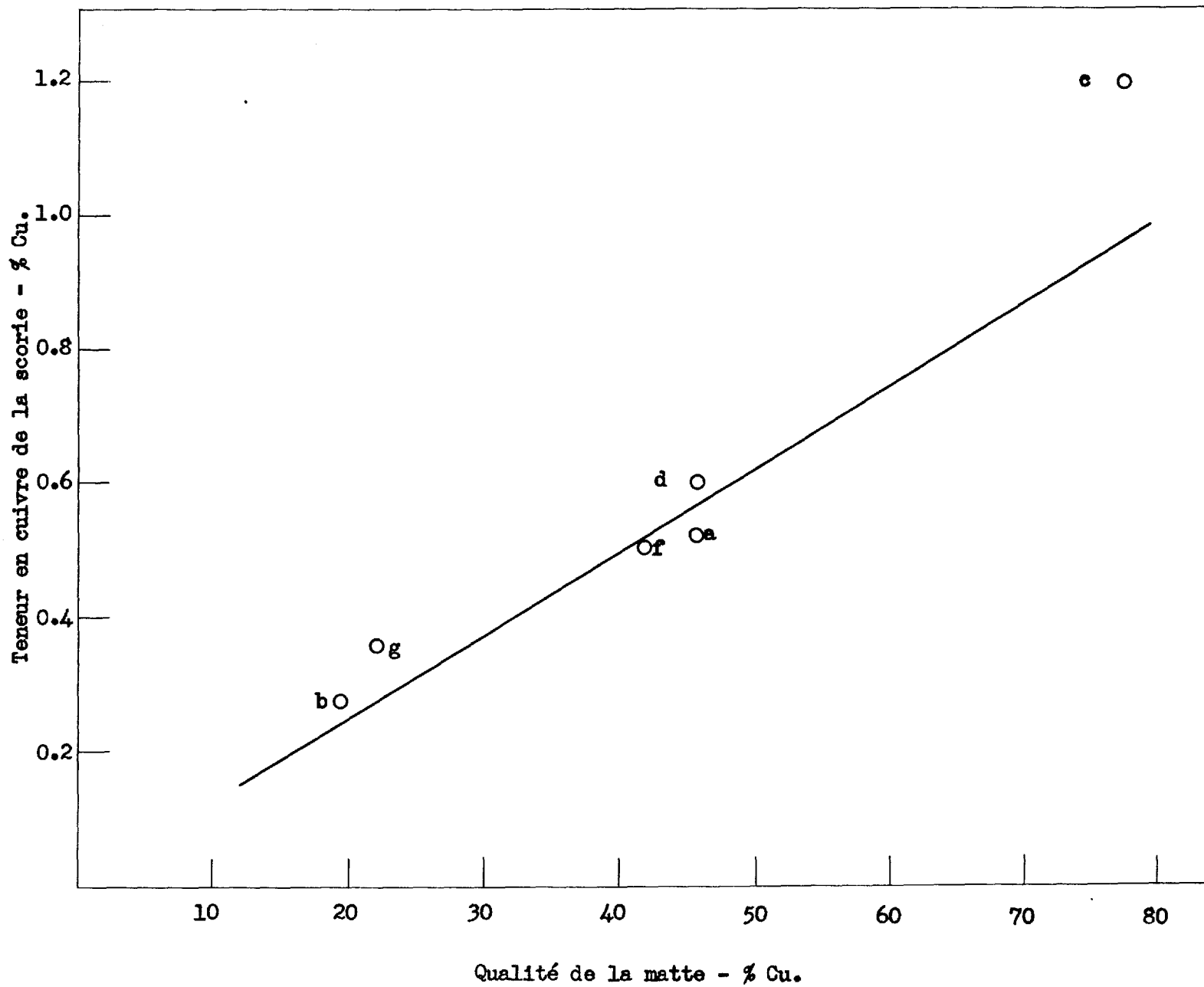


DIAGRAMME D'EQUILIBRE  $\text{Cu}_2\text{S}$ - $\text{FeS}$ .

Le point de fusion du  $\text{Cu}_2\text{S}$  est  $1128^\circ\text{C}$ ., du  $\text{FeS}$   $1163^\circ\text{C}$ ., et de l'eutectoïde  $995^\circ\text{C}$ .. La région eutectoïde s'étend de 92,5%  $\text{FeS}$  à 50%  $\text{FeS}$ . Ailleurs le matériel solide consiste en solutions solides. (De Carpenter et Hayward).



Variation de la teneur en cuivre des scories avec la qualité de la matte

Figure III

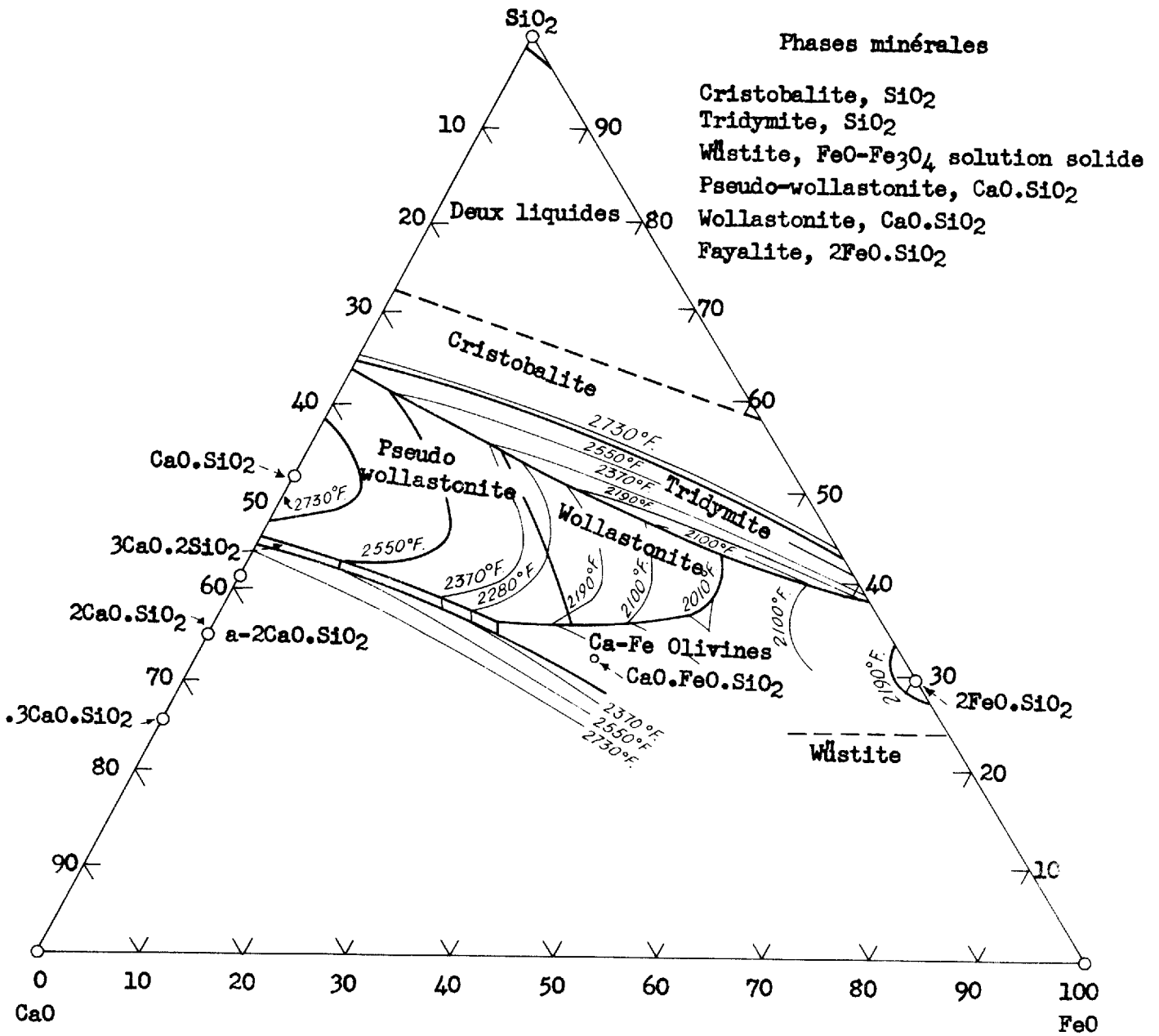
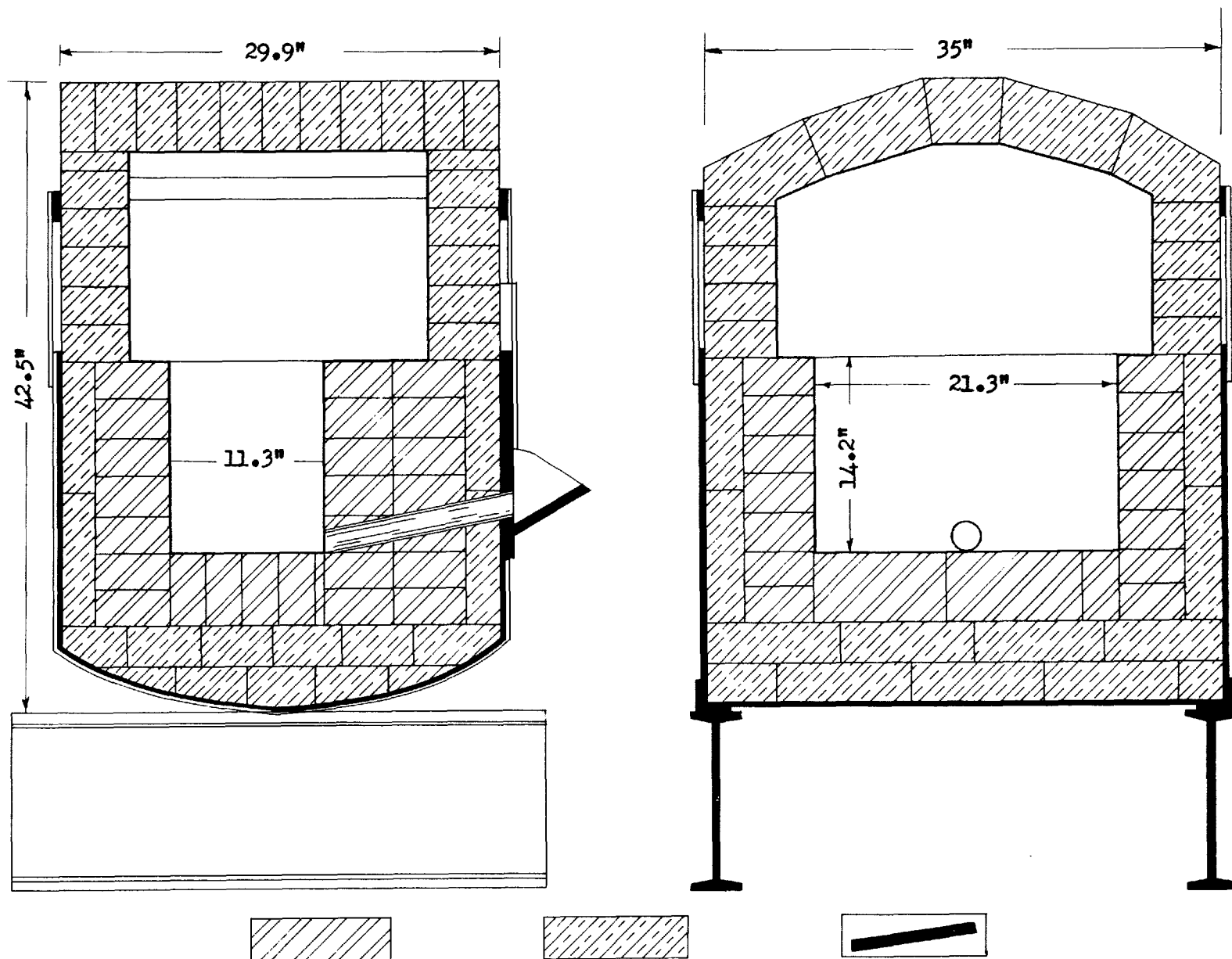


Diagramme de phase (composition partielle) pour le système ternaire CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>. Les contours de température indiquent la surface liquidus. Les cercles représentent des composés (Bowen, Schairer, et Posnjak. (5,6) ).

Figure IV

D.M.Q. 1952 No.958



Brique réfractaire

Brique isolante

Acier

Figure V. Section centrale de four expérimental, avec dimensions.





PLANCHE I — Four expérimental.



PLANCHE II A — 53.2 p. 100 de matte de cuivre —x100  
Bornite avec taches de cuivre métallique.

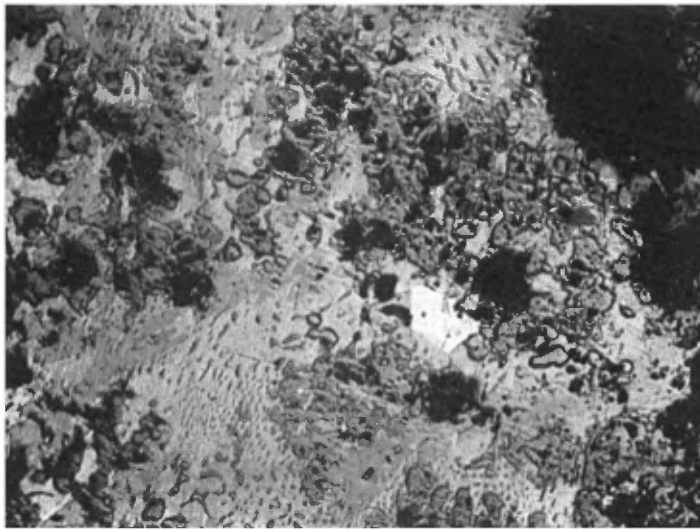


PLANCHE II B — 29.7 p. 100 de matte de cuivre —x100  
Bornite avec un peu de magnétite.  
Les espaces noirs sont des vides.

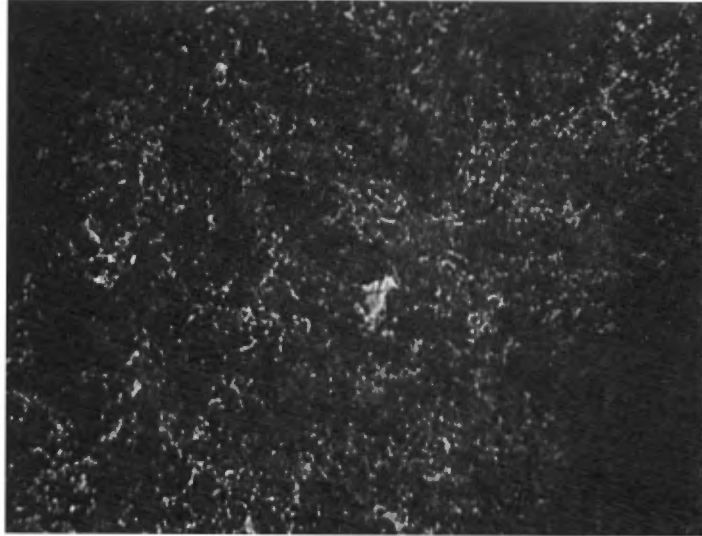


PLANCHE III A — Scorie de la coulée 2 —x100  
La tache blanche au centre est de la matte.  
Espaces de magnétite dans l'échantillon  
pulvérisé.

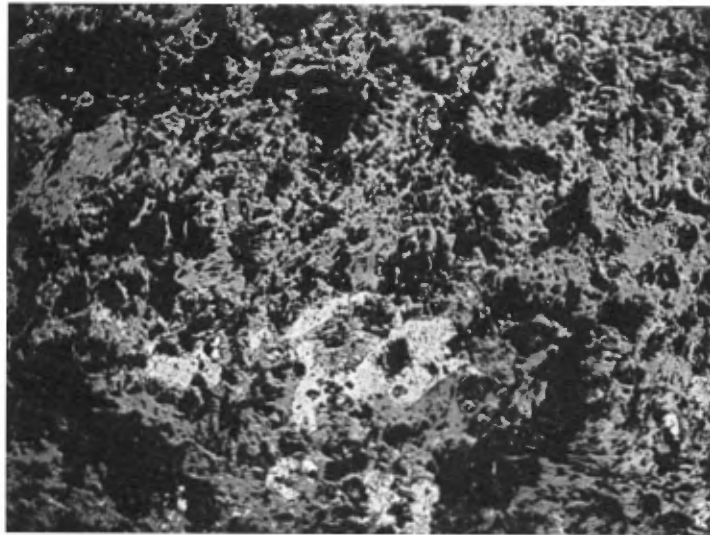
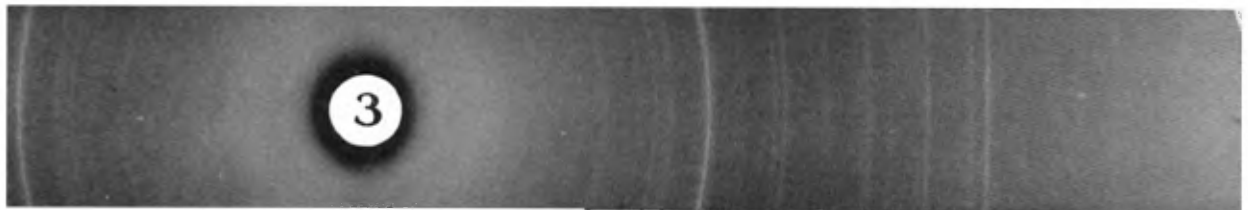
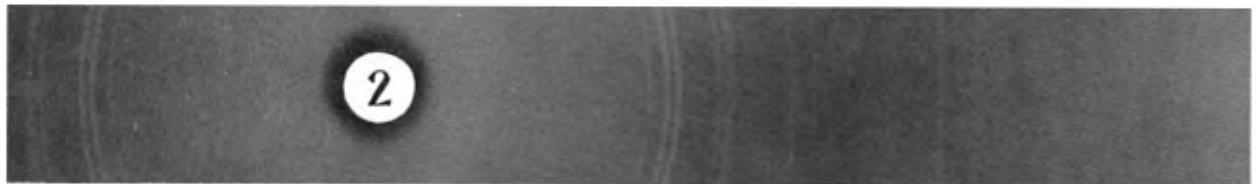


PLANCHE III B — Scorie de la coulée 4 —x100. Les espaces  
blancs sont de la matte.



X MX MX M XM M XM M

PLANCHE IV — Diagramme de diffraction des rayons X\* des substances trouvées dans les échantillons de matte et de scorie:

1 — Bornite (Matte 10)

2 — Pyroxène monoclinique (Scorie A2).

3 — Composant X (Marqué X) et magnétite (Marquée M) Scorie C3.

\* L'étude de la diffraction des rayons X a été faite par Fernand Claisse, physicien, laboratoires du ministère des Mines, Québec.

