

CANADA
MINISTÈRE DES MINES

HON. LOUIS CODERRE, MINISTRE ; A. P. LOW, L. L. D., SOUS-MINISTRE

DIVISION DES MINES
EUGÈNE HAANEL, PH. D., DIRECTEUR.

BULLETIN N^o 3

PROGRÈS RÉCENTS

DANS LA

CONSTRUCTION DES FOURS ÉLECTRIQUES

POUR LA

PRODUCTION DE LA FONTE, DE L'ACIER ET DU ZINC

PAR

EUGENE HAANEL, Ph.D.

Directeur de la Division des Mines



OTTAWA
IMPRIMERIE DU GOUVERNEMENT

1914

N^o 263

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Introduction par Eugène Haanel, Ph. D.	5
<i>Fours à Acier</i>	5
Etat actuel de l'industrie de l'acier électrique	6
Liste des fours électriques à acier en Europe, etc.	6
<i>Fours de réduction des minerais de fer.</i>	12
Comparaisons avec d'autres fours	12
Citation de Grönwall sur les expériences récentes à Domnarfvet, Suède	12
Discussion au parlement suédois	13
Initiative du gouvernement suédois	14
Initiative de la part de particuliers en Norvège	14
Installation de smelters électriques et aciéries dans l'Inde.	14
<i>Fours électriques pour la réduction du zinc et de l'oxyde de zinc</i>	15
Procédé Côte-Pierron	16
Procédé De Laval 1909	18
Appendice (I)—	
Traduction du rapport officiel de M. Lars Yngstrom sur les expériences faites à Domnarfvet, Suède, (mai-juil. 1909), sur la réduction de minerais de fer par le procédé électro-thermique	20
Appendice (II)—	
Le four électrique à réduction Frick	50
Appendice (III)—	
Le four électrique à acier "Frick"	64

ILLUSTRATIONS

Photographie.

Planche I. Le four électrique à acier "Frick"	64
---	----

Dessins.

Fig. 1. Four électrique à zinc et condensateur Côte-Pierron	16
Four Domnarfvet:—	
2. Graphique: carbone et énergie électrique nécessaire pour la réduction de la magnétite	23
3. Graphique: pourcentage volumétrique de CO ₂ dans le gaz	23
4. Graphique: carbone et énergie électrique nécessaire pour la réduction de l'hématite	24
5. Graphique: pourcentage volumétrique de CO ₂ dans le gaz	24
6. Plan de l'installation du four à Domnarfvet	26
7. Disposition du tableau de distribution	27
8. " des circuits électriques du four	28
9. Four d'essai N° 1.	30
10. " " N° 2.	31
11. " " N° 3.	32
12. " " N° 4.	36
13. Modèle final du four électrique à cuve	34
14. Four électrique à réduction "Frick"	50
15. Four à acier Frick, types I et II	66
16. Four d'affinage à acier "Frick", type III	66
17. Rotation du bain d'acier	73

PROGRÈS RÉCENTS

DANS LA

CONSTRUCTIONS DES FOURS ÉLECTRIQUES

POUR LA

PRODUCTION DE LA FONTE, DE L'ACIER ET DU ZINC.

INTRODUCTION.

PAR

EUGENE HAANEL, Ph. D.

Directeur de la Division des Mines.

I.

Four à acier.

Il sera facile d'apprécier la rapidité extraordinaire avec laquelle se sont développés et perfectionnés les fours électriques pour la production de l'acier, depuis la publication du rapport de la commission instituée par le gouvernement fédéral pour rechercher les différents procédés électro-thermiques pour la fusion des minerais de fer et la fabrication de l'acier, en opération en Europe dans l'année 1904, lorsqu'on saura qu'il n'existait alors en Europe que quatre fours-électriques d'une capacité relativement faible; tandis qu'en 1910, six ans après, il y en avait 67 en opération, 11 inactifs, et 36 en voie de construction. Le journal technique bien connu: "Stahl und Eisen", du 23 mars, 1910, publie la liste suivante des fours actuellement en opération ou en voie d'installation:—

Etat actuel de l'Industrie de l'acier électrique.

(A) FOURS A ARC.

Numéro	Compagnie	CAPACITÉ EN KILOGRAMMES			Courant	Kilowatts	Méthode de chargement	Nature du Produit,
		En activité	Inactifs	En Construction				
	<i>Système Héroult*</i>							
1	Stahlwerk, Richard Lindenberg, A. G., Remscheid-Hasten, Allemagne.....	1,800	.....	.....	Courant alternatif monophasé	400	Métal fondu provenant d'un four Martin ou à réverbère et aussi chargé à froid.	Acier à outils, acier de construction, matériel de guerre.
2	" "	3,000	.....	.....	"	520	"	Matériel de guerre, acier pour dynamos
3	Bismarckhütte, Haute Silésie, Allemagne.....	1,800	.....	.....	"	400	"	au silicium, bandages de locomotives.
4	" "	3,000	.....	.....	"	540	"	Tuyaux d'acier fondu.
5	Mannesmannrohren Werke, Burbach, Allemagne.....	3,000	.....	.....	"	570	"	Moulagés d'acier.
	Gewerkschaft "Deutscher Kaiser" Bruckhausen, Allemagne.....	.....	.....	6,000	"	800	Métal froid	rails de
7	" " .....	.....	.....	6'000	"	800	et fondu provenant du four à réverbère.	qualité moyenne et de toutes sortes.
8	Gebr. Bohler & Co., A. G., Kapfenberg, Autriche....	2,500	.....	.....	"	400	"	Acier à outils, de construction, matériel de guerre, fil laminé, acier à dynamo et plaques laminées.
9	Karntnerische Eisen und Stahl-Werks-Ges., Ferlach, Autriche.....	5,000	.....	.....	"	765	Charge à froide.	"
10	Bruder Lapp, Rottenmann, Autriche.....	6,000	.....	.....	"	785	"	"
11	George Fisher, Schaffhausen, Suisse.....	1,200	.....	.....	"	250	"	Moulagés d'acier.
12	Società Tubi Maunemann, Dalmine, Italie.....	.....	.....	6,000	"	765	"	Tuyaux fondus
13	" " .....	.....	.....	6,000	"	765	"	
14	Soc. Electrométallurgique Française, Froges, France	2,500	.....	.....	"	400	"	Acier à outils,
15	Acéries du Saut du Tarn, St. Jucry, France.....	5,000	.....	.....	"	500	Métal fondu du four Martin ou à réverbère.	Moulagés d'acier.
16	Usines Métallurgiques du Hainaut Couillet, Belgique.....	.....	.....	5,000	"	400	"	Acier à outils
17	Edgar Allen & Co., Sheffield, Angleterre.....	.....	.....	2,500	"	400	"	"
18	Vickers, Sons & Maxim Sheffield, Angleterre.....	.....	.....	2,500	"	.....	.....	.....
19	Acéries d'Obuchoff, St. Petersburg, Russie.....	3,500	.....	.....	"	660	Métal fondu du réverbère.	Construction navale
20	Aktiebolaget Héroult Elektriska Stal, Korfors, Suède.....	3,500	.....	.....	"	400	Charge à froid	Acier à outils
21	Holecomb Steel Company, Syracuse, N. Y.....	5,000	.....	.....	"	.....	Fonte en fusion	"
22	Firth-Sterling Steel Company, McKeesport, Pa....	2,500	.....	.....	"	.....	Métal fondu du réverbère.	"
23	" " .....	.....	.....	5,000	"	.....	.....	.....

*En outre de la production de fonte provenant des trois fours Héroult en opération à Welland et au Sault Ste-Marie, Canada et à Héroult-on-the-Pitt, Californie.

Etat actuel de l'Industrie de l'acier électrique (Suite)

(A) FOURS A ARC (Suite)

Numéro	Compagnie	CAPACITÉ EN KILOGRAMMES			Courant	Kilowatts	Méthode de chargement	Nature du produit
		En Activité	Inactifs	En construction				
<i>Système Girod</i>								
14	Ternitzer Eisen und Stahlwerke, Schoeller & Co., Ternitz, Autriche			500	Alternatif monophasé	300	Charge à froid et métal fondu	Acier à outils et acier de qualité supérieure.
15	Danner & Cie., Judenburg Autriche.....			1800 à 2000	"	300	Charge à froid	
16	Diosgyorer Sgl. Eisen und Stahlwerke, Diosgyor, Hongrie			2000	"	300	"	"
17	Usines Américaines anonymes.....			500	"			Acier à outils
<i>Système Stassano—</i>								
1	Forni Termoelettrici Stassano, Turin, Italie		100		Courant alternatif	80	Charge à froid	Aciers spéciaux
2	" "		400		"	80	"	
3	" "		1000		Courant continu	200	"	Moulages d'acier, acier à automobile
4	" "		1000		"	200	"	
5	" "		800		"	150	"	
6	" "		5000		"	800	"	
7	" "		5000		"	800	"	
8	Arsenal Royal, Turin, Italie	800			"	150	"	Matériel d'artillerie et projectiles
9	" "	800			"	150	"	
10	Rheinische Elektrostahlwerke G. m. b. H., Bonn, Allemagne.....	1000			"	200	"	Acier à outils
11	" "	1000			"	200	"	
12	Léopold Gasser, St. Polten, près Vienne.....	1000			"	200	"	Moulages d'acier, acier de qualité supérieure.
13	" "			1000	"	200	"	Matériel de qualité supérieure et matériel de guerre, acier spécial, moulages d'acier.
<i>Système Keller—</i>								
1	Acieries J. Holtzer, Unieux, France.....	8000			Courant alternatif monophasé 4 électrodes par paires	750	Métal fondu du réverbère	Matériel de qualité supérieure et matériel de guerre, acier spécial, moulages d'acier.
2	" "			1500	1 électrode	200	Métal fondu du réverbère et charge à froid.	Matériel de qualité sup. acier spécial et à outils.
3	Société des Etablissements Keller-Leleux, Livet, France.....	1500			"	200	Charge à froid	Matériaux de qualité supérieure, acier spécial, moulages d'acier.
4	" "	3500			"	450	"	
5	" "	200			"	80	"	Four d'essai.

Etat actuel de l'industrie de l'acier électrique (Suite)

(A) FOURS A ARC — (Suite)

Numéro	Compagnie	CAPACITÉ EN KILOGRAMMES			Courant	Kilowatts	Méthode de chargement	Nature du produit
		En activité	Inactifs	En construction				
<i>Système Keller—</i>								
6	Luxemburger Bergwerks und Saarbrucker Eisenhütten, A. G., Burbacherhütte, Saarbrücken, Allemagne.....	.....	.....	3500	Courant alternatif monophasé, un électrode et cuve électrode.	450	Acier basique fondu	Rails de qualité moyenne, acier de construction.
<i>Système Chaplet—</i>								
1	Soc. des Hauts Fourneaux et Forges, Allevar d, France.....	3500	.....	.....	Courant alternatif monophasé	340	Charge à froid	Aciers spéciaux ordinaires
2	“ “	3500	.....	.....	“	340	“	“
3	“ “	5000	.....	.....	“	600	“	“
4	“ “	5000	.....	.....	“	600	“	“
5	“ “ .....	.....	.....	5000	“	600	“	“
<i>Aktiebolaget Elektrometall Ludvika (Suède)*—</i>								
1	Arvika, Suède.....	1000	.....	.....	Courant continu	175	“	Acier empé
2	Hagfors, Suède.....	500	.....	.....	Courant biphasé.	125	“	.....
3	A. S. Norsk, Elektrometall, Norvège.....	.....	.....	6000	“	736	Charge fondue provenant d'un four électrique.	.....
4	Cie Minière St-Jean del Rey Brésil.....	.....	.....	2000	“	300	Charge à froid	.....
<i>Système de la Cie.—</i>								
1	A. Hickman, Staffordshire Angleterre.....	300	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Système de la Cie.—</i>								
1	Soc. An. des Acieries et Forges, Firminy, France	50	.....	.....	.....	.....	.....	Four d'essai
<i>Système de la Cie.—</i>								
1	Scott Anderson, Sheffield, Angleterre.....	750	.....	.....	.....	.....	.....	.....

*Il y a, de plus en opération, pour la production de la fonte, les fours suivants sur le même système : Un four en activité à Domnarfvät, Suède, produisant annuellement 2500 tonnes avec une force de 400 kw. courant continu ; deux fours en voie de construction à la A. S. Norsk Elektrometall, Norvège, de 1850 kw. devant produire annuellement 7500 tonnes chacun ; et un four de la même capacité à Trollhattan, Suède.

Etat actuel de l'Industrie de l'acier électrique (Suite)

(B) FOURS A INDUCTION (Suite)

Numéro	Compagnie	CAPACITÉ EN KILOGRAMMES			Courant	Kilowatts	Méthode de charge- ment	Nature du produit
		En ac- tivité	Inactifs	En Cons- truction				
21	7 Le Gallais, Metz & Cie., Dommeldingen, Luxem- bourg	3500	.....	.....	Courant al- ternatif mo- nophasé.	380	Fonte en fusion pro- venant d'un cubilot	
22	8 " "	3500	.....	.....	"	380	"	Acier de qua- lité supérieure
23	9 " "	700	.....	.....	"	100	"	Acier fondu
24	10 " " .....	.....	.....	1500	Courant continu	275	"	
25	11 " " .....	.....	.....	3500	Courant al- ternatif mo- nophasé.	380	"	
26	12 Aciéries de la Marine et d'Homecourt, St-Chamond France .....	.....	.....	3000	Courant continu	350	Charge en fusion ou à froid	Acier de qua- lité supérieure
27	13 Aciéries Liégeoises, Bres- soux-les-Liège, Belgique.	.....	1000	.....	"	200	Charge à froid	Acier fondu
28	14 Kronwerkh Ziotooush, Russie .....	.....	.....	1000	"	175	"	Matériel de guerre
29	15 Richard Honey, Mexcio <i>Système Kjellin Cobby</i>—	.....	.....	2500	"	300	Fonte en fu- sion avec addition de minerai	Acier supé- rieure
30	1 American Electric Fur- nace Company, Niagara Falls, N. Y.	750	.....	.....	Courant al- ternatif mo- nophasé	150	.....	.....
31	2 " "	100	.....	.....	"	60	.....	.....
	<i>Système Frick</i> —							
1	Fried, Krupp, A. G., Essen n. d. Ruhr, Allemagne ..	10000	.....	.....	"	750	.....	.....
	<i>Système Schneider</i> —							
1	Schneider & Co., Creusot, France	1000	.....	.....	.....	.....	.....	Four d'essai
	<i>Système Hiorth</i> —							
1	Norvège .....	.....	?	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Système de la Cie</i> —							
1	Forges de St-Jacques Mont- luçon, France .....	?	.....	.....	.....	.....	.....	.....

(C) FOURS A ARC ET A RÉSISTANCE.

	<i>Système Nathusius</i> —							
1	Oberschlesische Eisenbahn- Bedarfs, A. G., Frieden- shutte, Allemagne	5000	.....	.....	Courant al- ternatif tri- phasé.	750	Métal fondu du conver- tisseur ou du réver- bère	Acier doux et acier dur
2	" "	1000	.....	.....	"	250	Métal fondu ou solide du réverbère	Four d'essai

II

Fours de réduction des minerais de fer.

Le développement des fours électriques pour la fabrication de l'acier, tel qu'indiqué par la liste qui précède, a été beaucoup plus rapide que l'adoption soit du four à réverbère, ou du convertisseur Bessemer — lesquels furent introduits en 1855 et 1856 respectivement. Rien n'a été fait au Canada en vue de l'utilisation des procédés électro-thermiques, pour la fusion des minerais de fer, depuis les expériences faites au Sault Sainte-Marie, en 1906; mais en Suède, où les conditions, en ce qui concerne les minerais de fer, et l'absence du charbon, sont très semblables à celles qui existent au Canada, l'esprit d'initiative et le progrès accompli sont vraiment dignes d'éloges. Les ingénieurs suédois sont, aujourd'hui, à la tête du mouvement d'application pratique des avantages industriels démontrés par nos expériences canadiennes.

Avec un esprit d'initiative bien méritoire, un syndicat d'ingénieurs et de capitalistes a entrepris sans hésitation, en dépit des risques techniques et financiers, de résoudre le problème d'établir sur une base commerciale la fusion par l'électricité des minerais de fer réfractaires. Jusqu'à présent, d'excellents résultats ont été obtenus en ce qui concerne le four Domnarfvet — voir mon rapport (No. 32) sur une investigation au sujet d'un four électrique à cuve à Domnarfvet, Suède, 1908-9; maintenant à sa deuxième édition. Depuis la publication de ce rapport, on a fait des améliorations importantes pour le perfectionnement de ce four. Nous citons ce qui suit d'une correspondance reçue le 20 avril 1910 de M. A. Grönwall, ingénieur électrique et métallurgiste, à Ludvika, Suède, l'un des inventeurs du four Domnarfvet:

'Nous sommes heureux de pouvoir vous annoncer que nous avons obtenu, ces mois derniers, un très beau succès avec notre four électrique à cuve. Le four à Domnarfvet a été remis en activité le 1^{er} mars, sans qu'il ait été reconstruit. Par conséquent le four a encore une capacité de 800 chevaux. Le seul changement qu'on y ait fait est de faire circuler les gaz autour des électrodes, à l'intérieur des doubles parois remplies d'eau. Par ce moyen on empêche la perte de chaleur occasionnée auparavant par le chauffage de l'eau; attendu que le gaz absorbe une bonne partie de la chaleur produite dans le four. De plus, les boîtes à eau sont faites maintenant d'une matière non magnétique, ce qui prévient une perte considérable de force électrique. Comme conséquence, le rendement s'est trouvé tellement augmenté que, à présent, avec une charge de minerai à 55 pour cent de fer et marchant en fonte grise, on obtient 6,283.11 livres de fonte par cheval-an; et dans la marche en fonte blanche, on obtient 6,613.8 livres par

cheval-an. Le four a été continuellement en opération, et fonctionne d'une manière satisfaisante.'

L'impression créée dans toute la Suède, par le succès obtenu à Domnarfvet, dans l'utilisation des minerais de fer de basse teneur qui est pour le pays d'une importance nationale, a été telle que le gouvernement suédois a décidé de prendre cette affaire en main dans l'intérêt du pays, ainsi que l'indique l'extrait suivant de l'un des principaux journaux suédois. Pour bien comprendre cette situation, il faut savoir que le gouvernement contrôle tous les pouvoirs hydrauliques importants, et a institué un service spécial pour les administrer sous le nom de "Commission royale des pouvoirs d'eau," sous la direction du colonel P. V. Hansen. Le 26 avril 1910, il a été présenté au parlement une mesure à l'effet qu'un puissant pouvoir hydraulique situé à Porjus, dans la province septentrionale de Norrbotten fût utilisé pour l'exploitation d'un chemin de fer et pour l'électrométallurgie. La traduction du rapport publié dans le 'Daily News, de Stockholm, le mercredi, 21 avril 1910, débute par l'interrogation suivante :

"Mais serait-il possible aussi loin qu'à Norrbotten (68° N), de trouver un marché pour cette force hydraulique? Le colonel Hansen répondit à cette question de la façon la plus optimiste, en citant l'opinion de deux autorités en la matière: l'une était le directeur général E. J. Ljungberg¹, qui déclara que, après les expériences de Domnarfvet, *'on pouvait considérer la fusion du minerai de fer par l'électricité comme un problème pratiquement et économiquement résolu'*, et qu'il était déjà question de tenter la production de 100,000 tonnes d'acier électrique à cet endroit. A Kiruna et à Gällivare, déclara le directeur général Ljungberg, il y a de très gros gisements de minerai de fer non susceptibles d'exportation, mais qui pourraient être traités avec profit à l'électricité.

'L'ingénieur en chef Brinnell² avait exprimé une opinion analogue et vigoureusement insisté sur l'importance de la proposition faite au sujet de Norrbotten; puis incita le gouvernement à bien se rendre compte qu'il y avait une provision abondante de force électrique au plus bas prix possible, qui pouvait ainsi être utilisée pour la réduction électrique des minerais de fer.

'On peut constater combien est grand dans le pays le désir qu'on fasse l'acquisition de forces motrices pour l'usage ci-dessus mentionné, par les nombreuses demandes d'information provenant des diverses usines pour la fabrication du fer, concernant la possibilité qu'il y aurait d'utiliser comme force motrice la chute d'Alfkarleby. Le colonel Hansen a répondu qu'il espérait pouvoir réaliser ce projet à la prochaine session en faisant une proposition au parlement, laquelle il avait lieu d'espérer, serait approuvée par la chambre. En présence de ces considérations générales, la Commission des pouvoirs d'eau n'avait pas hésité à recommander le projet Porjus.

¹ Directeur de la compagnie industrielle la plus importante et la plus influente de la Suède: la 'Stora Kopparbergs Bergslags Aktiebolag'.

² Ingénieur en chef des Jern-Kontorets de Stockholm, Suède.

“Dans son discours final, le colonel Hansen a exprimé sa conviction que si ce projet était sanctionné par le gouvernement, ce serait non seulement la province de Norrbotten mais la Suède entière qui en bénéficierait.

“Les projets d'intérêt national, économiques et d'idées si larges du Président de la commission royale des pouvoirs d'eau firent une impression profonde sur l'assemblée. Son discours a été accueilli de la chambre par les représentants avec des applaudissements enthousiastes, auxquels le ministère de l'Intérieur n'a pas manqué de prendre part.”

Des affiches en date du 29 avril, annoncent que le pouvoir hydraulique de Porjus, propriété du gouvernement, est ouvert à l'exploitation et qu'il est susceptible d'un développement de 300,000 chevaux; alors qu'un autre de semblable capacité sera prochainement développé à Vakkokoski. Nous pouvons ainsi constater que le gouvernement va bientôt mettre à la disposition du pays 600,000 chevaux de pouvoirs hydrauliques, dont la majeure partie sera destinée à l'exploitation de l'une des plus vastes régions de minerai de fer de la Suède.

Le four Domnarfvet, qui a été officiellement étudié par la Division des Mines, en décembre 1908, a été remis en activité le 7 mai 1909, et a continué de fonctionner, sauf quelques rares intervalles, jusqu'au 30 juillet. Il a été fait un rapport très détaillé sur le fonctionnement du four, durant ces trois mois, par M. Lars Yngstrom, pour le Jern-Kontorets Annaler. (Voir la traduction à l'Appendice I.)

On est à installer une seconde usine commerciale pour la production de la fonte et de l'acier, par le procédé électro-thermique, à Tysse, Norvège. Cette installation se composera de deux fours électriques à cuve du type Domnarfvet, d'une capacité de 2,500 chevaux chacune, pour la réduction de minerais de fer; et aussi de deux fours à résistance pour l'acier, de chacune 600 chevaux de capacité, de même qu'un laminoir pour fer en barres et fer plat. L'usine doit être agrandie plus tard par l'addition de quatre fours électriques à cuves, et de deux nouveaux fours à acier d'une capacité de plus de 600 chevaux.

M. Boholm, de Trondhjem, Norvège, nous écrit qu'il est à préparer la construction d'une aciérie électrique où l'on manufacturera les produits d'acier, dans le nord de la Norvège, dans le but d'utiliser les minerais de ses propres mines, et a fait une demande à la Division des Mines pour un métallurgiste qui prendrait la direction de son personnel.

On annonce également qu'un syndicat, soutenu par du capital anglais, est en voie de formation pour ériger, près de Bombay, Inde, une usine électro-métallurgique pour la fabrication de roues, bandages, essieux, ressorts, etc., pour les chemins de fer indiens. On croit que le laminoir sera prêt à fonctionner en mars prochain et toute l'usine sera actionnée par l'électricité.

On trouvera dans l'appendice II une description du four de réduction électrique 'Frick,' lequel est fait sur un modèle semblable à celui de Domnarfvet: le caractère distinctif en est la double enveloppe garnie de charbon

qui entoure chacune des électrodes, afin de les protéger contre l'effet oxydant du minerai et de l'usure produite par le frottement des charges descendantes, ce qui augmente considérablement leur durée, et, en même temps, protège efficacement les parois du four.

Il y a eu un four électrique à bascule "Frick" de 5 tonnes, pour l'acier, d'une capacité de 1,000 chevaux, qui a fonctionné aux usines Krupp, à Essen, Allemagne, depuis novembre 1904. Ainsi qu'on le voit par la planche I, page 58, ce four est du type à induction ou transformateur monophasé à courant alternatif de 5,000 volts. Une bonne description, accompagnée de détails intéressants et pratiques relatifs au fonctionnement de ce four, ainsi que le détail de son four électrique de raffinage de l'acier Martin ou Bessemer, nous ont été communiqués par l'inventeur, M. Otto Frick, et sont publiés dans l'appendice III de ce rapport.

III.

Fours électriques pour la réduction du zinc et de l'oxyde de zinc.

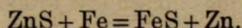
FOURS À ZINC.

Dans le rapport sommaire annuel de 1908, j'ai fait mention de deux procédés électro-thermiques pour la production du zinc, savoir: celui de l'usine de Trollhatten, Suède, et celui de l'usine de démonstration que l'on érige actuellement à Londres, Angleterre; tous les deux sont dûs à l'invention du Dr. De Laval, mais différent en principe et en construction.

Depuis, nous avons reçu des détails sur un troisième procédé (inventé par MM. Côte et Pierron, de France), que l'on prétend être particulièrement économique pour le traitement des minerais complexes de fer et de plomb; attendu qu'il effectue une séparation pratiquement complète du zinc d'avec le plomb.

PROCÉDÉ CÔTE-PIERRON.

Dans ce procédé, on a tiré partie du fait bien connu que le soufre a une affinité chimique plus grande pour le fer que pour le zinc. A une température relativement basse, la réaction se fait suivant la formule :



Le four (Fig. 1) consiste en un cylindre en tôle dont les parois et le fond sont recouverts de graphite. La partie supérieure composée de

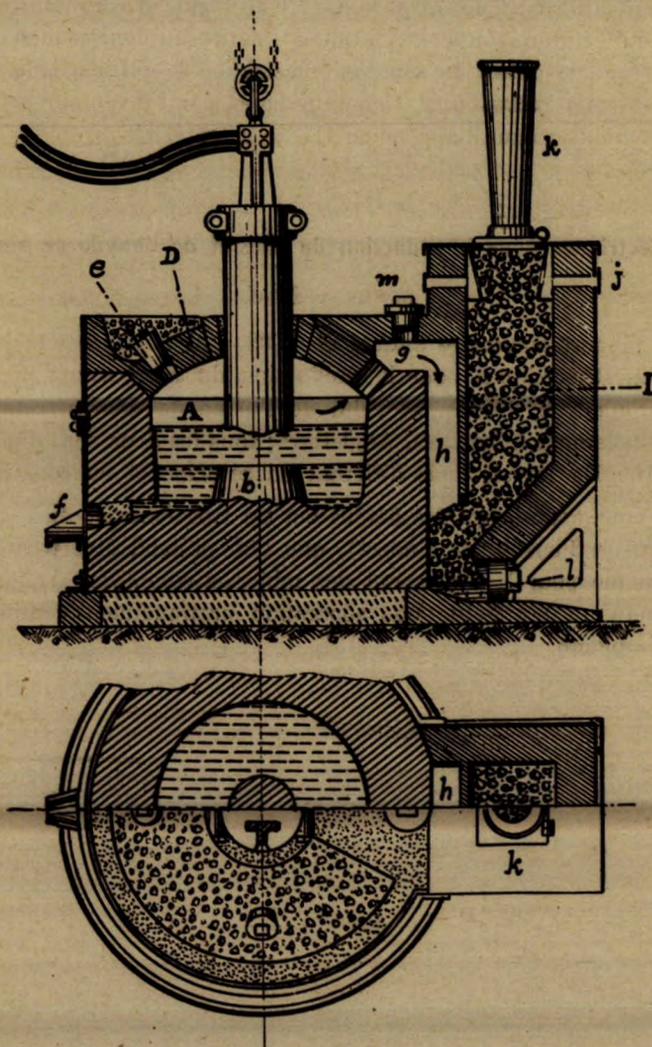


Fig. 1.

Four électrique à zinc Côte-Pierron avec condensateur.

au centre pour recevoir un charbon électrode cylindrique; et l'autre — brique réfractaire en forme de voûte, est percée de deux ouvertures: l'une qui peut se fermer au moyen d'une porte — est située au côté, et sert pour

le chargement même. Le mur du four s'étend au delà de la partie inférieure de la voûte, où se trouve placé la porte de chargement; et la surface ainsi formée est recouverte par la charge, laquelle, de cette façon, est séchée et déjà réchauffée avant de pénétrer dans le four. Un trou de coulée sur le côté du four, à une distance convenable du fond du creuset, permet l'évacuation du laitier en fusion, et de tout métal fondu autre que le zinc. Une électrode de graphite de forme conique, surmonte le fond du creuset. Sur la paroi du four qui fait face au trou de coulée, et à la naissance de la voûte, le four communique avec l'appareil condensateur au moyen d'un canal formé d'une matière réfractaire y pénétrant dans sa partie la plus basse. L'appareil condensateur consiste en une cuve cylindrique remplie de morceaux de carbone, et est pourvue à sa base d'une porte pour la coulée du zinc. Une ouverture est réservée dans le haut du four pour donner accès au canal afin de pouvoir le nettoyer lorsqu'il y a lieu. Le condensateur est alimenté de morceaux de carbone au moyen d'un tuyau en dessus que l'on remplit au fur et à mesure. Immédiatement au-dessous de ce tuyau, et un peu au-dessus de la voûte du four, le condensateur est muni d'ouvertures de chaque côté, pour laisser pénétrer de l'air de l'extérieur, lorsqu'il en faut, pour rendre le carbone incandescent.

Nous donnons ci-après une description sommaire de la méthode de chargement et du fonctionnement de ce four :

MODE DE FONCTIONNEMENT.

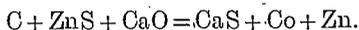
La charge est placée dans le creux qui entoure l'orifice destinée au chargement, lequel est fermé. On fait ensuite passer le courant à travers l'électrode, et la chaleur produite se trouve, par radiation, répandue dans le creuset. Le trou de coulée dans le condensateur, à travers lequel est coulé le zinc, demeure ouvert durant l'opération. Lorsque le creuset a été suffisamment chauffé, on bouche le trou de coulée, et l'on fait vivement passer la charge à travers l'orifice de chargement dans la voûte, lequel on referme immédiatement. La charge, chauffée au contact de l'électrode, augmente rapidement de température jusqu'à ce que le plomb s'échappe par le trou de coulée, que l'on a eu le soin d'ouvrir à cette intention. Une fois que tout le plomb susceptible de se dissocier d'avec la charge est sorti du four, la porte de coulée du condensateur, de même que le trou de coulée du four, sont refermés; le courant est graduellement augmenté et le chauffage de la charge est effectué par arc et résistance. Le fer se combine alors avec le soufre de la blende, formant du sulfure de fer; et le zinc se dégage sous forme de vapeur qui s'échappe du four pour descendre par le canal vertical jusque dans le condensateur. La vapeur de zinc se liquéfie sous forme de gouttes, lesquelles, coulant doucement, s'accumulent dans le fond du condensateur. Afin de prévenir la formation de poudre de zinc, le carbone dans le condensateur est maintenu à une chaleur rouge. L'apparence de nuages blancs dans le haut du tuyau du condensateur est signe de conden-

sation imparfaite; il faut alors immédiatement régler la chaleur dans le condensateur.

Le fer étant, jusqu'à un certain point, volatil, il faudra, pour empêcher le zinc d'être rendu impur par le fer, qu'il y ait suffisamment de laitier pour protéger les métaux fondus. Une fois la réaction terminée on fait écouler au dehors le laitier et le sulfure de fer.

Le sulfure de fer peut être vendu comme produit accessoire, ou réduit pour employer le fer de nouveau si la quantité est jugée suffisante. Il faut 1,800 livres de fer pour produire une tonne (2,000 livres) de zinc.

Pour la production de l'oxide de zinc pur avec du minerai de qualité inférieure, on modifie le procédé. Au lieu d'employer du fer pour absorber le soufre de la blende, on y substitue de la chaux et du charbon; il se produit alors dans le four une réaction, qui est représentée par la formule suivante :—



Les vapeurs de zinc qui passent dans la chambre de combustion sont brûlées à l'état d'oxide qui se rend par des tubes métalliques dans de grandes chambres de dépôt.

PROCÉDÉ DE LAVAL POUR LE ZINC, 1909.

Le syndicat Laval-Ferguson est à faire à Londres, Angleterre, une installation pour démontrer la possibilité d'appliquer avec économie un nouveau procédé pour la fabrication directe du zinc en partant du minerai.

Le procédé est le suivant :—

Le minerai, le fondant et le combustible sont broyés séparément, passés à travers un tamis fin et projetés sous forme d'un nuage de poussière dans le sommet de ce que l'on appelle un four à cyclone. En passant dans le four ils sont rencontrés tangentiellement par un courant d'air circulaire à haute pression et à un degré de température élevé. Ce courant empêche la charge de se déposer rapidement, et les métaux volatiles sont convertis de sulfures en oxides, sous forme de vapeurs qui sont retirées du four par succion. Les métaux non volatiles, à cause de leur densité, sont projetés contre les parois du four où, étant donnée la chaleur intense qui y est produite, ils sont fondus et coulent doucement dans le creuset au fond du four.

Les vapeurs oxydées de zinc et de plomb, et l'acide sulfureux formés passent à travers un appareil refroidissant et se rendent dans la chambre à empocher où les oxydes de plomb et de zinc tombent dans les sacs, d'où l'acide sulfureux est entraîné par aspiration et retourne aux appareils régénérateurs.

Le traitement subséquent des oxydes mélangés se fait dans ce que l'inventeur appelle les 'Cyclone producers' ou dans des fours électriques. On n'a pu obtenir la description d'aucun de ces fours.

L'oxyde de carbone résultant de la réduction de ces oxydes est utilisé pour la désoxydation de l'acide sulfureux, qui, par ce procédé, donne ainsi du soufre solide.

Nous donnons ci-après, un exemple de prix de revient choisi dans différentes tables de prix de revient, ainsi que l'analyse des minerais employés et leur prix.

Analyse moyenne d'un minerai de zinc de Broken Hill:—

Zn, 16; Pb, 18; Fe, 5; S, 15; Si. 40%; Ag. 12 onces.

Prix de revient:—

Traitement de 100 tonnes à 12 s.	£ 60.
Broyage par force motrice dérivée de l'oxyde de carbone produit	1
Main d'œuvre: 12 hommes à 10 s.	6
Renouvellements des fours	9
Charbon pour chauffer et réduire 30 tonnes dans les producteurs à cyclone ¹ , à £ 1. 10 s.	45
Fondant, 50 tonnes à 14 s.	21

£ 142

Frais d'amortissement 18

£ 160

Prix de revient: £1 12 s. par tonne de minerai

Produit:

Zn 16 - 1.5 = 14.5 tonnes à £ 16	£ 232
Pb 18 - 2 = 16 tonnes à £ 10	160
S 15 - 1 = 14 tonnes à £ 4	56
Ag 1,200 onces à 2 s. l'once	120

£ 568

Moins le transport pour l'Europe de 30 tonnes de
métal à £ 2 60

£ 508

Profit par jour, soit = £ 330 sur le traitement de
100 tonnes de minerai.

£ 220

Prix de revient du métal, — = £ 7, par tonne.

30.5

Les chiffres ci-dessus semblent encourageants, mais comme ce procédé n'a encore été soumis à aucun essai expérimental, on attend avec intérêt l'expérience pratique qui doit s'en faire.

¹ Le prix de revient de l'énergie électrique et du charbon pour la réduction, si l'on se sert de four électrique, n'est pas donné.

APPENDICE I.

RAPPORT SUR LES EXPÉRIENCES FAITES A DOMNARFVET,
SUEDE, SUR LA RÉDUCTION DE MINÉRAIS DE FER
PAR LE PROCÉDÉ ÉLECTRO-THERMIQUE.

PAR

Lars Yngström, I. M.

(Traduit de 'Bihangtill Jern-Kontorets Annaler, 1909,'
par E. Lindeman, I. M.)

On sait depuis longtemps que l'on peut obtenir le fer du minerai de fer au four électrique, lorsqu'on y ajoute du carbone pour la réduction des oxydes et la quantité de fondant voulue pour faire un laitier approprié avec les minéraux de la gangue. Nous avons appris comment, en plusieurs occasions, on a fait quelques tonnes de fonte avec du minerai de fer dans des fours électriques destinés à la fabrication des alliages de fer ou de l'acier, mais cela s'est pratiqué plutôt à titre d'expérience que d'une façon régulière.

La question de réduire en fer les minerais de fer au moyen de l'électricité, intéresse particulièrement les pays qui possèdent de grandes ressources en minerais de fer et qui, de plus, peuvent disposer de chutes d'eaux facilitant la production de la force électrique à bon marché. La pénurie de charbon indigène rend la solution du problème d'une importance encore plus grande. En raison de tout ceci, le problème de la réduction du minerai de fer par le procédé électro-thermique a été, en Suède, l'objet d'une attention toute particulière.

On a fait des expériences, ces quelques années dernières, aux usines de fer de Domnarfvet, en vue de la construction d'un four électrique pouvant s'adapter à une production continue de fonte.

Maintenant que ces expériences semblent avoir été couronnées de succès, un rapport sur les données instructives et les résultats obtenus ne devrait pas manquer d'intérêt.

Etude théorique du problème.

Il serait peut-être à propos de commencer par une estimation de la quantité de carbone et d'énergie électrique théoriquement nécessaires pour la production d'une tonne¹ de fonte dans un four électrique.

Nous savons que le but de l'usage du courant électrique est de remplacer une partie du carbone qui est nécessaire pour la fusion de la charge dans le haut fourneau.

¹ C'est de la tonne métrique de 1,000 kilogrammes qu'il sera question dans tout cet article.

La quantité de carbone varie suivant ce qu'il y a de CO_2 et de CO dans les gaz produits, par exemple, plus ces gaz contiendront de CO_2 , moins il se consumera de carbone. Pour la réduction proprement dite du minerai, il faut toujours une quantité spécifique de carbone.

Nous allons d'abord calculer combien il faut de carbone et d'énergie électrique pour produire une tonne de fonte de la composition suivante:—

Fe = 96 pour cent.

O = 3 " "

Si = 1 " "

Mn. P. S. Cu, trace.

Supposons que le minerai chargé soit de la magnétite, et que le fer contenu soit de 60 pour cent de la charge, c'est-à-dire du total du minerai et de la chaux; supposons, de plus, que les gaz produits contiennent 30 pour cent de CO_2 , et aient une température de 200°C .

Le calcul calorifique que nous donnons ci-après, est basé sur les chiffres suivants:—

Pour réduire 1 kilo de Fe de Fe_3O_4 , 1.650 calories sont absorbés.

" " 1 kilo de Fe de Fe_2O_3 , 1.800 " " "

" " 1 kilo de Si de SiO_2 , 7.830 " " "

Pour transformer 1 kilo C en CO_2 , 8.080 calories sont dégagées

" " 1 kilo C en CO , 2.470 " " "

Pour fondre et surchauffer 1 kilo de fonte 280 calories sont nécessaires.

Pour fondre et surchauffer 1 kilo de laitier¹, 595 calories sont nécessaires

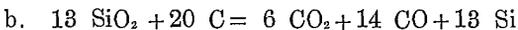
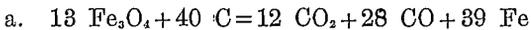
Chaleur spécifique des gaz du four secs, 0.245 calories par kilog.

Nous admettons, de plus, que la température de la charge, au moment de pénétrer dans le four est de 0°C , que le minerai ne contient pas d'eau ni de CO_2 , et que la chaux est calcinée.

I. Calcul de la consommation du carbone.

(Carbone chimiquement pur par 1,000 kilos de fonte.)

Formules de réaction:—



Suivant la formule a, on obtient 960 kilos Fe de 1,325.71 kilos, Fe_3O_4 et pour cette réduction 210.99 kilos C sont nécessaires, alors que 570.70 kilos de gaz ($\text{CO}_2 + \text{CO}$) sont formés.

Suivant la formule b, on obtient 10 kilos Si de 21.43 kilos. SiO_2 , et pour cette réduction 6.59 kilos C sont nécessaires, alors que 18.02 kilos de gaz ($\text{CO}_2 + \text{CO}$) sont formés.

¹ Ce chiffre semble plutôt élevé, mais on a cru qu'il convenait d'ajouter environ 100 calories au chiffre donné habituellement dans les traités de métallurgie, en partie à cause de la haute température du laitier, et aussi parce que, dans le four électrique, on peut avoir à tenir compte d'une certaine quantité de carbure formé dans le laitier.

Quantité totale de carbone nécessaire :—

Pour réduire 960 kilog. Fe	210.99 kgs. C.
Pour réduire 10 kilog. Si	6.59 “
En composés du carbone	30.00 “
	247.58 “

II. *Calcul de la quantité de laitier.*

La charge, c'est-à-dire, le minerai plus la chaux, contient 60 pour cent de Fe. Donc, pour obtenir 960 kilos de Fe, une charge de 16,000 kilos sera nécessaire. Ce qui correspond à 1,325.71 kilos de Fe_3O_4 .

Autres matières composant le laitier	274.29 kilos.
Quantité de SiO_2 à déduire	18.02 “

Total de laitier par tonne de fonte 252.86 “

III. *Calcul de la quantité de gaz dégagé.*

D'après le calcul I a, la quantité de $CO_2 + CO$ est de 576.70 kilos.

D'après le calcul I b, la quantité de $CO_2 + CO$ est de 18.02 “

Total de gaz par tonne de fonte 594.72 “

IV. *Chaleur de combustion du carbone.*

Lorsqu'un kilog. de C est combiné avec de l'O pour former un mélange de gaz contenant volumétriquement 30 pour cent de CO_2 et 70 pour cent de CO, $0.3 + 8,080 + 0.7 + 2,470 =$ kilocalories sont développées.

V. *Bilan de la chaleur.*

Quantité de chaleur nécessaire :—

Pour réduire 960 kilos de Fe de Fe_3O_4 , $960 \times 1,650$	= 1,584,000 calories
Pour réduire 10 kilos de Si de SiO_2 , $10 \times 7,830$	= 78,300 “
Pour fondre et surchauffer 1,000 kilog. de fonte $1,000 \times 280$	= 280,000 “
Pour fondre et surchauffer 252.86 kilog. de laitier, 252.86×595	= 150,452. “
Pour élever la température de 594.72 kilos de $CO_2 +$ CO à $200^\circ C$ soit 200×0.245	= 29.142 “

Total 2,121,894 “

Quantité de chaleur fournie :—

Par la combustion de 217.58 kilos de C, $217.58 \times$ 4.153	= 903,610 calories
Quantité de chaleur devant être fournie par le cou- rant électrique	= 1,218,284 “

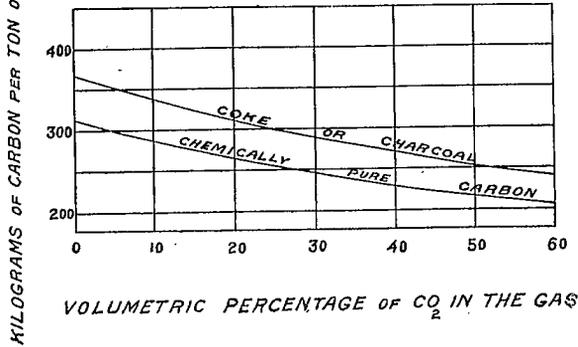
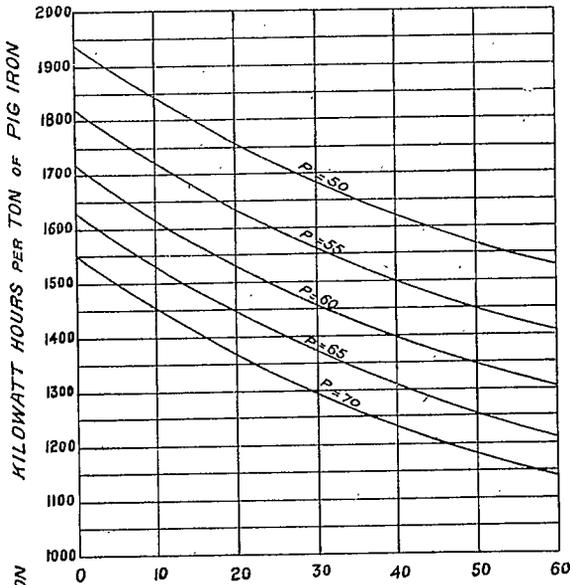
Total 2,121,894 “

La quantité théorique de pouvoir électrique par tonne de fonte sera donc :—

$$\frac{1,218,284}{857} = 1.420 \text{ kilowatt heures.}$$

Carbone et énergie électrique nécessaires pour la réduction de la magnétite.

CARBON AND ELECTRIC ENERGY REQUIRED IN SMELTING MAGNETITE



Pourcentage volumétrique de CO₂ dans le gaz.

Figs. 2 et 3.

Ces graphiques (voir les Figs. 2 et 3) ont été préparés suivant la méthode de calcul précédente. Il y est admis que le contenu de carbone dans le coke est le même que dans le charbon de bois, et que la composition chimique est comme suit :—

Coke:—

C	85 pour cent.
H ₂ O	5 " "
Cendre	10 " "

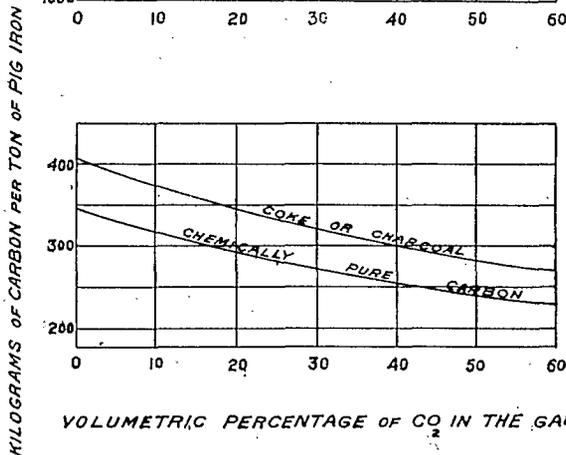
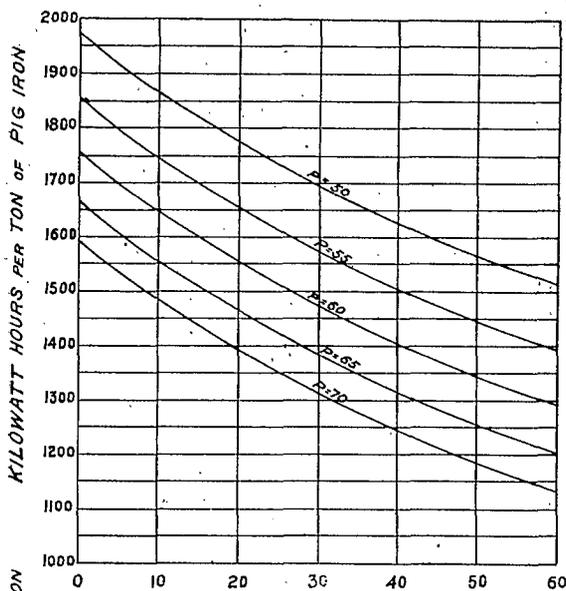
Charbon de Bois:—

C	85 pour cent.
H ₂ O	12 " "
Cendre	3 " "

Les Figs. 2 et 3 s'appliquent lorsque le fer se présente sous forme de Fe₂O₃; et les figs 4 et 5 lorsqu'il s'agit de Fe₂O₂.

Carbone et énergie électrique nécessaires pour la réduction de l'hémétite.

CARBON AND ELECTRIC ENERGY REQUIRED IN SMELTING HEMATITE



Pourcentage volumétrique de CO₂ dans le gaz.
Figs. 4 et 5.

Sur l'abscisse, les pourcentages volumétriques de CO_2 sont échelonnés de 0 à 60 pour cent.

Les ordonnées du tableau supérieur donnent, en kilowatt-heures, l'énergie électrique théoriquement nécessaire pour chaque tonne de fonte lorsqu'on se sert de coke ou de charbon de bois.

Les ordonnées du tableau inférieure donnent en kilogrammes, la quantité par tonne de fonte, de carbone chimiquement pur ou de charbon de bois, nécessaire pour la réduction du minerai¹.

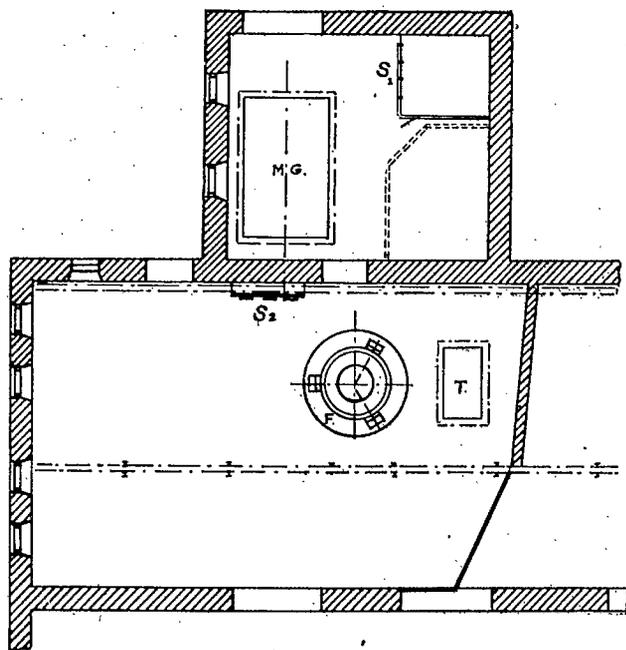
P = la quantité de fer contenue dans la charge (le minerai plus la chaux).

Pour produire une tonne de fonte avec la composition ci-dessus mentionnée, il faudra, d'après ces tableaux, 248 kilos de carbone chimiquement pur, ou 292 kilos de coke ou de charbon de bois, et 1,460 kilowatt-heures, ce qui correspond à une production de 4.4 tonnes de fonte par cheval-an électrique (365 jours). Ceci n'est cependant qu'en supposant que la teneur de CO_2 dans les gaz soit de 30 pour cent, que le minerai soit de la magnétite (Fe_3O_4) et que la charge contienne 60 pour cent de Fe.

¹ La chaleur absorbée par l'eau et la cendre du combustible est supposée être fournie par le courant électrique.

Description du matériel.

Les expériences à Domnarfvét ont été commencées au printemps de 1907 et continuées depuis, sauf quelques interruptions, occasionnées en partie par la reconstruction des fours d'essai, et en partie par le manque d'eau au point de production de la force hydraulique.



M.G. MOTOR-GENERATOR
S₁ SWITCHBOARD FOR M.G.
S₂ SWITCHBOARD FOR FURNACE.
T. TRANSFORMER.
F. FURNACE.

M. G. Appareil moteur-générateur.
S₁. Tableau de distribution pour M. G.
S₂ Tableau de distribution pour le four.
T. Transformateur.
F. Four.

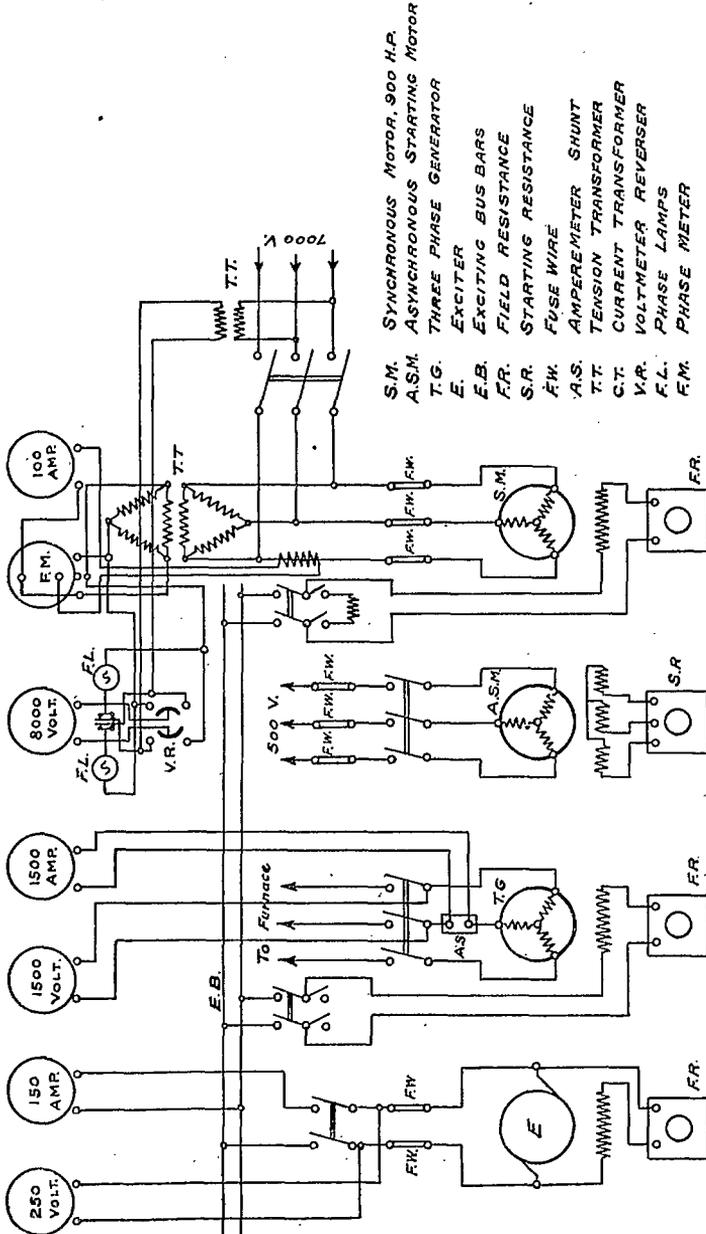
Fig. 6

Plan de l'installation du four à Domnarfvét.

Le matériel d'expérimentation est installé dans une vieille construction contiguë à l'atelier du Bessemer. La figure 6 en fait voir le plan.

Le mécanisme, construit spécialement pour les travaux d'essai, se compose d'un moteur synchrone triphasé, d'environ 900 chevaux, alimenté par un courant à 60 périodes (cycles) de 7,000 volts, provenant de la ligne triphasée de la forge.

- S. M. Moteur Synchroné, 900 chevaux.
- A. S. M. Moteur Asynchrone de départ.
- T. G. Génératrice triphasée.
- E. Excitatrice.
- E. B. Barres excitatrices.
- F. R. Résistance du champ.
- S. R. Résistance au départ.
- F. W. Court circuit.
- A. S. Shunt de l'ampèremètre.
- T. T. Transformateur de tension.
- C. T. Transformateur du courant.
- V. R. Voltmètre commutateur.
- F. L. Lampes de synchronisme.



- S.M. SYNCHRONOUS MOTOR, 900 H.P.
- A.S.M. ASYNCHRONOUS STARTING MOTOR
- T.G. THREE PHASE GENERATOR
- E. EXCITER
- E.B. EXCITING BUS BARS
- F.R. FIELD RESISTANCE
- S.R. STARTING RESISTANCE
- F.W. FUSE WIRE
- A.S. AMPEREMETER SHUNT
- T.T. TENSION TRANSFORMER
- C.T. CURRENT TRANSFORMER
- V.R. VOLTMETER REVERSER
- F.L. PHASE LAMPS
- F.M. PHASE METER

Fig. 7.
Disposition du tableau de distribution.

Ce moteur est relié directement à une génératrice triphasée qui fournit le courant aux transformateurs construits dans le voisinage immédiat du four. Le courant triphasé de la génératrice est de 25 cycles, et son voltage peut s'ajuster par petites variations de 300 à 1,200 volts.

Grâce à cette facilité de réglage, on a pu déterminer le voltage qu'il convient d'employer dans des fours de construction différente et fonctionnant dans diverses conditions. Les champs du moteur synchrone et des génératrices sont excités par un courant de 220 volts, provenant d'une génératrice à courant continu de 20 kw. relié directement au mécanisme. Pour le départ, on se sert d'un moteur synchrone triphasé relié aussi directement, et qui est actionné par un courant transformé à 500 volts. Afin de régler le mécanisme, on dispose d'instruments perfectionnés, tels qu'indiqués dans le tableau de distribution de la figure 7.

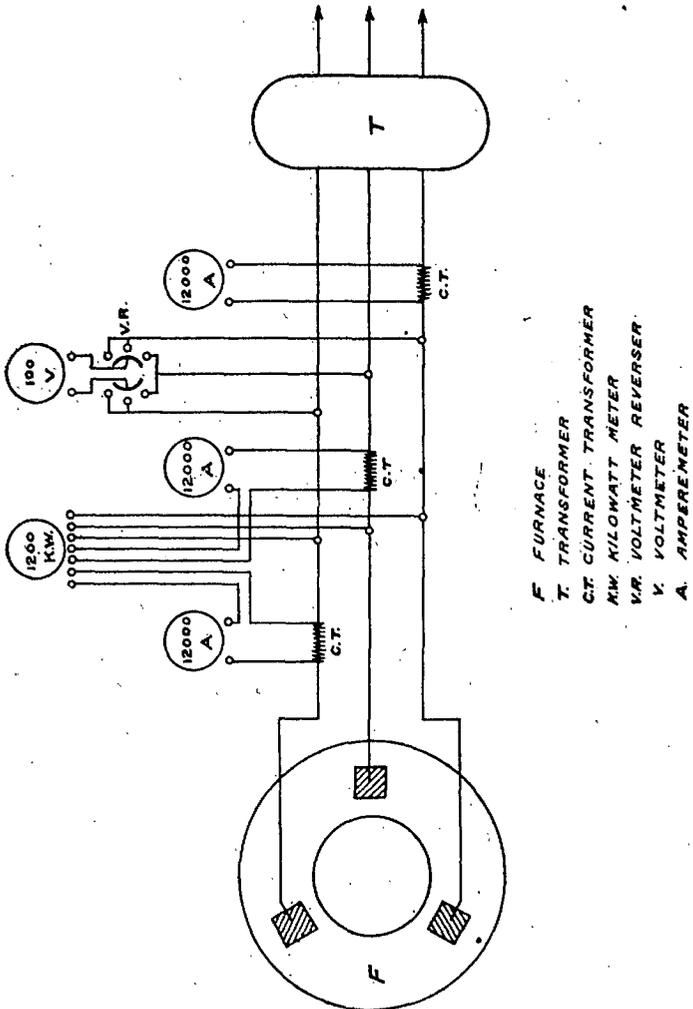


Fig. 8.
Disposition des circuits électriques du four.

Le courant est dirigé du tableau de distribution à travers des barres en cuivre couchées dans des canaux en ciment sous le parquet, aux transformateurs érigés dans le voisinage immédiat du four. La puissance totale de ces transformateurs est de 1,500 K. V. A. avec un coefficient de transformation de 14 : 1. En réglant le voltage de la génératrice, le faible voltage des transformateurs peut être modifié à de courts intervalles de 20 à 80 volts. Les transformateurs sont refroidis par des courants d'air sous pression provenant de deux soufflets électriques érigés tout à côté. Afin de contrôler les opérations, il y a un tableau de distribution convenablement installé à proximité du four. Il est muni des instruments suivants :—

Un wattmètre de précision triphasé pour les phases de différentes amplitudes.

Trois ampèremètres, un pour chaque phase.

Un voltmètre avec commutateur.

Les ampèremètres et le wattmètre sont reliés à la ligne du courant au moyen de transformateurs. Le voltmètre et les prises de courant du wattmètre sont reliés directement aux barres conductrices. La fig. 8 fait voir le diagramme des circuits.

Les roues qui servent à ajuster les électrodes sont placées immédiatement en dessous des instruments, de telle façon que la roue et l'ampèremètre en face l'un de l'autre appartiennent à la même phase.

Expériences avec différents fours.

Les premières expériences de réduction ont été faites dans un four électrique construit d'après certains brevets obtenus par MM. Grönwall, Lindblad, et Stalhane. Ces messieurs, qui sont fondateurs de la compagnie Electrometall, Ludwika, Suède, de même que la Trafikaktiebolaget Grängesberg-Oxelösund et la Stora Kopparbergs Bergslags Aktiebolag, ont contribué à ces expériences.

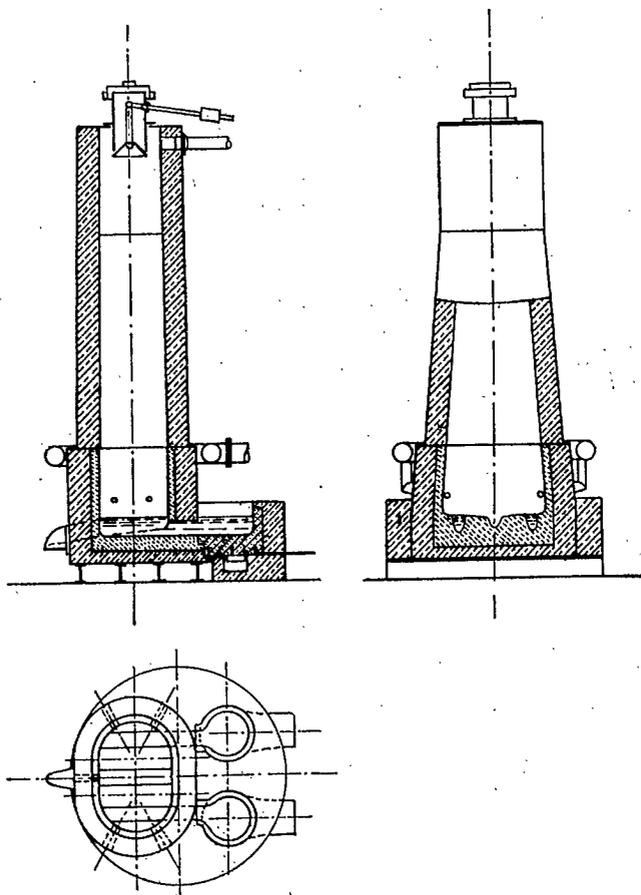


Fig. 9.
Four d'essai No. 1.

Le dessin ci-contre, fig. 9, fait voir la construction du premier four, lequel était un four à cuve avec un foyer à parois de quartz. Il y avait au fond du four, trois canaux, l'un, au milieu, conduisant au trou de coulée, et les deux autres, communiquant, par des ouvertures pratiquées dans la maçonnerie, avec deux puits situés en dehors du four. Ces puits furent remplis de fer et leur fonds consistaient en blocs de graphite fixés sur des

plaques de cuivre reliées avec le courant. Le four fut mis en feu au moyen d'une soufflerie, ainsi qu'un haut-fourneau ordinaire. La soufflerie fut ensuite arrêtée, et le courant électrique appliqué aussitôt qu'il se fut accumulé assez de fer fondu dans le foyer.

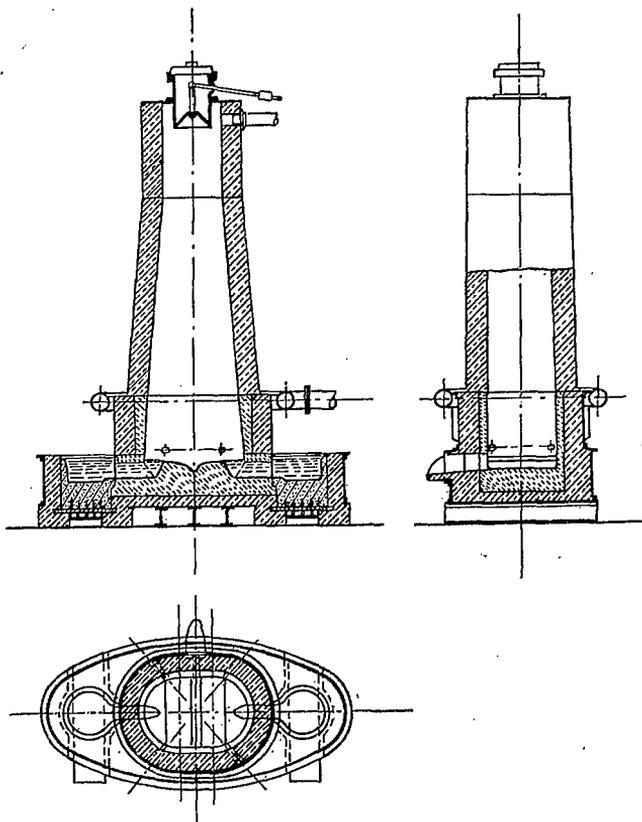


Fig. 10
Four d'essai No. 2.

Le courant électrique pénétrait dans le four par le fer de l'un des canaux de côté, passait à travers la charge, se dirigeant jusqu'à l'autre extrémité, à travers les matières contenues dans le canal du côté opposé. Le but poursuivi était que la charge, par sa résistance au courant, s'échauffât et se fondît. Ce four pouvait suffire à de petites charges, mais il fut trouvé impossible de lui adapter un fond de garnissage durable, ce qui était dû en partie, au quartz, lequel, au degré de température élevé qu'il subissait, devenait un conducteur du courant électrique.

C'est pour cette raison que le four fut reconstruit et qu'on lui donna la forme indiquée par la fig. 10. On a conservé ici le même principe que dans le premier four; avec cette différence essentielle, que, pour la sole du four, on se servit de brique de magnésie. La durée en fut un peu

plus longue, mais le même inconvénient se produisit, la brique de magnésie devenant aussi un assez bon conducteur du courant électrique, sous l'effet de la haute température subie.

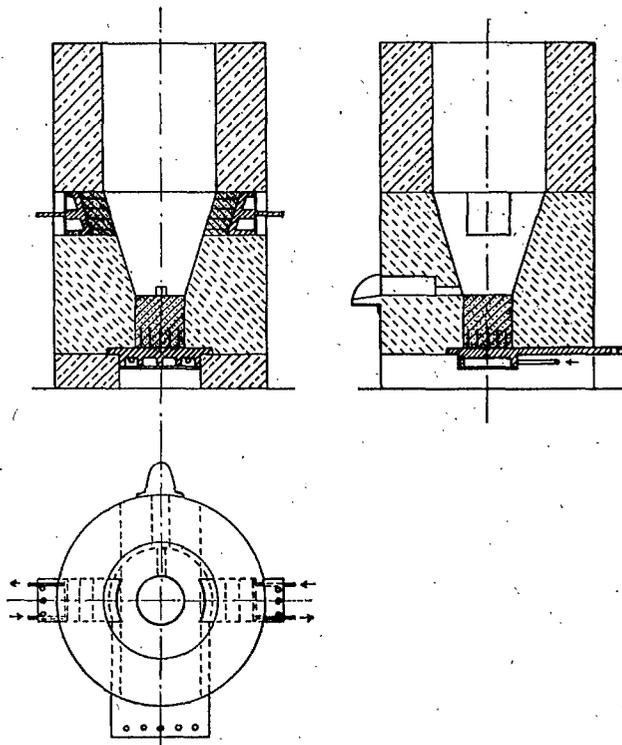


Fig. 11.
Four d'essai No. 3.

Il était donc évident que l'on ne pouvait pas s'attendre à résoudre le problème par l'introduction d'un courant électrique à travers la fonte dans la sole du foyer. Les expériences furent poursuivies avec un autre four indiqué dans la figure 11. C'était un petit four à cuve, muni de trois électrodes de graphite, dont l'un disposé dans la sole du four, et les deux autres se faisant vis-à-vis dans la cuve.

Les deux électrodes supérieures, s'étant consumées en relativement peu de temps, furent remplacées par des électrodes ordinaires, en carbone, que l'on pouvait régler, et entourées de doubles parois à circulation d'eau. La disposition était telle que l'on pouvait diriger le courant soit à travers le four entre les deux électrodes supérieures, ou bien depuis celles-ci jusqu'à l'électrode de la sole. Ce four a résisté plus longtemps que le précédent, mais, malheureusement, la maçonnerie avoisinant les électrodes a été dangereusement usée.

Les connaissances acquises par suite des expériences précédentes ont donné lieu à la construction du four dont on peut voir le premier modèle

à la figure 12. Les expériences préliminaires que l'on fit avec ce four furent encourageantes, et donnèrent lieu à la construction du four électrique représenté à la figure 13.

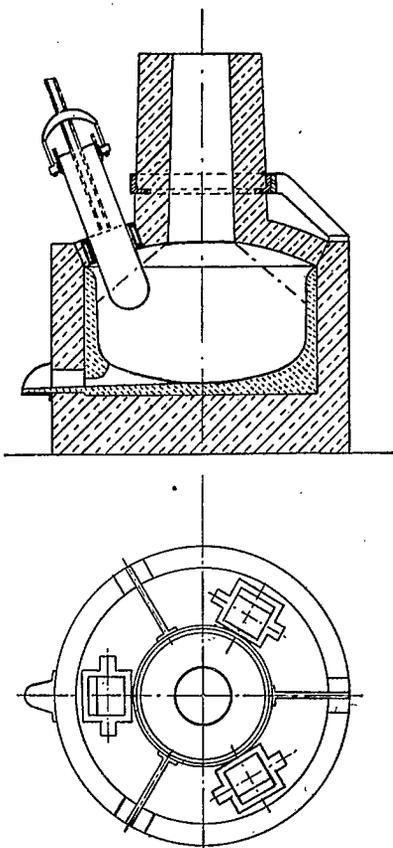


Fig. 12.
Four d'essai No. 4.

C'est avec ce four électrique qu'on a obtenu les résultats suivants.

Le four définitif.

Ce four (voir fig. 13) consiste en une partie inférieure: la chambre de fusion; et une supérieure: la cuve. La chambre de fusion est faite en forme de creuset, d'une hauteur de 150 cm., avec un diamètre de 225 cm., est recouverte d'une voûte, et ses parois sont en brique de magnésite. Lorsque la charge tombe du haut de la cuve à travers l'ouverture de la voûte jusque dans la chambre de fusion, il reste un espace libre entre la charge et la maçonnerie. Les expériences ont démontré que l'angle de chute de la charge est de 35° à 40° lorsque la matière est broyée à la grosseur normale. Dans la figure 13, l'angle de chute est indiqué par une ligne pointillée. Les trois électrodes pénètrent dans le four par des endroits de la voûte qui ne sont pas en contact avec la charge. L'ex-

périence acquise par les essais avec les fours antérieurs, démontre que cette disposition est une partie très importante de la construction. Il se forme, entre les extrémités des électrodes, une zone de fusion à travers

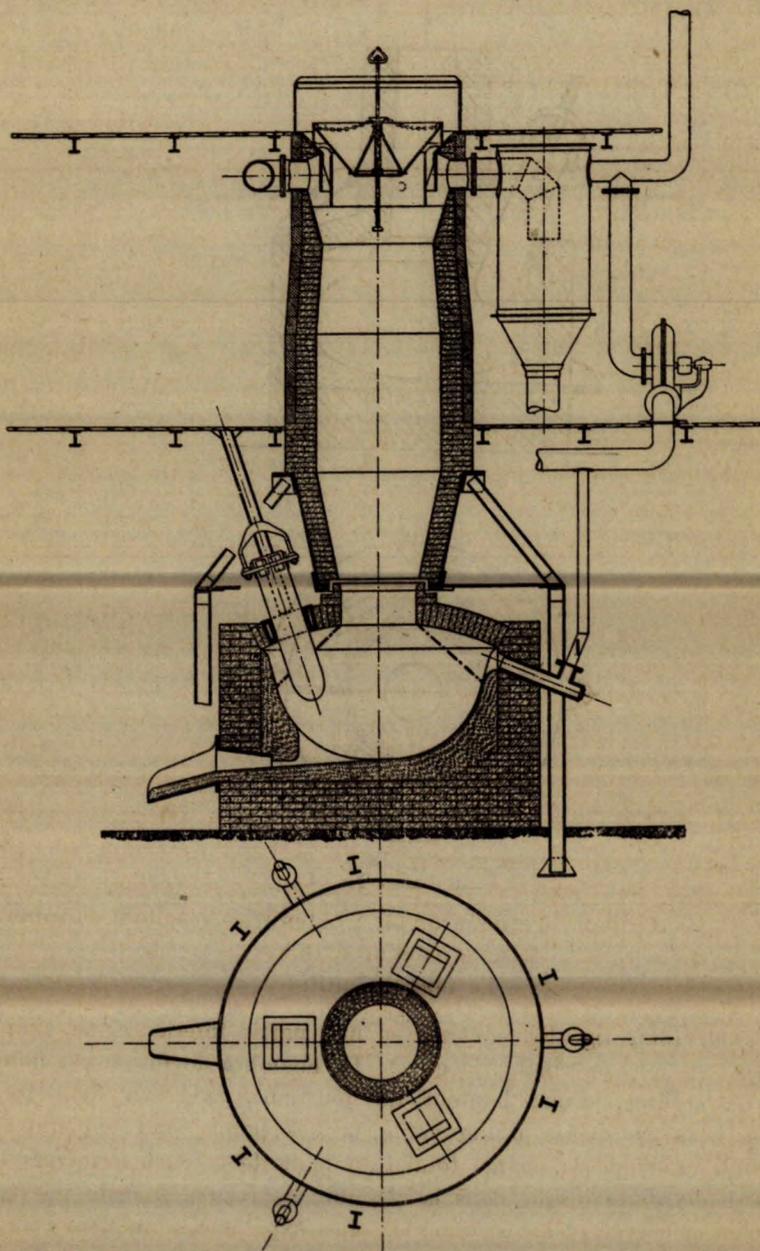


Fig. 13.
Modèle final du four électrique à cuve.

laquelle doit passer la charge. Afin de protéger la maçonnerie de la chambre de fusion et augmenter sa résistance, on a introduit trois tuyères immé-

diatement en dessous de la voûte. On fait passer à travers ces tuyères, au moyen d'un éventail aspirant, un gaz relativement frais, de la partie supérieure de la cuve jusque dans l'espace vide entre la voûte et la charge.

Le gaz absorbe la chaleur de la surface libre de la charge et de la voûte, abaissant ainsi la température de la voûte et des parois exposées.

Cet abaissement de température ne donne lieu cependant à aucune perte de chaleur, attendu que la chaleur absorbée par le gaz se communique, en montant à travers la cuve, aux parties les moins chaudes de la charge. Les tuyères sont munies d'ouvertures à travers lesquelles on peut vérifier la température de la voûte. Il est possible par ce moyen de régler la quantité de gaz nécessaire. Les supports des électrodes consistent en une charpente d'acier solide soutenant les coussinets au moyen desquels les plaques de cuivre conduisant le courant sont pressées contre les électrodes. Chaque électrode se compose de deux charbons de 33 cm. carrés, placés étroitement l'un contre l'autre¹. Des cables de cuivre d'une longueur suffisante pour permettre de régler les électrodes sont assemblés avec les plaques de cuivre et les barres de cuivre de la voûte.

Les électrodes sont suspendues par deux cables en acier qui sont isolés des supports et assemblés par un système de manivelles qui servent à régler les électrodes. Les parties des électrodes qui sont en dehors du four sont protégées contre l'action oxydante de l'atmosphère par une couverture en amiante et en tôle. Les ouvertures dans la voûte à travers lesquelles les électrodes pénètrent dans la chambre de fusion, sont munies de boîtes à étoupe à circulation d'eau et il y a des dispositifs spéciaux non indiqués dans la figure 13, pour empêcher le gaz de s'échapper de la chambre de fusion autour des électrodes.

La cuve, dont la hauteur est de 5.2 mètres au-dessus de la chambre de fusion, avec un diamètre maximum de 1.525 m., est maintenu par une charpente en fer reposant sur six piliers en fonte disposés autour de la chambre de fusion. Grâce à ce mode de construction, on peut réparer ou remettre en place, sans déranger la cuve, les parties du four qui ont à subir le plus d'usure, c'est-à-dire la voûte et la chambre de fusion.

Mise en marche du four.

Le four électrique fut mis en marche le 7 mai 1909, et les travaux de réduction se poursuivirent, sauf quelques petites interruptions, jusqu'au 30 juillet, alors qu'ils furent interrompus pour certaines raisons, malgré que le four fut encore en bon état.

Le four fut mis en marche comme un haut-fourneau ordinaire. La chambre de fusion fut chauffée au bois, la cloche d'alimentation ayant été soulevée, et les électrodes retirées. On ajouta ensuite quelques charges de charbon de bois et de coke, les électrodes furent remises en place,

¹ Dans la fig. 13, les électrodes sont indiquées comme ne consistant qu'en un seul charbon, mais lors de la dernière expérience, on s'est servi de deux carbones serrés l'un contre l'autre.

le courant électrique appliqué, et la cuve remplie de minerai, de chaux, et de charbon de bois, les matières de la charge ayant été bien mélangées afin d'en faire une colonne plus poreuse. La quantité de charbon de bois fut graduellement diminuée, et, à la fin de la première semaine, la composition de la charge était de 100 kilos de minerai, 3 kilos de chaux calcinée et 24 kilos de coke et plus tard, de 100 kilos de minerai, 4 kilos de chaux calcinée et 22-24 kilos de coke. Avec le coke comme agent réducteur, le plus grand nombre de charges réduites par 24 heures fut 62, la capacité de la cuve étant de 72 charges. Avec le coke, le plus grand nombre de charges fut de 80 par 24 heures, et la capacité de la cuve 41 charges. La quantité de charbon de bois nécessaire fut de 21 à 28 kilos par 100 kilos de minerai. Le charbon de bois fut mesuré au volume, et à cause de sa grande humidité, un hectolitre fut considéré comme égal à 16 kilos.

Au commencement de la marche, lorsque la sole du four était encore froide, le courant électrique se maintint principalement dans la voûte, l'échauffant fortement et en fondant tout de suite une partie. Cependant, la circulation du gaz fut bientôt mise en train, et le refroidissement par le gaz aspiré de la partie supérieure de la cuve, se fit très bien sentir, et la température de la voûte s'abaissa, puis la chaleur descendit au fond. La tendance du courant électrique était naturellement de passer là où il y avait moins de résistance, c'est-à-dire, à travers les couches de la charge non soumises au refroidissement.

Une fois bien en train, le four pouvait marcher plusieurs jours sans qu'on fasse circuler de gaz, la chaleur ne montrant pas de tendance à monter vers la voûte.

Le charbon de bois contenu dans la charge semblait contribuer à garder la chaleur près du fond.

Il est arrivé, en plusieurs occasions, qu'on n'a pas obtenu une quantité de fer proportionnée à la teneur contenue dans la charge. Ainsi, dans le cours d'une semaine, 48 tonnes de minerai furent chargées dans le four, mais on n'obtint que 17 tonnes de fonte, ce qui correspond à 27 tonnes de minerai. La semaine suivante 22.6 tonnes furent chargées, et 23 tonnes de fonte obtenues.

Il semble que la seule explication de ceci soit qu'il a dû se déposer du fer plus ou moins réduit sur le fond et les parois du four. Il est arrivé aussi durant la marche, qu'il s'est accumulé du carbone dans la chambre de fusion, parce que l'on avait ajouté trop de charbon de bois ou de coke. Il en est résulté quelque dérangement, auquel on a remédié bientôt en augmentant la quantité de minerai dans la charge. Il est assez facile cependant de prévenir un dérangement de cette nature, puisque l'on peut constater l'excès de carbone dans le laitier; dans ce cas, il se forme du carbure de calcium et une forte odeur d'acétylène se dégage.

Quelquefois les matières dans la cuve semblaient avoir une tendance à demeurer suspendues, mais cet inconvénient disparaissait lorsqu'on avait

le soin de charger le four de façon à ce que 80 pour cent du minerai dans la charge, se trouve placé le long des parois. Il a été prouvé que l'on pouvait charger le four électrique entièrement avec des fins, pourvu que tout le minerai fût placé le long des parois, et la hauteur de la colonne de charge, maintenue de façon à ce que sa surface supérieure se trouve un peu plus bas que le cylindre à gaz, pour empêcher ainsi que les fins ne soient attirés par succion dans les tuyaux à gaz.

Il n'est donc pas nécessaire de mettre les fins en briquettes, et par conséquent, en se servant du four électrique, on économise les frais du briquetage.

Quelques petits accidents, pendant la marche, ont influé un peu sur les résultats. A la fin de la première semaine, par exemple, l'une des boîtes à étoupe refroidies par circulation d'eau se mit à fuir, de sorte que le four a dû fonctionner avec deux électrodes pendant quelque temps. A cause d'un défaut dans le mécanisme électrique, il a fallu, en deux occasions, accoupler les transformateurs au circuit de haute pression, et les faire marcher à 60 cycles au lieu de 25, etc.

Il ne s'est pas manifesté de variation plus importante dans le courant, pendant la marche. Même lorsque la fonte était coulée, les aiguilles des instruments ne bougeaient pas. La plus haute intensité de courant permise pour les électrodes fut de 9,000 ampères. Le déplacement de phase avec le courant de 25 cycles correspondait à $\cos. \phi = 0.8-0.9$; et avec le courant de 60 cycles, à $\cos. \phi = 0.7$.

La quantité d'énergie électrique qui peut être affectée au four dépend évidemment de la résistance intérieure du four, c'est-à-dire que plus il y a de résistance, plus on pourra fournir d'énergie électrique sans que l'intensité du courant devienne trop forte. Au moyen d'un courant de 25 cycles, on a pu activer le four avec une pression de 80 volts; et en se servant d'un courant à 60 cycles, on a pu avoir 65 volts, tout au plus. La tension, dans le four dépend principalement de la nature du combustible employé et de la teneur de combustible et de minerai dans la charge.

C'est ce que l'on peut voir dans le tableau I, dont les chiffres proviennent du journal des opérations.

TABLEAU I

Charge.	Voltage	Courant par phase
	Voltes	Ampères
Coke seul (avec excès).....	34	9.600
(sans excès).....	36	8.800
Charbon de bois seul (en quantité insuffisante).....	60	6.300
" (suffisante).....	54	7.600
" (plus que suffisante).....	48	7.600
Coke et charbon de bois (plus que suffisante).....	35	9.200
" (suffisante).....	48	7.600

On n'a pu remarquer de variation dans la résistance du four que lorsque l'on gardait une grande quantité de fer dans le foyer, et même dans ce cas; il n'y en avait que très peu. Le four était facile à conduire, sa marche régulière, et il se faisait une coulée environ toutes les 6 heures.

On a essayé 7 charges différentes, et l'on trouvera aux pages suivantes un compte rendu des résultats obtenus. Le four a été chargé d'abord avec une hématite spéculaire facilement réductible, contenant beaucoup de fer, mais ayant peu de valeur commerciale à cause de sa haute teneur en phosphore; le but principal était de trouver un modèle de four pratique. Comme conséquence de ceci, il devint impossible, par la suite, de produire une fonte de premier ordre, même avec les meilleurs minerais, le fer étant toujours contaminé parce qu'il était resté dans le four du minerai phosphoreux.

TABLEAU II.

Analyses des divers minerais employés dans les charges.

Provenance du minerai.	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O+CO ₂	Fe	P	S	Charge No.
Grangesberg—															
Skarningsmalm	13.75	71.65	.....	0.12	0.74	6.80	0.35	.....	3.02	4.19	.....	60.11	1.83	Trace	1 et 3
Langgrufvan—															
Briquettes	5.89	76.36	.....	0.24	2.66	3.28	.....	.....	11.52	0.09	.....	57.70	0.004	"	2
Concentré Magrétique.....	80.89	.....	.....	0.13	2.80	2.96	2.14	.....	11.30	0.09	.....	58.57	0.004	"	6
Johannesberg.....	58.58	.....	6.78	5.58	5.61	4.98	0.91	.....	5.56	0.007	11.72	47.69	0.003	0.13	6
Skottgrufvan.....	66.37	.....	2.16	0.33	3.19	12.18	2.46	.....	4.50	0.037	8.44	49.73	0.016	0.00	6
Tuollavaara	92.46	1.99	.....	Trace	0.03	1.28	Trace	0.90	1.80	0.007	.....	68.31	0.003	0.09	4 et 5
Taberg	74.48	.....	.....	0.42	4.96	4.90	.....	.....	15.30	0.014	.....	53.93	0.006	0.00	5
Finnmossen	79.64	.....	.....	0.29	3.78	3.30	4.31	.....	8.55	0.023	.....	57.66	0.010	0.00	5
Nordmark	68.58	.....	.....	0.60	5.50	6.27	1.95	.....	16.90	0.023	.....	49.61	0.010	0.00	5
Brésil—															
Minerai spéculaire .....	.....	91.72	5.78	Trace	0.25	0.20	Trace	.....	0.80	0.126	1.0	68.8	0.055	0.03	7

Composition :—

de la chaux calcinée		du Coke	du Charbon de Bois	
Fe ₂ O ₃	0.5%	C	85%	C 65-80%
MgO	2. %	H ₂ O	4%	H ₂ O 12-20%
CaO	96.5%	O+N	1%	Cendre 3%
Al ₂ O ₃	0.2%	Cendre	10%	
SiO ₂	0.2%	S	0.5-0.7%	

Composition des sept charges différentes.

No. 1. — 826 Charges.

Minerai de Grängesberg	kilos	100
Chaux calcinée	"	4—5
Coke	"	10—26
Charbon de bois	"	10—0

No. 2. — 574 Charges.

Minerai de Långgrufvan	kilos	100
Chaux calcinée	"	11—18
Coke	"	0—21
Charbon de bois	"	20—0

No. 3. — 956 Charges.

Minerai de Grängesberg	kilos	100
Chaux calcinée	"	2—4
Coke	"	8—13
Charbon de bois	"	13—17

No. 4. — 599 Charges.

Minerai de Tuollavaara	kilos	100
Chaux calcinée	"	4
Coke	"	7—11
Charbon de bois	"	17—11

No. 5. — 623 Charges.

Minerai du Tuollavaara	kilos	20
Minerai de Finmossen, Talberg et Nord- marken en parties égales	"	80
Chaux (non convenablement calcinée)	"	5
Coke	"	4—0
Charbon de bois	"	18—26

No 6—...Charges

Nombre de Charges	Minerai de Lang-grufvan	Minerai de Skott-grufvan.	Minerai de Johannisbergs-grufvan	Chaux	Charbon de bois
	Kilos	Kilos.	Kilos.	Kilos.	Kilos.
97 Charges composées de	50	20	30	6	21
13 " "	50	20	30	.....	21
168 " "	35	15	20	.....	16
160 " "	45	10	15	2	16
202 " "	55	10	10	2	16
81 " "	60	10	5	3	16
96 " "	75	.....	.....	4	16

No. 7. — 362 Charges.

Minerai du Brésil	kilos 64—50
Chaux calcinée	" 2—0
Charbon de bois	" 16

Les résultats du traitement des sept charges différentes se voient au tableau III. La quantité totale de fer obtenue comparée à la teneur en fer des minerais de ces charges est un peu forte, ce qui peut être dû au manque de soin dans le pesage.

Consommation de carbone.

Comme il ne peut pas pénétrer d'air dans le four, lorsqu'il est bien construit et bien dirigé, la consommation du charbon de bois ou du coke pour les divers minerais, dépend en partie de la teneur en carbone du combustible et en partie de la quantité de ce carbone se transformant en CO₂. Donc, la consommation réelle de carbone, dans les conditions normales, est la même qu'en théorie; cela se voit très bien par les résultats obtenus (voir le tableau IV.)

TABLEAU IV.

Charge No.	Consommation de Carbone, chimiquement pur par tonne de fonte.	D'après les tableaux I et II, cette consommation de carbone correspond à une teneur de CO ₂ dans les gaz équivalente à	Teneur de CO ₂ dans le gaz déterminé par l'analyse.	Composition du minéral dans la charge.	Teneur en fer du minéral et de la chaux.
	Kilos.	Pour cent	Pour cent		Pour cent
3	252	43	39—44.7	Fe ₂ O ₃	58.8
4	254	25	24—28	Fe ₃ O ₄	65.6
5	284	11.5	8—23.8	Fe ₃ O ₄	54.5

Dans les Nos. 3 et 4, la consommation réelle s'accorde très bien avec la théorique. Dans le No. 5, les chiffres en question s'accordent suffisamment, considérant que le four a fonctionné tantôt avec et tantôt sans circulation de gaz. La consommation de carbone est en raison directe de la teneur en CO₂ du gaz.

Si m représente le pourcentage volumétrique de CO₂ dans le gaz, et k le pourcentage de carbone dans le fer, alors, la consommation de carbone c par tonne de fonte est, en kilos, comme suit :—

$$\text{Si le Fe se présente comme Fe}_2\text{O}_3, c = \frac{321.43(100 - k) + 10k}{100 + m}$$

$$\text{Si le Fe se présente comme Fe}_3\text{O}_4, c = \frac{285.7(100 - k) + 10k}{100 + m}$$

La formule s'applique lorsque le carbone est chimiquement pur et que le gaz ne contient que du CO et du CO₂. Cela se voit très bien dans le tableau V où sont données des analyses des gaz durant la marche. Les chiffres s'appliquent aux gaz produits à moins d'indications contraires.

TABLEAU III
 Comparaison des résultats obtenus avec les diverses charges.

No. de la charge	MOYENNE DE POUVOIR UTILISÉ		MATIÈRES CHARGÉES						Energie électrique Kilowatt heures	Quantité de fonte produite Kgs.	CONSUMMATION D'ÉLECTRODES		POUR CHAQUE TONNE DE FONTE.						Consommation d'électrodes par combustion Kgs.	Consommation totale d'électrodes Kgs.	DÉPENSE DE TEMPS.			FONTE PRODUITE		Teneur en fer du minerai p. c.	Teneur en fer du minerai et de la chaux p. c.
	Chevaux-vapeur.	Kilowatts.	Minerai Kgs.	Chaux Kgs.	Minerai et chaux Kgs.	Coke Kgs.	Charbon de bois Kgs.	Coke et Charbon de bois Kgs.			par combustion Kgs.	Consommation totale Kgs.	Coke Kgs.	Charbon de bois Kgs.	Coke et Charbon de bois Kgs.	Quantité calculée de carbone chimiquement pur. Kgs.	Energie électrique employée.				Nombre d'heures	Proportion des heures durant lesquelles le four		Par cheval an (365 jours) Tonnes.	Par Kilo-watt an Tonnes.		
																	Cheval an	Kilowatt heures				a été en opération	a été inactif				
																Kgs.	Kgs.										
1	582	428	82600	4034	86634	18672	1468	20140	187467	51425	560	3780	363·9	28·5	392·4	331	0·565	3645	10·9	73·5	475	92·1	7·9	1·77	2·40	62·25	59·35
2	585	431	57400	9934	67334	5446	6925	12371	116591	35380	915	2160	153·9	192·9	346·8	274	0·511	3295	25·9	60·9	309·5	87·4	12·6	1·96	2·66	61·10	52·50
3	653	481	95900	2202	98102	9746	9618	19364	198935	63874	90	710	152·3	150·4	302·7	252	0·483	3114	1·4	11·1	426·5	97·0	3·0	2·07	2·81	66·65	65·20
4	745	548	59900	2396	62296	5906	7891	13797	105485	42660	300	540	136·1	185·0	321·1	254	0·383	2473	7·0	12·7	204	94·2	5·8	2·61	3·55	71·20	68·45
5	800	589	62300	3115	65415	1564	12578	14142	123130	37940	305	540	41·2	331·5	372·7	284	0·505	3245	8·1	14·3	216	96·8	3·2	1·98	2·69	60·90	58·00
6	812	598	62385	1933	64318	.....	13662	13662	115770	34728	246	674	.....	392·2	392·2	294	0·517	3334	6·9	19·4	198	98·2	1·8	1·93	2·62	55·70	54·00
7	808	595	21400	322	21722	.....	5792	5292	44245	15300	.....	.....	.....	377·9	377·9	283	0·448	3892	.....	.....	74·5	100·0	0·0	2·23	3·03	71·40	70·43
1-7	674	496	441885	23936	465821	41334	57894	99228	891623	280307	2410	8404	147·6	206·5	354·1	280	0·492	3181	8·9	30·0	1,903·5	94·1	5·9	2·03	2·76	63·50	60·02

*En calculant la consommation de carbone chimiquement pur, on admet que le coke contient 85 pour cent et le charbon de bois 75 pour cent de C.

TABLEAU V.

Charge	Date.	Heure.	Composition du gaz Pourcentage volumétrique				Température du gaz, (1) degrés cen- tigrade.	
			CO ₂	CO	CH ₄	H		
No.								
3	8 juin.	7 a. m.	14.5	.....	.....	.....	75	La circulation du gaz, interrompue pour quelques jours est remise en marche et maintenue invariable.
	8 "	11 a. m.	23.8	.....	.....	.....	.....
	8 "	3 p. m.	27.6	52.0	.....	.....	.....
	8 "	5 p. m.	23.5	.....	.....	.....	75	
	9 "	10 a. m.	23.6	.....	.....	.....	.....
	10 "	midi	39.0	40.6	.....	.....	300	Diminution de la circulation de gaz.
	11 "	11 a. m.	39.2	.....	.....	.....	320	Nouvelle " " " "
	12 "	11 a. m.	44.7	39.4	0.6	15.3	250	Diminution réitérée de la circulation de gaz.
	15 "	9 a. m.	32.2	.....	.....	.....	150	Augmentation de la circulation de gaz, laquelle est ensuite maintenue invariable.
	15 "	11 a. m.	38.3	.....	.....	.....	.....
	15 "	4 p. m.	41.0	46.0	.....	12.0	.....
	16 "	10 a. m.	39.0	46.0	.....	.....	220	
	16 "	10 a. m.	33.6	56.3	.....	.....	500	Echantillon prélevé dans la partie inférieure de la cuve.
5	6 juillet	10 a. m.	22.0	.....	.....	.....	350	Interruption de la circul. de gaz.
	7 "	9 a. m.	11.0	.....	.....	.....	90	" " " "
	8 "	9 a. m.	8.0	.....	.....	.....	135	" " " "
	8 "	10 a. m.	8.0	.....	.....	.....	260	Echantillon prélevé de la partie inférieure de la cheminée.
	9 "	9 a. m.	17.2	.....	.....	.....	220	La circulation de gaz est mise en marche et maintenue invariable.
	9 "	3 p. m.	17.6	.....	.....	.....	210	
	10 "	8 a. m.	19.5	.....	.....	.....	275	
	10 "	11.30 a. m.	21.0	.....	.....	.....	215	

Les chiffres de ce tableau sont explicatifs. On y constate que dans la charge No. 3, la teneur en CO₂ du gaz augmente d'un pourcentage variant de 14.5 à 39 pour cent, alors que la température du gaz augmente depuis 75° jusqu'à 220°. Le minerai chargé se composait de Fe₂O₃.

En ce qui concerne la charge No. 5, laquelle était une magnétite d'une teneur relativement basse, on voit par les chiffres que la teneur en CO₂ a diminué jusqu'à 8 pour cent (le même pourcentage que dans la partie inférieure de la cuve), lorsqu'on a interrompu la circulation du gaz, mais qu'elle a augmenté graduellement jusqu'à 21 pour cent, aussitôt que la circulation du gaz a été rétablie, la température du gaz qui se dégage étant montée à 215°.

D'après ces résultats, il était évident aussi que, dans chaque cas, une certaine rapidité de circulation était préférable, et que une accélération prolongée n'occasionnait qu'une augmentation dans la température des

¹ La température dans la buse du gaz a été déterminée au moyen d'un thermomètre au mercure, et dans la partie inférieure de la cuve par un pyromètre Le Chatelier.

gaz des conduites alors que l'on constatait bientôt dans le gaz une diminution de la teneur en CO₂.

Il faudra déterminer par expérience, quelle vitesse de circulation sera préférable, mais, on peut constater que cela dépend jusqu'à un certain point du volume de la cuve. Il n'a pas été établi de déterminations certaines quant à la quantité de gaz à faire circuler, mais on peut l'estimer à environ quatre ou cinq fois autant qu'il se produit de gaz dans le four par unité de temps.

La haute teneur en hydrogène dans le gaz est à remarquer. Il en est sûrement une partie qui provient du charbon de bois, mais il est probable qu'il dérive principalement de l'humidité du combustible. A cause de la haute température, il se forme de l'hydrogène lorsque le gaz humide est insufflé dans le four.

Consommation d'électrodes.

La consommation d'électrodes est une question de haute importance dans l'estimation des avantages économiques du four électrique. Pour diverses raisons, elle n'est pas normale en ce qui concerne les charges Nos. 1, 2 et 3, et il ne faut pas en tenir compte. Quant aux autres charges, les résultats sont donnés dans le tableau VI.

TABLEAU VI

Charge No.	Combustion d'électrodes.	Consommation d'électrodes.
	KGS. PAR TONNE DE FONTE.	
3	1.4	11.1
4	7.0	12.7
5	8.1	14.3
6	6.9	19.4
3-6	5.2	13.8

Les électrodes employées étaient en charbon de cornue et de fabrication suédoise, la charge permise étant de quatre ampères par centimètre carré. En ce qui concerne la combustion d'électrodes, certaines conditions semblent indiquer que le chiffre moyen inscrit plus haut pourrait être réduit de 40 pour cent. En se servant d'électrodes de meilleure qualité, on obtiendrait sans doute de meilleurs résultats. Il est certain aussi qu'avec un outillage mieux conditionné, on pourrait sensiblement réduire l'usure des électrodes. En les réunissant convenablement, il devrait être possible d'en rendre la consommation équivalente à la combustion. Pendant qu'on a fait ces expériences, on n'a pu se servir que de la moitié de la longueur des électrodes.

Rendement du four.

Il faut attacher une importance toute spéciale au rendement du four, laquelle est le coefficient du travail utile produit par le four à la somme d'énergie électrique dépensée.

L'énergie dépensée en travail utile dans le four est comme suit:—

- (1) Pour produire la chaleur nécessaire à la réduction.
- (2) Pour fondre et surchauffer la fonte et le laitier.
- (3) Pour séparer de la charge de H₂O et le CO₂.
- (4) Pour chauffer les gaz.

Le total de cette énergie électrique, moins la chaleur développée par la combustion du carbone avec l'oxygène du minerai, est exactement ce qui, théoriquement, doit se dépenser dans le four et on l'a dénommé l'énergie électrique utile.

A part cela, le courant électrique doit pouvoir subir:—

- (1) La perte de chaleur occasionnée par les boîtes à étoupe autour des électrodes.
- (2) La perte de chaleur dans les conducteurs électriques et les contacts.
- (3) La perte de chaleur causée par le rayonnement dans la maçonnerie.

En comparant les rendements obtenus avec les différentes charges, on ne devra pas tenir compte des résultats quant aux charges Nos 1, 2 et 7. Pour les deux premières le fonctionnement du four n'était pas normal, et pour le No 7 la marche a été trop courte.

TABLEAU VII

No. de la charge.	Consommation de carbone chimiquement pur.	Quantité d'énergie nécessaire : calculée d'après le tableau, à l'aide de la consommation de carbone	Quantité réelle d'énergie nécessaire.	Rendement électrique.	KILOWATTS			Pourcentage de fer
					Charge totale moyenne.	Energie électrique utile	Perte d'énergie électrique	
	Kgs.	Kw. heures par tonne	Kw. heures par tonne					
3	252	1470	3114	0·47	481	230	251	58·8
4	254	1438	2473	0·58	548	318	230	65·6
5	284	1741	3245	0·54	589	318	271	54·5
6	294	1870	3334	0·56	598	335	263	51·5

Le plus fort rendement obtenu durant ces expériences fut de 58 pour cent. Il est démontré par le tableau VII que les pertes varient entre 230 et 271 kilowatts; elles deviennent plus fortes vers la fin qu'au commence-

ment de la marche. D'après les observations qu'on a faites, les pertes du tableau VII se répartissent ainsi:—

Pertes par la circulation d'eau	118—125 kw.
Pertes dans le conducteur électrique et les contacts	40 “
Pertes causées par le rayonnement	81—110 “
	<hr/>
	239—275 “

Les pertes réelles et les pertes calculées semblent s'accorder d'une façon remarquable. En construisant un four plus grand, par exemple, de 2,500 chevaux, et en s'occupant tout spécialement des facteurs qui influent sur la perte de la chaleur, il semble praticable de construire un four d'un rendement de 80 pour cent. Avec un tel four, il serait sans doute possible d'atteindre une production d'au delà de 3 tonnes par cheval-an, pourvu que l'on se serve de minerais plus riches.

Durée du four.

D'après les expériences faites, il est évidemment difficile d'estimer ce que coûteront les réparations au four. Ce four, cependant, a fonctionné continuellement pendant 85 jours, et ce fait devra fournir une réponse suffisante aux questions qui peuvent raisonnablement se poser quant à sa durée. En démolissant le four, on l'a trouvé dans des conditions telles que les opérations auraient pu se poursuivre encore quelque temps, si, à cause de diverses circonstances, il n'eût pas été nécessaire de le démolir.

La partie la plus faible du four est la voûte au-dessus de la chambre de fusion, mais elle pourrait être refroidie par circulation de gaz, ce qui préviendrait d'une façon satisfaisante la fusion de la maçonnerie. La solé du foyer et les parois de la cuve devraient résister autant que dans un haut fourneau ordinaire. Quelquefois la maçonnerie avoisinant les électrodes est devenue rouge de chaleur, mais il doit être facile de refroidir ces endroits par circulation de gaz, et d'ailleurs, rien n'empêche de réparer ces parties durant la marche. Par conséquent la durée du four devrait être très satisfaisante pourvu que l'on fasse les améliorations nécessaires et que la maçonnerie soit solide.

Nature du fer et du laitier.

La production de différentes qualités de fonte semble bien plus possible au moyen du four électrique, qu'avec tout autre procédé, puisque, en variant la tension du courant électrique, il est très facile d'augmenter ou diminuer la température du four. On a pu réussir à produire du fer contenant moins de un pour cent de carbone; le laitier cependant, contenait une quantité de fer considérable. D'une façon générale, la teneur en carbone variait depuis 2 jusqu'à 3 pour cent.

Il est facile d'augmenter la teneur en silicium de la fonte dans le four électrique. D'après l'une des analyses, il y avait 3.61 pour cent de sili-

cium, mais il est également possible de le maintenir entre 0.3 et 0.5 pour cent. On pourrait supposer que tout le phosphore de la charge pénètre dans le fer; il faut se rappeler cependant qu'un four électrique n'exige qu'environ un tiers du combustible employé dans le haut-fourneau, et que, en produisant du fer au bois de premier ordre, c'est le charbon de bois qui donne au fer sa plus grande teneur en phosphore. Par conséquent, le four électrique devrait produire une qualité de fer à plus basse teneur en phosphore que ce que l'on obtiendrait avec les mêmes matières dans un haut-fourneau.

Le four électrique a pour avantage spécial d'offrir la réelle possibilité de faire disparaître le soufre. Avec une charge contenant 0.5 pour cent de soufre, on a produit de la fonte qui n'en contenait que 0.005 pour cent. Afin de faire disparaître le soufre, il faut, ainsi que dans les autres fourneaux, un laitier basique et une haute température. Il est probable que le carbure de calcium formé par le courant électrique, contribue largement à faire disparaître le soufre.

On verra dans le tableau VIII quelques analyses de fonte provenant de différentes charges.

TABLEAU VIII

Coulée No.	C	Si	Mn	S	P
32	2.10	0.22	0.40	0.030	1.42
43	3.65	1.67	0.30	trace	0.89
44	3.44	1.06	0.29	.....	1.31
45	3.50	1.58	0.26	.....	0.89
118	3.10	1.03	0.18	0.005	.....
175	2.84	0.03	.....	0.040	0.117
179	2.34	0.05	.....	0.035	0.143
183	2.38	0.03	.....	0.065	0.076
187	2.38	0.06	.....	0.045	0.080
191	3.09	0.21	.....	0.010	0.156
195	3.09	0.14	.....	0.020	0.194
199	2.41	0.20	.....	0.020	0.150
202	2.02	0.07	.....	0.045	0.091
206	2.88	0.08	.....	0.080	0.104
210	2.56	0.13	.....	0.050	0.075
214	2.82	0.47	.....	0.020	0.070
222	2.62	0.40	.....	0.025	0.058
226	2.13	0.18	.....	0.030	0.042
231	2.33	0.06	1.07	0.020	0.036
234	2.05	0.19	1.07	0.015	0.044
237	2.81	0.19	1.30	0.020	0.054
245	1.70	3.61	2.09	0.005	0.052
249	2.11	0.20	1.40	0.005	0.057
253	2.86	1.67	1.08	0.005	0.046
257	3.150	0.62	0.72	0.025	0.049
261	2.69	0.17	0.26	0.025	0.020
265	2.90	0.09	0.37	0.015	0.041
273	3.14	0.35	0.29	0.005	0.056
277	3.33	.....	0.66	0.005	0.062
287	2.80	0.08	0.09	.....	0.020

Le tableau IX donne les résultats d'analyses faisant voir les variations de la teneur en fer du laitier.

TABLEAU IX

	Fe	S	SiO ₂
	%	%	%
Laitier cru	6·44	0·55	31·46
Laitier normal	1·33	0·38	33·30
Laitier de décrassage	0·61	0 70	30·11

TABLEAU X

Trou de coulée No.	FeO	MnO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
245	0·23	0·48	17·48	38·10	7·77	35·90	0·016	0·06	0·18
257	3·19	2·68	15·43	31·66	6·51	41·10	0·04	0·05	2·48

On voit dans le tableau X des analyses de laitier provenant des trous de coulée Nos 245 et 247.

Conclusion.

Si l'on en juge par les résultats obtenus au cours des expériences faites à Domnarfvét, le problème de la fabrication de la fonte avec du minerai de fer au moyen du four électrique, semble résolu tant au point de vue technique qu'au point de vue commercial, mais, afin de s'en assurer plus complètement, il faudra organiser de nouvelles expériences sur une plus grande échelle. Il faut, comme condition nécessaire pour la réduction avantageuse du minerai de fer au moyen du four électrique, un pouvoir électrique suffisant et à bas prix. Voici quelques-uns des avantages que présente le four électrique :—

- (1) La construction du four est moins coûteuse, puisque les machines soufflantes ne sont pas nécessaires.
- (2) L'économie d'environ les deux-tiers du combustible nécessaire pour le haut-fourneau.
- (3) Le traitement possible des fins, dans le four électrique, sans avoir recours au briquetage.
- (4) Le gaz qui se dégage à une forte puissance calorifique, est exempt d'azote.

(5) La possibilité de produire immédiatement dans le four, du fer contenant une basse teneur en carbone.

(6) Une diminution de travail, puisque l'on n'emploie qu'un tiers du combustible nécessaire pour un haut-fourneau.

On trouvera peut-être avantageux, plus tard de combiner le four électrique à cuve avec un four électrique pour l'acier, dans lequel le fer liquide provenant du four à cuve pourrait être affiné.

Il semble donc qu'à l'avenir, l'électricité sera d'une plus grande importance pour l'industrie du fer qu'elle ne l'a été par le passé.

L'auteur de ce rapport est redevable de beaucoup de précieuses informations dans la préparation de ce rapport, à M. Axel Lindblad, lequel a droit aux plus grands éloges pour la construction du four électrique; et à M. Sven Danieli qui a conduit les expériences.

APPENDICE II.

LE FOUR ÉLECTRIQUE A RÉDUCTION 'FRICK'.

Principe.

Le four Frick pour la réduction des minerais appartient au type de fours électriques appelés, en général 'fours à résistance,' parce que les matières à être traitées sont utilisées comme résistance et chauffées par un courant électrique qui les traversent.

La disposition caractéristique de ce four se rapporte aux électrodes, lesquelles sont entourées de charbon de bois ou de coke à l'état libre, de telle sorte qu'elles ne sont pas seulement protégées contre la combustion par le minerai, mais aussi maintenues à l'épreuve des pertes de chaleur, lesquelles sont considérablement diminuées.

Le four peut être activé par un courant monophasé ou polyphasé. Un courant bi-phasé est généralement préférable, parce qu'il permet l'emploi de deux circuits indépendants ayant la plus grande résistance possible.

Description du four.

On voit, dans le dessin ci-joint, un four de 2,000 kilowatts. Le four se compose de:—

(1) *Une chambre de réaction et de fusion large et circulaire, recouverte d'une voûte.*

(2) *Une cuve centrale d'alimentation, dans laquelle le minerai et une partie du charbon réducteur sont introduits de la même façon que dans un haut-fourneau ordinaire.*

(3) *Deux ou plusieurs cuves plus petites pour l'introduction des électrodes. Il y a dans ces cuves des ouvertures par lesquelles on fait pénétrer une partie de l'agent réducteur, coke ou charbon de bois, de façon à entourer les électrodes et les protéger contre l'oxydation. Pour plus de commodité, ces ouvertures sont reliées au parquet supérieur au moyen de petits entonnoirs, de telle sorte que l'on peut de là-haut, alimenter les électrodes de charbon.*

Le four représenté par ce dessin est destiné à fonctionner au moyen d'un courant biphasé, les deux phases devant être indépendante l'une de l'autre.

L'ensemble du four est encaissé dans une solide construction en plaques d'acier.

Les parois de la chambre de réaction sont recouvertes de magnésite afin de résister à la haute température qui peut se développer. Ce gar-

nissage est d'une composition telle qu'il ne peut être qu'un très mauvais conducteurs pour l'électricité, même à une haute température, ce qui est un point très important dans des fours de cette nature.

Il faut que le diamètre de cette chambre soit relativement grand pour obtenir assez de résistance et éviter un courant trop fort. Cette disposition est contraire à celle du haut-fourneau ordinaire, suivant laquelle le four est fait plus étroit dans la zone de fusion, afin de permettre à la soufflerie d'atteindre le centre de cette zone.

La partie inférieure de la chambre de fusion, dans laquelle on recueille la fonte produite, est faite plus étroite afin de donner au bain de fer une profondeur suffisante.

La disposition pour la coulée de la fonte et du laitier sont les mêmes que dans le haut-fourneau ordinaire.

A part les ouvertures dans les parois pour la coulée de la fonte et du laitier, il en existe d'autres, dont une devant chaque électrode et une ou plusieurs entre les électrodes. Par les premières, on peut retirer le charbon de bois ou le coke autour de l'électrode lorsqu'il y a lieu de la remplacer. Les autres peuvent servir à l'introduction des gaz tirés du gueulard par un ventilateur dans le but de les utiliser pour transporter la chaleur, afin d'augmenter l'étendue de la zone de fusion dans laquelle la réduction peut se faire par l'oxyde de carbone. Cette circulation du gaz a été d'abord préconisée par Harmet, et ce projet a été recommandé par l'auteur dans sa conférence devant le 'Jern-Kontoret' à Stockholm, en mai 1905.

La cuve principale est soutenue par une charpente spéciale à poutres d'acier, comme dans les haut-fourneaux ordinaires, afin de ne pas porter sur la voûte de la chambre inférieure.

Une trappe de sable entre la cuve principale et la voûte empêchant les gaz de s'échapper à cet endroit. Etant donné la petite quantité de gaz produit dans le four électrique (six ou sept fois moindre que dans le haut-fourneau ordinaire), la cuve principale n'a plus besoin d'être aussi haute. Pour un four de 2,000 kilowatts, une hauteur de 6 mètres, ou 20 pieds, sera tout à fait suffisante dans la plupart des cas.

La partie supérieure du four peut être fermée au moyen d'un gueulard convenable de haut-fourneau. Le gueulard représenté dans le dessin est un "Charleville," tel que ceux qu'on emploie en Suède.

Les électrodes sont soutenues par un système de poulies, et leurs manches sont placés côte à côte auprès des appareils compteurs.

Les électrodes sont solidement emboîtées dans un manche refroidi par circulation d'eau, auquel le courant est dirigé au moyen de deux gros tubes en cuivre qui servent à la fois à trois fins différentes :—

- (1) Comme conducteurs de l'électricité.
- (2) Pour la circulation d'eau jusqu'au manche.
- (3) Pour contenir les électrodes.

Le courant est fourni par un ou plusieurs transformateurs, placé dans le voisinage du four, et est transmis aux tubes par de fortes barres de cuivre et des cables flexibles.

Fonctionnement du four.

Le four peut être mis en marche de la même manière qu'un haut-fourneau ordinaire. On fait d'abord un petit feu de bois pour assécher le four. Ensuite la chambre de fusion est remplie de coke ou de charbon de bois, les électrodes sont abaissées, et le courant appliqué. En réglant l'excitatrice de la dynamo, le courant est maintenu faible au début, de façon à ne pas augmenter la température trop vite.

Lorsque la température dans la chambre de fusion a atteint $1,500^{\circ}$ C, les parois sont durcies et le four est prêt à fonctionner.

Pour consommer une partie du charbon, on peut laisser pénétrer de l'air par les trous de coulée, en ayant soin de veiller tout le temps à ce que les électrodes soient protégées.

Le four est ensuite rempli de couches alternantes de charbon et de minerai avec de la chaux. Puis, on applique le courant et on l'augmente jusqu'à ce qu'il atteigne toute sa force.

Les dimensions des électrodes et la couche de charbon qui les entoure, servant à les isoler de la chaleur, sont tellement diminuées que la plus haute température ne se produira qu'au fond de l'électrode, et de là, le courant suivra le parcours le plus facile et offrant le moins de résistance, jusqu'à l'autre électrode du côté opposé.

Le courant en traversant le mélange grossier de charbon et de minerai les soumet à une haute température qui effectue la réduction du minerai.

La réduction dans le four électrique diffère beaucoup de celle qui se pratique dans le haut-fourneau en ce qui concerne les différentes sources de chaleur. Le gaz dans un haut-fourneau est environ huit fois aussi lourd que celui qui est produit dans un four électrique, durant le même espace de temps. Ce dernier fait monter, par conséquent, huit fois plus de chaleur. Au fait, la chaleur totale du gaz, dans le four électrique, dès qu'elle a quitté la zone chaude, est suffisante pour chauffer les matières jusqu'à environ 600° C, alors que dans un haut-fourneau la température pourrait théoriquement être élevée à $3,800^{\circ}$ C; pourvu qu'une bonne partie de la chaleur ne soit pas utilisée pour la réduction du minerai. De plus, il se consomme, par le carbone, une certaine quantité d'air en montant à travers la partie inférieure de la cuve.

Ces deux agents élargissent, dans un haut-fourneau, la zone de chaleur dans laquelle la réduction du minerai peut se produire par l'oxyde de carbone. Dans un four électrique à réduction, on peut obtenir le même effet par la circulation d'un gaz artificiel, en faisant venir le gaz du gueulard et le pressant dans la chambre de fusion, où on le fait traverser les matières chaudes, ce qui lui communique une grande chaleur,

laquelle est transmise aux matières dans la cuve. De cette façon une bonne partie du carbone peut être brûlée jusqu'au sous-oxide, ce qui donne lieu à une économie de charbon et aussi d'énergie électrique.

L'eau contenue dans les matières, dans la partie supérieure de la cuve, est évaporée par les gaz. Les vapeurs d'eau dans le gaz de circulation, une fois passées à travers la zone de chaleur sont dissociées et deviennent une nouvelle source de chaleur dans la cuve, augmentant ainsi l'effet de la circulation.

Lorsqu'il y a lieu de traiter du minerai pulvérisé, il peut être préférable de ne pas se servir de circulation de gaz ou de ne s'en servir que modérément, de crainte que le minerai en fines ne soient emporté avec le gaz.

Si les prix de l'électricité et du charbon sont élevés, cependant, ce sera peut-être une économie d'utiliser la circulation de gaz en faisant briqueter les fins.

Le gaz produit dans un four électrique à réduction a une puissance calorifique beaucoup plus grande que le gaz provenant d'un haut-fourneau, étant de 1,600 à 2,000 calories par mètre cube, contre 700 à 900 calories dans un haut-fourneau.

Ce gaz est donc aussi bon que celui des meilleurs appareils à gaz et peut servir à tous les usages, aussi bien pour les fours à réchauffer, que pour les fours à réverbère.

Il se produit suffisamment de gaz pour convertir la fonte produite en acier, si elle est transportée à l'état fondu dans un four à réverbère. On trouvera cette combinaison très utile dans bien des cas, et, en finissant l'acier dans un four électrique on pourra l'améliorer davantage.

Durant la première période de la marche, on laisse les électrodes toucher les matières ou pénétrer dedans afin de permettre à l'extrémité intérieure d'être rongée par le feu. Cependant lorsque leurs surfaces inférieures ont adopté une forme ayant la même pente que les matières, il ne faut pas les laisser toucher le minerai, mais les maintenir à quelques pouces au-dessus de manière que le charbon provenant des cuves qui entourent les électrodes, puisse descendre entre les matières et les bouts des électrodes. Celles-ci seront, de cette façon, parfaitement protégées contre l'oxydation. Leur durée sera considérablement plus longue que dans des fours où les électrodes pénètrent dans le minerai où se trouvent en contact avec celui-ci.

L'usure des électrodes est due en partie à l'effet oxydant du minerai et en partie à la friction mécanique des matières qui descendent. Ces deux causes sont également évitées. Il ne se produira guère qu'un peu de friction entre les électrodes et les fines parcelles de charbon qui les entourent.

L'isolement pratiqué autour des électrodes a, en outre, pour bon effet de protéger les parois et la voûte contre toute chaleur excessive.

Etant donné la température relativement basse qui domine dans la cuve principale, il n'est pas important que les murs soient épais. L'épaisseur des murs ne doit servir qu'à prévenir l'usure résultant de la descente des matières. Cette usure est beaucoup moindre que dans un haut-fourneau ordinaire, à cause de la lenteur des matières à descendre, leur volume par tonne de fonte étant un peu moins d'un tiers de celui d'un haut-fourneau.

Les électrodes, quoique protégées contre l'oxydation et l'usure excessive, se consumeront tout de même avec le temps. Il faudra les abaisser à de longs intervalles. Lorsqu'elles sont tellement usées que les manches deviennent exposées à une trop grande chaleur, on peut emboîter dans le manche une nouvelle électrode par-dessus l'ancienne, laquelle pourra, de cette façon servir, jusqu'au bout. L'emboîture des électrodes réunies est considérablement facilitée par l'espace libre qui entoure les électrodes là où elles pénètrent à travers la voûte du four. On se sert de manches ou pinces en fer ou acier commun que l'on laisse fondre jusqu'au bout. Pour établir un bon contact entre les deux électrodes, le point de jointure est rempli d'une bonne matière conductrice, soit une pâte de fer ou d'acier, ou de la poudre de graphite.

L'enveloppe métallique autour de chaque électrode peut être facilement enlevée, s'il y a lieu d'emboîter une nouvelle électrode.

Consommation du charbon.

La consommation du coke ou charbon de bois est déterminée par la quantité de carbone nécessaire pour la réduction des métalloïdes et du carbone contenu dans la fonte.

La quantité de carbone voulue pour la réduction varie suivant que l'oxyde de carbone peut être plus ou moins utilisé comme agent de réduction, ce dont on peut juger par le rapport entre le carbone transformé par la chaleur en oxyde de carbone et celui transformé en acide carbonique, ou, ce qui revient au même, le rapport du volume de CO au volume de CO₂ contenu dans le gaz.

Si $\text{CO} / \text{CO}_2 = k$, alors la quantité de carbone nécessaire pour produire

				$\frac{1+k}{1.33(2+k)}$
1 kilog. de Fe	avec Fe ₂ O ₃	pourra être	= 0.428	
1 kilog. de Fe	“ Fe ₃ O ₄		= 0.381	“
1 kilog. de Si	“ SiO ₂		= 1.142	“
1 kilog. de Mn	“ MnO		= 0.291	“
1 kilog. de P	“ P ₂ O ₅		= 1.29	“

D'après le minerai à traiter il est facile d'arriver à une analyse approximative de la fonte. La valeur de 'k' dépend des conditions variables comme il est dit plus haut. Avec une bonne circulation de gaz, 'k' devrait atteindre une valeur de 2 à 2.5. Sans circulation de gaz 'k' peut dépasser 4.

Le tableau I ci-joint donne la quantité nécessaire de carbone avec différents 'k' pour les métalloïdes sus-mentionnés.

Le carbone contenu dans la fonte dépend de la quantité excédante de carbone dans la zone de fusion, et peut varier entre 1 et 4 pour cent. Il faudra probablement peser et analyser le minerai et le charbon avec beaucoup plus de précision, pour obtenir la composition régulière de la fonte, que dans un haut-fourneau ordinaire, où l'excédent de carbone est de rigueur. La consommation totale de charbon de bois ou de coke peut se calculer facilement d'après leur teneur en carbone.

A l'aide des chiffres de ce tableau on calcule la quantité de carbone nécessaire pour quelques échantillons de fonte:—

Ex. 1. Le minerai— Fe_2O_4

Analyse	k						
	0·67	1	1·5	2	2·5	3	4
Fe = 96·4%.....	17·22	18·35	19·64	20·6	21·4	22	21·9
C = 3·0%.....	3	3	3	3	3	3	3
Si = 0·15%.....	0·080	0·086	0·092	0·097	0·1	0·103	0·107
Mn = 0·4%.....	0·055	0·058	0·062	0·066	0·068	0·070	0·073
P = 0·05%.....	0·030	0·032	0·035	0·036	0·038	0·039	0·040
Kgs. de C. par 100 kgs. de fonte,							
	20·385	21·526	21·829	23·799	24·606	25·212	26·120
Kgs. de charbon de bois à 84 p. c. par 100 kgs. de fonte.							
	27·3	25·6	27·2	28·35	29·3	30·0	31·1

Ex. 2. Le minerai— Fe_2O_3

Fe = 94 %.....	18·85	20·10	21·50	22·60	23·50	24·1	25·1
C = 2·5%.....	2·5	2·5	2·5	2·5	2·5	2·5	2·5
Si = 1·5%.....	0·81	0·86	0·02	0·96	1·0	·03	1·07
Mn = 1·0%.....	0·14	0·15	0·16	0·17	0·175	0·18	0·19
P = 1·0%.....	0·61	0·65	0·69	0·72	0·75	0·78	0·81
Kgs. de C. par 100 kgs. de fonte.							
	22·9	24·26	25·77	26·95	27·92	28·59	29·67
Kgs. de coke à 87 p. c.							
	26·4	27·9	29·6	31	32·1	32·8	34·1

Ex. 3. Le minerai—Fe₂O₃.

Analyse	k						
	0.67	1	1.5	2	2.5	3	4
Fe = 96 %.....	17.16	18.25	19.55	20.5	21.3	21.95	22.8
C = 3 %.....	3	3	3	5	3	3	3
Si = 0.5%.....	0.27	0.286	0.306	0.32	0.33	0.34	0.36
Mn = 0.5%.....	0.07	0.074	0.078	0.082	0.085	0.087	0.09
Kgs de C. par 100 kgs de fonte.							
	20.50	21.61	22.934	23.902	24.715	25.377	26.25
Kgs. de charbon de bois à 87 p.c.							
	27.7	25.8	27.3	28.5	29.45	30.2	31.3

Le poids du charbon varie ainsi entre 240 et 340 kgs par 1,000 kgs. de fonte, principalement suivant la valeur de 'k'.

Consommation théorique d'énergie.

Sous ce titre, nous devons étudier:—

(1) La chaleur de réduction, ou l'énergie calorifique absorbée dans la réduction des métalloïdes, déduction faite de la chaleur développée par l'oxydation du carbone qui absorbe l'oxygène dégagée par suite de la réduction.

(2) La chaleur servant à séparer l'acide carbonique des carbonates et l'eau des hydrates.

(3) La chaleur de fusion de la fonte.

(4) La chaleur de fusion du laitier.

(5) La chaleur sensible emportée par les gaz.

La chaleur de réduction doit être basée sur des chiffres, ayant trait à la chaleur de formation, qui ont été déterminés par divers expérimentateurs. Ces chiffres diffèrent jusqu'à un certain point. Les calculs subséquents sont basés sur les valeurs moyennes suivantes:—

1 kg. C	+1.33	kg. O	=2.33	kg. Co	=2470	kg. cal.	=2.88	K. W. H.
1 " C	+2.37	" O	=2.67	" Co ₂	=3080	"	=9.42	"
1 " Fe	+0.286	" O	=1.26	" FeO	=1350	"	=1.575	"
1 " Fe	+0.381	" O	=1.381	" Fe ₂ O ₃	=1650	"	=1.925	"
1 " Fe	+0.428	" O	=1.428	" Fe ₃ O ₄	=1800	"	=2.1	"
1 " Mn	+0.291	" O	=1.291	" MnO	=1730	"	=2.02	"
1 " Si	+1.142	" O	=2.142	" SiO ₂	=7330	"	=9.13	"
1 " P	+1.29	" O	=1.29	" P ₂ O ₅	=5900	"	=6.38	"

Le tableau No. 2 indique la consommation théorique d'énergie nécessaire pour la réduction de 1 kilog. des divers métalloïdes, déduction faite de la chaleur développée par le carbone avec différentes valeur de 'k'.

Le tableau 2 est calculé d'après les formules suivantes :—

Pour obtenir par réduction :

1 kg. de Fe	avec Fe ₂ O ₃	moins le minerai	il faudra	2·1	$\frac{-0·428 (2·88k+9·42)}{1·33 (k+2)}$	K. W.
1 “ de Fe	“ Fe ₃ O ₄	“ “ “ “		1·925	$\frac{-0·381 (2·88k+9·42)}{1·33 (k+2)}$	“
1 “ de Si	“ SiO ₂	“ “ “ “		9·13	$\frac{-1·142 (2·88k+9·42)}{1·33 (k+2)}$	“
1 “ de Mn	“ MnO	“ “ “ “		2·02	$\frac{-0·29 (2·88k+9·42)}{1·33 (k+2)}$	“
1 “ de P	“ P ₂ O ₅	“ “ “ “		6·88	$\frac{-1·29 (2·88k+9·42)}{1·33 (k+2)}$	“

La chaleur servant à séparer l'acide carbonique des carbonates et l'eau des hydrates. Ceci se fait ordinairement d'une façon plus économique dans des fours séparés chauffés au gaz. L'usage du four à réduction n'est économique pour cette fin que dans les cas où il faut des petites quantités de chaux n'exigeant pas l'érection de fours supplémentaires.

La chaleur absorbée pour la séparation de l'acide carbonique d'avec 1 kilog. de CaO CO₂ peut être prise à 0.514 kilowatt heures, et pour la séparation de l'eau d'avec 1 kilog. de CaO H₂O, à 0.24 kilowatt heures.

Le point de fusion de la fonte dépend principalement de la température. Il a été constaté à la suite de diverses expériences que la chaleur contenue dans la fonte en fusion s'exprime très bien par la formule :—

218 + 0.29 (t° - 1200°) calories par kilog.

ou 225 + 0.388 (t° - 1200°) kilowatt heures par tonne.

A 1200° la chaleur est = 255 kilowatt heures par tonne.

A 1300° “ “ = 294 “ “ “

A 1400° “ “ = 333 “ “ “

La chaleur de fusion du laitier varie beaucoup suivant que sa composition varie. Un laitier convenable pour un four basique devrait avoir la composition d'un 'singulosilicate' dont le point de fusion peut être considéré équivalents à :—

440 + 0.40 (t° - 1200°) calories par kilog.

ou 515 + 0.47 (t° - 1299) kilowatt heures par tonne.

A 1200° la chaleur = 515 kilowatt heures par tonne.

A 1300° “ “ = 562 “ “ “

A 1400° “ “ = 609 “ “ “

La quantité de laitier dépend de la pureté et de la composition du minerai, et peut être calculée facilement d'après l'analyse du minerai, du charbon et de la chaux, ainsi qu'on le verra par les exemples données plus loin.

La chaleur sensible des gaz dépend de la température des gaz lorsqu'ils se dégagent du four et de la quantité de vapeur d'eau qu'ils contiennent.

Si le four fonctionne sans circulation de gaz, les gaz ne contiennent pratiquement que du CO et du CO₂ avec l'eau qui s'évapore des matières humides dans la partie supérieure du four. Il ne s'y trouvera que très

peu d'hydrogène ou d'hydrate de carbone provenant du charbon ou du coke.

Si l'on emploie le gaz de circulation, il se formera de plus grandes quantités d'hydrogène et d'hydrates de carbone par le passage de la vapeur à travers le charbon surchauffé dans la zone de fusion, dont une partie brûlera de nouveau dans la cuve, alors qu'une autre partie sera emportée par les gaz de tirage.

La chaleur sensible de la vapeur dans les gaz à une température de t° C sera équivalente à $600 + 0.48 t^{\circ}$ calories pour 1 kilog.

La chaleur sensible des gaz peut être considérée comme étant de $0.25 \times t^{\circ}$ calories par kilog., et cependant si l'on veut beaucoup de précision dans les calculs, il faudra tenir compte de l'augmentation de la chaleur spécifique avec la température.

L'eau contenue dans les gaz provient exclusivement des matières humides et doit être calculée d'après l'analyse.

La pesanteur des gaz secs, qui dépend de la valeur de k et de la consommation de carbone nécessaire pour la réduction est :—

$$= \frac{1}{1+k} (2.33 k + 3.67) \text{ kilog. pour 1 kilog de C.}$$

La consommation totale théorique d'énergie varie généralement entre 1,200 et 1,350 kilowatt heures par tonne, indépendamment de la chaleur absorbée par le laitier laquelle peut être de 100 jusqu'à 300 kilowatt heures par tonne de fonte, et de la chaleur absorbée dans la séparation de l'eau d'avec les hydrates et de l'acide carbonique d'avec la chaux, laquelle peut ajouter jusqu'à 250 kilowatt heures de plus par tonne de fonte.

La consommation totale théorique d'énergie peut donc varier entre 1,300 et 1,650 kilowatt heures par tonne de fonte, si l'on emploie de la chaux éteinte sèche, et ce dernier chiffre peut aller jusqu'à 1,900 kilowatt heures si l'on se sert de pierre à chaux.

Ces chiffres sont basés sur un minerai ne contenant pas moins de 57 pour cent de Fe.

Dans les cas spécifiques il faut faire des calculs exacts, basés sur l'analyse des matières brutes et des produits.

Les pertes par rayonnement ne peuvent se calculer que d'un cas à un autre. Ces pertes se produisent en partie dans les parois et en partie par les électrodes. Les pertes dans les parois peuvent être diminuées par isolation, mais ce que l'on gagne en diminuant le rayonnement dans un four à réduction, où il est difficile d'examiner et de réparer le foyer, est compensé par une usure plus considérable du foyer.

On peut mieux économiser la chaleur par l'isolation des électrodes, en les entourant de morceaux ou de poussière de charbon. Dans le four de 2,000 kilowatts représenté par le dessin ci-joint, les pertes totales pourront varier depuis environ 320 jusqu'à 370 kilowatts.

La consommation réelle d'énergie sera = $\frac{\text{énergie totale}}{\text{perte totale de pouvoir par rayonnement}}$
 Le rendement du four de 2,000 kilowatts sera donc :—

$$\frac{2,000 - 370}{2,000} = \frac{1,630}{2,000} = 0.815 \text{ ou } 81.5 \text{ pour cent.}$$

La consommation réelle d'énergie sera = $\frac{\text{la consommation théorique d'énergie}}{\text{le rendement}}$

et devra donc varier dans un four de 2,000 kilowatts entre $\frac{1,300}{0,815} = 1.600$

kilowatt-heures par tonne de fonte, et $\frac{1.650}{0.815} = 2,030$ kilowatt-heures par tonne de fonte, si l'on emploie de la chaux éteinte, mais pourra augmenter jusqu'à $\frac{1.900}{0.815} = 2,340$ kilowatts si l'on s'est servi de pierre à chaux.

Les fours plus petits donnent un rendement moindre, et exigent, par conséquent, une plus grande consommation pratique d'énergie.

Volume et puissance calorifique des gaz de tirage.

Le volume de gaz résultant de 1 kilog. de C est = 2.03 m. c. à 15° C.

Le volume total de gaz par tonne de fonte dépend principalement de la valeur de 'k' ou du rapport entre le CO et le CO₂.

car k.....	1	1.5	2	2.5	3	4
équivalent au volume total approximatif du gaz e b m. par tonne de fonte						
si le minerai = Fe ₂ O ₃	470	497	518	537	550	568
si le minerai = Fe ₃ O ₄	427	450	470	485	498	515

la valeur calorifique de 1 cbm de gaz à 15° C en calories
 1380 1650 1840 1970 2070 2210

et la valeur calorifique totale des gaz de tirage à 15° C en K. W. H. par tonne de fonte.

si le minerai = Fe ₂ O ₃	755	956	1115	1230	1325	1465
si le minerai = Fe ₃ O ₄	683	867	1006	1110	1198	1328

La puissance calorifique cbm des gaz est ainsi généralement supérieure à celle du gaz d'un gazogène ordinaire. Si 'k' est au-dessus de 2 les gaz contiennent suffisamment de chaleur pour transformer la fonte en acier dans un four à réverbère.

Les électrodes devront être porteurs de courants de 12,000 à 15,000 ampères, et devront être d'une grande section, afin d'éviter de trop grosses pertes.

Dans un four bi-phasé de 2,000 kw., avec 4 électrodes, chacune des quatre devra être de 600 × 600 mm. si elle sont composées de charbon de cornue. Si l'on se sert d'électrodes au graphite, une plus petite section sera préférable.

La chaleur développée par le courant dans les électrodes est emportée par l'eau qui sert à refroidir les manches.

La quantité de chaleur perdue dans les électrodes est moindre dans ce four que dans les autres du même type, grâce à l'isolation contre la chaleur, obtenue au moyen de l'entourage de charbon.

Les transformateurs sont placés sur un parquet à une hauteur telle qu'ils ne pourront nuire à la coulée du laitier et de la fonte, et que le circuit à travers le cuivre soit aussi court que possible.

Les prix de revient dépendent en tout premier lieu du prix de l'énergie électrique.

En comparant le four électrique à réduction avec le haut-fourneau ordinaire, il faut tenir compte non seulement du prix de revient du courant comparé à celui de la quantité correspondante de coke ou de charbon de bois, mais aussi des avantages qui rendent le four électrique supérieur au haut-fourneau. Le four électrique peut sans inconvénient traiter le minerai en poudre. Le coke et le charbon peuvent également sans inconvénient contenir de grandes quantités de poussier à bas prix. La pureté du charbon est d'une importance beaucoup moindre, la quantité exigée n'étant que d'un tiers de celle que nécessite un haut-fourneau. Les conditions dans un four électrique à réduction se prêtent aussi très bien à l'élimination du soufre, puisque la zone de fusion est imprégnée d'une forte atmosphère réductrice et d'une haute température, qui présentent les conditions pour que le soufre soit absorbé par la chaux suivant la réaction: $\text{CaO} + \text{S} + \text{C} = \text{CaS} + \text{CO}$.

La quantité de la fonte électrique sera donc dans bien des cas supérieure à celle produite dans un haut-fourneau ordinaire avec les mêmes matières premières.

On ne peut pas établir de règle générale quant aux ressources économiques du four électrique à réduction.

Il faudra examiner chaque cas suivant les bons résultats obtenus. Pour se faire une idée, voici un calcul fait de deux cas particuliers; les calculs sont basés sur les analyses et les données suivantes:—

Matières	Installation destinée à		
	Suède	Amérique	
		pour cent	Pulvérisées pour cent
Minerai.....	Fe ₂ O ₄	91·5	83
	MnO ₄	9·2	1·5
	MgO	1·5	.....
	CaO	2·0	2·0
	Al ₂ O ₃	0·8	.....
	SiO ₂	2·8	10·5
	P ₂ O ₅	1·2	.....
	H ₂ O	.....	3·0
	Fe	66·3	60
Chaux.....	MgO	1·7	1·7
	CaO	96·5	96·5
	Al ₂ O ₃	0·9	0·9
	SiO ₂	0·9	0·9
Charbon de bois.....	C	84	84
	H ₂ O	13	13
	Cendres	3	3
Fonte.....	Fe	96	96
	C	3	3
	Si	0·2	0·5
	Mn	0·2	0·5
	P	0·6	.....

Le laitier contenant	0·2 pour cent de Fe provenant du minerai.		1 pour cent de Fe provenant du minerai.	
	kg.	pour cent	kg.	pour cent
FeO	2:57	2	12:86	2:66
MnO	0:4	0:30	17:20	3:56
MgO	22:8	17:8	4:40	0:91
CaO	63:2	49:3	284:30	58:90
M ₂ O ₃	12:21	9:6	2:30	0:77
SiO ₄	22:81	17:8	161:50	33:50
P ₂ O ₅	4:1	3:2	.....	.....
	128:09	100:00	482:66	100:00

<i>Poids du minerai par tonne de fonte</i>	1450 kg.	1617 kg.
Valeur de K=CO/CO ₂	2:5	4:0
<i>Poids du carbone par tonne de fonte</i>	213:00	228:00
Pour la réduction de Fe	0:34	0:9
“ “ Mn	1:33	3:6
“ “ Si	4:50	.....
“ “ P	0:11	0:55
“ “ Fe ₂ O ₄ à FeO laitier	30:0	30:00
“ “ Carbone dans la fonte .....	.....	.....
	249:28	263:05

	Suède.	Amérique.
	kg.	kg.
Poids du charbon de bois par tonne de fonte	297	314
Poids du laitier par tonne de fonte provenant du minerai et de la chaux	128.0	482.66
Poids du laitier par tonne de fonte provenant des cendres	9.0	9.34
	<hr/>	<hr/>
	137.0	492.00
<i>Consommation théorique d'énergie par tonne de fonte.</i> kilowatt heures.		
Pour la réduction	879.7	929.1
" la fusion de 100 kg. de fonte et le chauffage à 1400°	333.0	333.0
" la fusion de 137 resp. 492 kg. de laitier	83.4	298.0
" l'évaporation de l'eau à 100°	29.0	66.7
" le chauffage des gaz de tirage à 100°	14.9	15.0
	<hr/>	<hr/>
	1340.0	1641.8
Pouvoir moyen en kilowatts	1600	2000
Pertes par rayonnement	370	370
Rendement du four, pour cent	76.9	81.5
Poids des gaz de tirage par tonne de fonte	600 kg.	608 kg.
Volume " " " " "	448 cbm	473 cbm
Valeur calorifique " " " " "	1970	2210 calories
 <i>Consommation pratique d'énergie par tonne de fonte en kilowatt-heures</i>		
	Suède.	Amérique.
	1743	2020
<i>Prix de revient du minerai, de la chaux, du charbon de bois, et de l'énergie électrique pour 1 tonne de fonte.</i>		
(a) pour le four suédois.		
1480 kg. de minerai à 12 kr. (suédois)	= 17.80 kr.	= 19.60 sh.
347 kg. de chaux à 16 kr. " "	= 0.57 " "	= 0.60 " "
297 kg. de charbon de bois à 20 kr. (suédois)	= 11.90 " "	= 13.60 " "
1743 kilowatt-heures à 0.006 kr.	= 10.46 " "	= 11.50 " "
	<hr/>	<hr/>
	40.70 " "	44.80 " "
(b) pour le four Américain.		
1617 kg. de sable de minerai à \$1.85	\$3.	= 12.90 sh.
261 kg. de chaux à \$0.04	\$0.105	= 0.45 " "
314 kg. de charbon de bois à \$0.08	\$2.51	= 10.80 " "
2020 kilowatt-heures à \$0.75	\$1.515	= 6.50 " "
	<hr/>	<hr/>
	\$7.130	= 30.65 " "

Le coût des électrodes sera très peu de chose et pourra probablement être maintenu en dessous de \$0.18 = 0.6 sh. = 0.54 kr. par tonne de fonte.

TABLEAU I
CO : CO₂ = k.

$\frac{1+k}{1.33} (2+k) = K$ Kg C nécessaire pour la réduction de :—	100	50	9	6.5	5	4	3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.67	0
1 kg. de Fe avec Fe ₂ O ₃ = 0.428K.....	0.319	0.312	0.293	0.284	0.2765	0.267	0.257	0.25	0.241	0.229	0.214	0.201	0.161
1 kg. " Fe " Fe ₃ O ₄ = 0.381K.....	0.284	0.278	0.261	0.253	0.2465	0.238	0.229	0.222	0.214	0.204	0.1905	0.179	0.143
1 kg. " Si " SiO ₂ = 1.142K.....	0.852	0.834	0.783	0.758	0.739	0.715	0.686	0.667	0.643	0.613	0.572	0.538	0.430
1 kg. " Mn " MnO = 0.291K.....	0.217	0.212	0.199	0.193	0.188	0.182	0.175	0.170	0.164	0.156	0.146	0.137	0.1095
1 kg. " P " P ₂ O ₅ = 1.29 K.....	0.962	0.941	0.883	0.855	0.835	0.807	0.775	0.753	0.725	0.692	0.645	0.606	0.485

TABLEAU II
CO : CO₂ = k.

K.W.H. nécessaires pour la réduction de :—	100	50	9	6.5	5	4	3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.67	0
1 kg. de Fe avec Fe ₂ O ₃	1.163	1.162	1.068	1.038	1.004	0.985	0.940	0.914	0.880	0.842	0.786	0.734	0.585
1 kg. " Fe " Fe ₃ O ₄	1.091	1.089	1.005	0.977	0.948	0.930	0.891	0.873	0.843	0.805	0.757	0.709	0.580
1 kg. " Si " SiO ₂	6.63	6.63	6.37	6.29	6.195	6.14	6.03	5.965	5.875	5.76	5.61	5.405	5.08
1 kg. " Mn " MnO.....	1.383	1.382	1.319	1.296	1.275	1.258	1.229	1.212	1.188	1.162	1.123	1.086	0.99
1 kg. " P " P ₂ O ₅	4.06	4.06	3.77	3.68	3.57	3.50	3.38	3.305	3.21	3.08	2.92	2.76	2.32

APPENDICE III.

LE FOUR ÉLECTRIQUE A ACIER 'FRICK'.

Principe.

Le four "Frick", pour le chauffage et la fusion de l'acier, est un four à transformateur, ou à induction.

La chaleur est produite par un fort courant électrique d'environ 20,000 à 200,000 ampères, qui, sans aucun fil, est directement engendré dans l'acier. Le foyer n'est ainsi, en aucune façon apparente, connecté avec la dynamo.

Description du four.

Les parties électriques du four sont :—

(1) *Deux bobines primaires*, formées de bandes de cuivre isolées, et recevant un courant alternatif, monophasé, de 5 à 15 périodes environ.

(2) *Un noyau de fer magnétique*, composé de plaques de fer très minces constituant un champ magnétique fermé autour des bobines.

(3) *Le bain d'acier en forme de couronne*, de section uniforme et formant l'enroulement secondaire du transformateur.

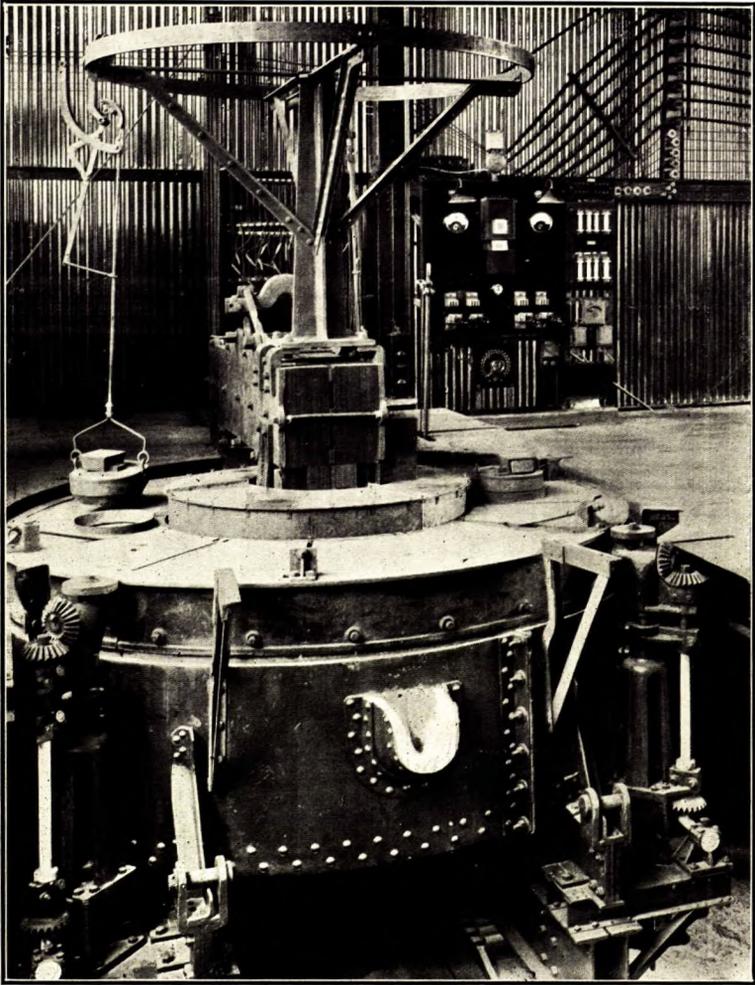
Dans les fours de grandes dimensions, une troisième bobine élevée peut être intercalée entre les deux bobines plates, de façon à améliorer les conditions électro-magnétiques.

Le courant primaire monophasé passant au travers des bobines, fait naître un flux magnétique alternatif dans le noyau, et celui-ci, engendre à son tour un courant électrique secondaire dans le circuit formé par l'anneau métallique du bain contenu dans le creuset.

Le courant secondaire est transformé en chaleur, à la façon d'un courant traversant les filaments d'une lampe à incandescence. Son intensité est égale au courant primaire, multiplié par le nombre d'enroulements de la bobine.

En choisissant un nombre convenable d'enroulements, on peut adapter le four à un voltage variant entre 100 et 5,000 volts. Ce dernier voltage employé dans le four de 1,000 chevaux des usines Krupps d'Essen, n'a jamais présenté le moindre inconvénient.

(4) *Les connections de cuivre* entre le four et le tableau de distribution. Depuis novembre 1904, tous les fours étant faits à renversement, il s'ensuit que les prises de courant du four sont connectées à celles du tableau par des cables flexibles, ou, si l'on emploie un faible voltage et un gros ampérage demandant des cables trop lourds, par un interrupteur spécial, qui coupe le courant quand le four s'incline.



Le Four Électrique à acier "Frick".

Le Four Électrique à Réduction 'Frick'
 Production en 24 heures — 23-27 tonnes.
 Consommation de pouvoir — 2,000 K. W.

FRICKS' ELECTRIC REDUCTION-FURNACE

PRODUCTION IN 24 HOURS — 23-27 TONS
 POWER CONSUMPTION — 2000 K.W.

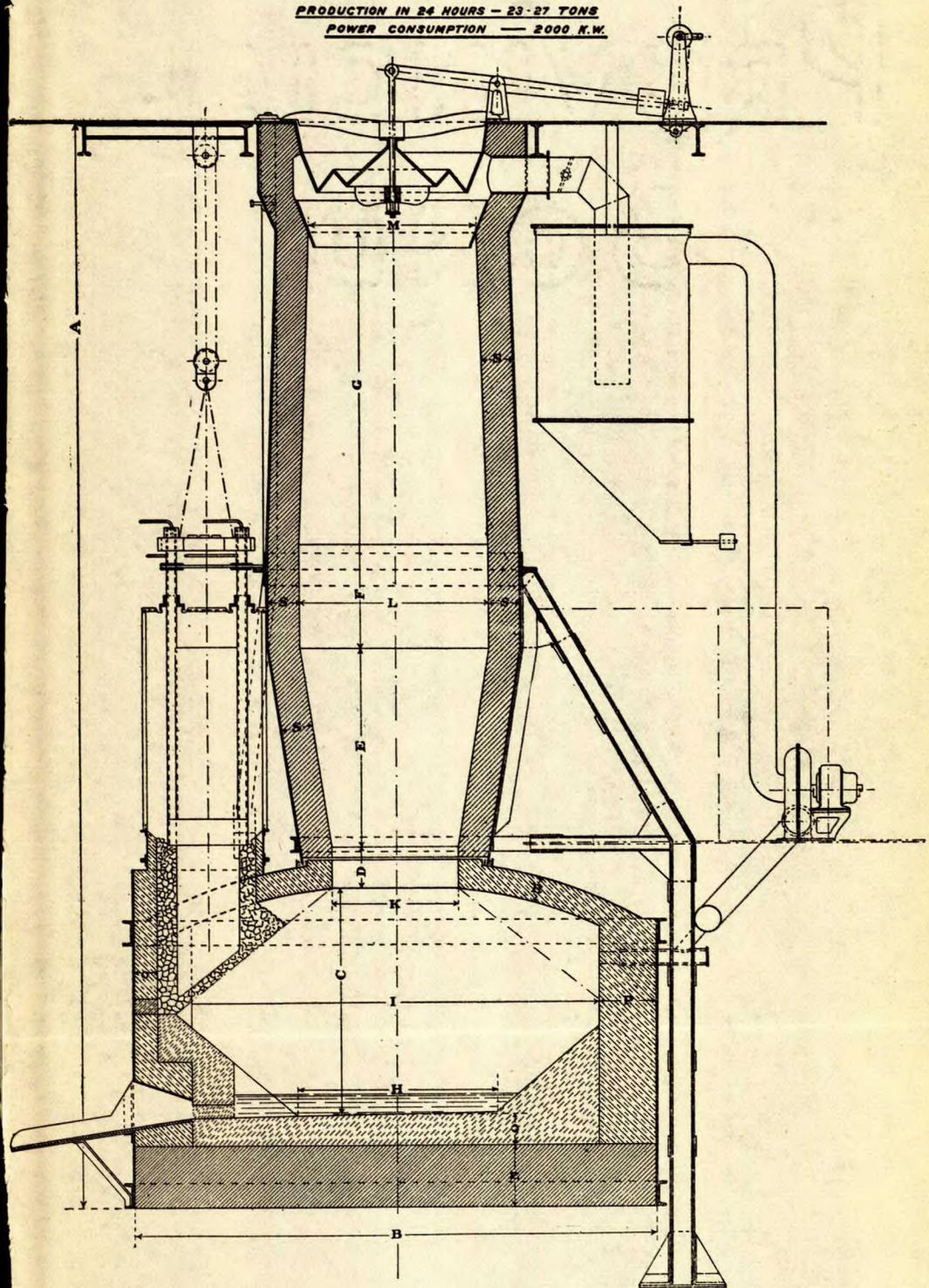
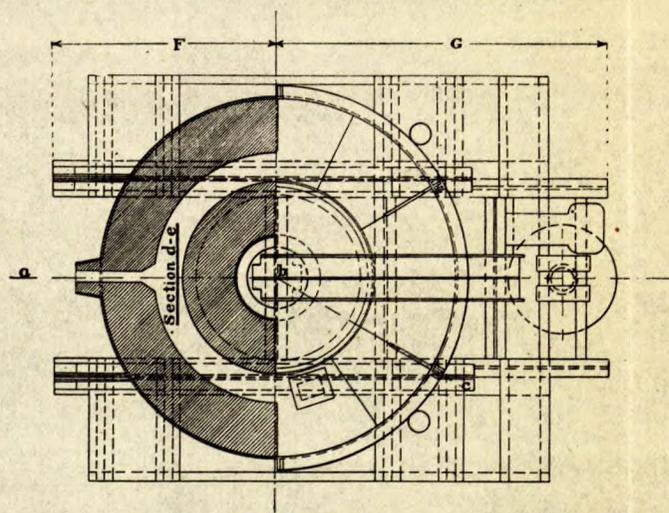
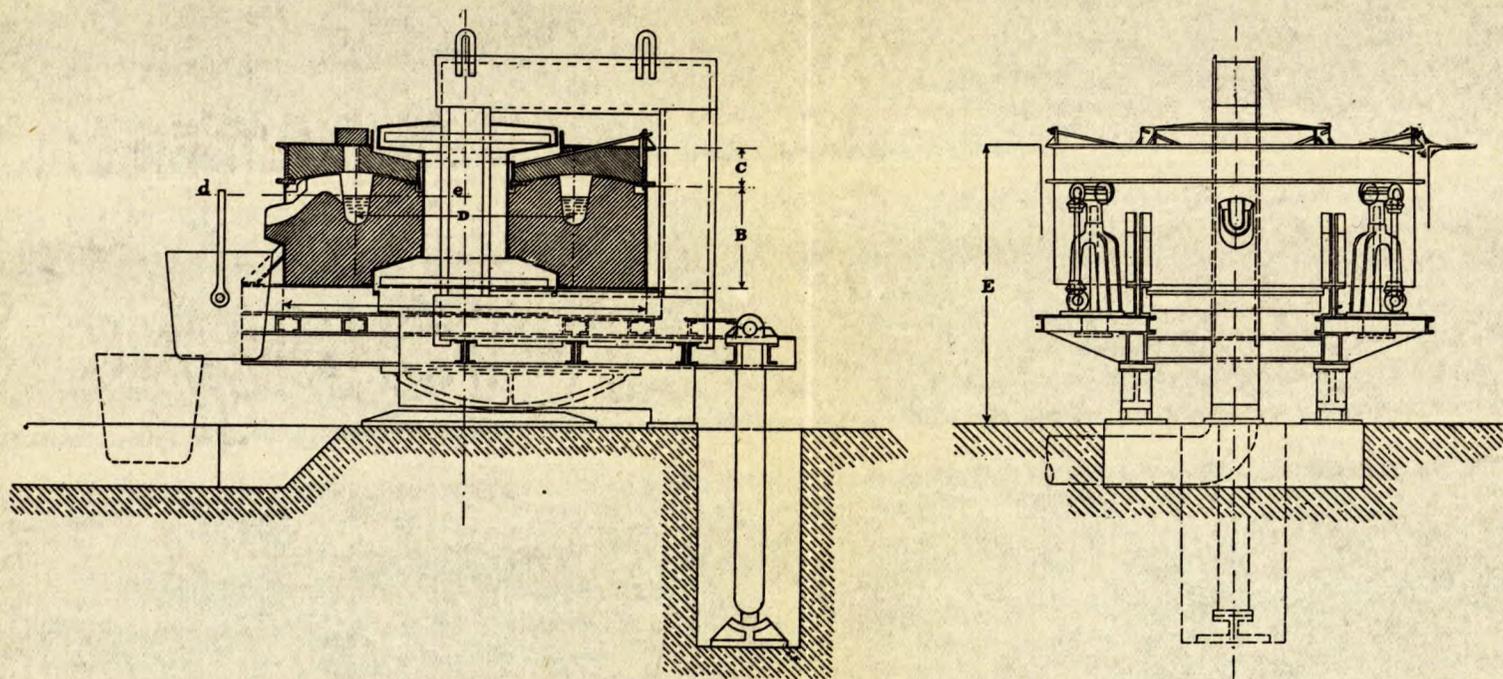


Fig. 14.

Section a-b-c



ELECTRIC INDUCTION-FURNACE

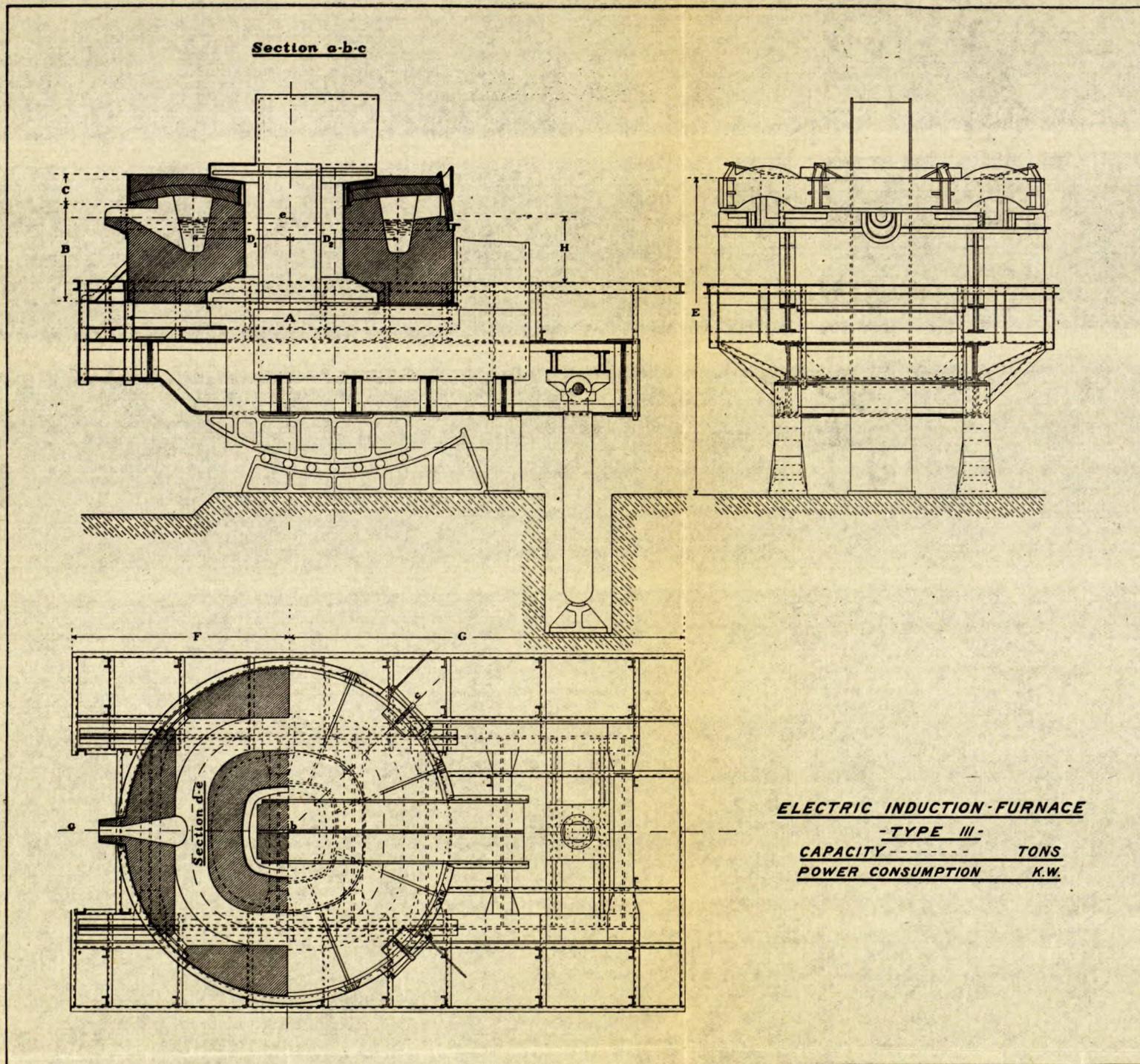
-TYPE I-

CAPACITY ----- 3 TONS

POWER CONSUMPTION 250 K.W.

Four Electrique à Induction. Type I.
Capacité, 3 tonnes. Consommation d'énergie, 250 K. W.

Fig. 15.



Four Électrique à Induction. Type III.
 Capacité.... Tonnes. Consommation d'énergie,...K. W.

Fig. 16

(5) *Un tableau de distribution*, avec les instruments ordinairement employés, tels que voltmètres, ampèremètres, wattmètres, électrodynamomètres, coupe circuits et un régulateur shunt qui augmente, ou diminue le pouvoir absorbé par le four.

Si la distance à la dynamo est trop grande, il serait moins coûteux de placer le régulateur-shunt près de la dynamo et de l'opérer par un relais spécial à cet effet.

Le réglage du courant doit toujours pouvoir se faire du four.

Les parties mécaniques du four sont :—

(1) *Le dispositif du renversement*. Les petits fours peuvent s'incliner à l'aide de berceaux. Les plus gros modèles, au-dessus de 8 tonnes, reposent sur des rouleaux, roulant sur un chemin circulaire.

Le renversement peut se faire, à la main, par des treuils et des poulies, ou par des appareils hydrauliques. Cette dernière méthode est la meilleure.

Généralement, le centre de rotation est légèrement en dessus et en avant du centre de gravité, de façon qu'un faible effort produise le renversement.

Le seul inconvénient de ce système est l'abaissement du trou de coulée.

Quand on se propose de couler directement dans les moules, l'on a avantage à ramener le centre de renversement en avant vers le trou de coulée, qui, ainsi, ne change pas de position pendant la coulée. Ce dispositif employé aux usines Krupp, pour le four de 1000 H. P. demande un échafaudage et un cylindre hydraulique assez coûteux.

(2) *Une construction d'acier* pour supporter le corps du four, le transformateur et les autres accessoires. Une partie de la plateforme, en arrière du four, est également fixée à cette construction de façon à ne pas intervenir dans le renversement.

(3) *Le corps du four*, consistant en une enveloppe de tôle, fixée sur deux fortes poutres, et reposant librement sur l'échafaudage. En cas de réparation, le corps entier du four peut être enlevé et, en moins de deux heures, remplacé par un four de rechange, permettant ainsi la continuation du travail sans interruption.

Pour empêcher le courant électrique de suivre l'enveloppe métallique, celle-ci est faite au moins en deux pièces, isolées l'une de l'autre.

L'enveloppe est garnie avec des briques isolantes parmi lesquelles on place le creuset annulaire.

Le creuset est formé de magnésie, damée autour d'un moule, ayant la forme du canal de fusion.

(4) *Une couverture*, dont les différentes constructions seront discutées plus loin, à propos des différents types de fours. L'on emploie souvent deux anneaux de fonte, ou d'acier fondu, l'un extérieur, et l'autre intérieur, entre lesquels on établit une arche circulaire en brique réfractaire.

Les anneaux sont aussi divisés en plusieurs parties, isolées électriquement.

(5) *Un ventilateur*, pour refroidir la bobine primaire et la partie centrale du noyau. Ce ventilateur est, dans quelques cas, placé sur l'échafaudage, de façon à pouvoir fonctionner pendant le renversement.

Cependant, l'on a trouvé qu'il n'y a aucun inconvénient à arrêter l'air, même pendant quelques heures, si le courant principal est coupé, et, comme il est prudent d'avoir un ventilateur de rechange, on place maintenant ceux-ci à quelque distance du four.

L'énergie employée par le ventilateur est de 0.25 à 0.5 pour cent de l'énergie totale employée par le four. Dans le cas où l'air doit être filtré, ces chiffres doivent être doublés. La filtration a cependant été trouvée superflue, même dans les centres comme Sheffield.

Pour répondre à différents besoins, l'on a créé *trois types de four*:

Type I: avec couvercle rotatif pour la fusion des matériaux solides.
Planche I.

La couverture repose en quatre points sur des roues pouvant être mises en mouvement par des arbres commandés par un moteur électrique. Deux ou trois ouvertures sont prévues pour le chargement des matériaux. Des plaques de fonte posées sur le dessus de la couverture et reposant sur les anneaux, protègent la maçonnerie et facilitent le travail.

Pour prévenir l'infiltration de l'air dans le four, l'on a ménagé, entre le couvercle et le creuset, des joints au sable sous le pourtour des anneaux.

Cette construction offre les avantages suivants:—

(1) Toutes les parties du four sont accessibles pour l'inspection.

(2) Le peu d'ouvertures employées réduisent considérablement les pertes de chaleur, et, par suite, l'énergie à fournir.

(3) La rotation du cercle permet l'addition uniforme sur le bain, de chaux, charbon de bois et des oxydants. Pour la même raison, les laitiers peuvent être facilement écrémés et enlevés par le regard supérieur.

Type II: avec couvercle fixe, percé d'un nombre suffisant d'ouvertures pour avoir accès à presque toutes les parties du four. Ce type doit être préféré dans le cas où le prix de la construction est plus à considérer que l'économie possible sur la consommation de l'énergie, celle-ci étant à bas prix, ou, pour les fours au-dessus de 15 tonnes dans lesquelles un couvercle rotatif serait trop lourd et trop gênant.

Type III: pour chauffer et affiner l'acier liquide préalablement fondu dans un four Bessemer ou Martin.

Ce type présente un couvercle fixe avec deux ou quatre couvertures latérales, par lesquelles on peut procéder à l'inspection du four, à l'addition ou l'enlèvement des laitiers, et à l'introduction des matières d'apport.

Quoique ce modèle soit spécialement créé pour l'affinage de l'acier, il peut aussi servir à la fonte et au raffinage des matières solides; dans ce cas, la charge doit être introduite rapidement par un chargeur automatique, pour éviter une trop grande perte de chaleur par les portes ouvertes.

Ce type ressemble assez à un four Martin. Ce four n'a pas encore été essayé pratiquement, mais à en juger par les résultats satisfaisants obtenus avec le four Roechling-Rhodenhauser, et publiés dans le journal du "Iron and Steel Institute," 1909, Vol. I, il n'y a pas de doute que ce four soit appelé à rendre de grands services dans l'affinage électrique de l'acier.

Ses principaux avantages sont :—

(1) Une plus grande surface du bain facilitant les réactions entre les laitiers et l'acier.

(2) La chaleur est engendrée uniformément dans tout le bain.

(3) Pas de gros bouillonnement de l'acier pour la transmission de la chaleur, mais des remous modérés, suffisant à assurer la régularité du produit; peu de corrosion sur le garnissage, qui avec un peu d'attention, peut durer plusieurs semaines.

Description de la marche du four.

La mise en marche du four se fait toujours à l'aide d'une couronne solide d'acier. Dans les petits fours, on a employé une couronne de fils d'acier; pour les gros fours, une couronne d'acier fondu convient mieux.

En mettant le courant, la couronne est chauffée et la température du creuset augmente lentement et régulièrement.

Le réglage du courant se fait, soit en changeant le nombre de tours dans la bobine primaire, soit en influençant le champ d'excitation de la dynamo, ou soit encore en variant la vitesse de la machine; la deuxième méthode est la plus employée.

Quand la couronne arrive à la température de 1400° C environ et commence à fondre, le garnissage du four est devenu très dur. Si l'on peut alors se procurer d'un autre appareil de l'acier liquide, on l'introduira dans le four où il dissoudra la couronne. Cette couronne peut aussi être chauffée jusqu'à fusion complète. Quelquefois, la couronne peut casser en un point avant qu'il y ait assez d'acier liquide pour former le circuit; la fente est alors bouchée avec de la limaille de tour, qui en fondant resoude les deux bouts de la couronne.

En couvrant la couronne avec du charbon de bois, l'on réduit les lamelles formées sur la couronne, ce qui accélère sa fusion.

Aussitôt qu'un bain liquide est formé, le four est prêt pour un travail régulier.

Fusion de matériaux solides. Le métal que l'on charge doit être de poids et de volume convenable et répandu aussi régulièrement que possible. Comme la chaleur est engendrée régulièrement dans tout le bain d'acier, il ne faut pas une très grande augmentation de chaleur, les morceaux solides se dissolvant au fur et à mesure dans le métal déjà liquide.

Toujours pour économiser l'énergie, le chargement se fait aussi vite que possible, pour garder le four à la plus basse température pendant la

fusion du métal. Les pertes par rayonnement accroissent comme le carré de la température dans le four.

Quand toute la charge est introduite, la marche dépend de la qualité des matériaux traités et du produit demandé.

Si les matériaux traités sont presque purs, une désoxydation seule est nécessaire, autrement, on doit procéder à une déphosphoration ou à une désulphuration. Ces procédés étant à peu près semblables pour les matériaux solides ou liquides, nous les examinerons ensemble.

Chauffage de l'acier liquide. Dans les régions où l'on ne peut avoir à bon marché l'énergie hydro-électrique, les fours électriques seront peu employés dans la fusion des matériaux pour les aciers de qualité supérieure. Il est plus économique d'opérer la fusion dans un four Martin.

Ceci peut être facilement démontré en tenant compte de l'énergie totale que l'on peut tirer du charbon en l'utilisant d'une part dans la production du gaz pour four Martin-Siemens, et d'autre part dans une installation électrique.

Il suffira de comparer les cas les plus probants.

L'utilisation la plus économique de la houille est sa gazéification dans des installations importantes, avec récupérateurs. Ce gaz peut aussi être utilisé immédiatement au chauffage des fours Martin-Siemens, ou à la conduite d'un moteur à gaz accouplé à une dynamo, fournissant l'électricité au four.

Dans l'installation bien comprise d'un four de 15 tonnes et 2,500 H.P., les rendements des différentes parties doivent être :—

Moteur à gaz	30 pour cent.
Dynamo	91 " "
Four électrique à riblons	82 " "
Rendement total de la fusion de l'acier ..	22,4 " "

Le rendement d'un four Martin de 15 tonnes, de bonne construction est de 25 pour cent, mais, en général, atteint seulement 20 pour cent.

La fusion électrique donne aussi le même résultat que le four Martin par tonne de houille.

Le prix de l'acier électrique est cependant plus élevé par suite du coût de l'installation, y compris le moteur à gaz et la dynamo.

Considérant que le rendement du four Martin baisse considérablement pour les hautes températures, soit à cause de la transmission plus lente de la chaleur, soit à cause des plus grandes pertes par rayonnement, et considérant, d'autre part, que le rendement du four électrique ne tombe pas plus que de 3 à 4 pour cent pour une élévation de température de 1500° à 1650° C, l'on peut conclure que la combinaison des deux fours donne de bons résultats. Par suite de la production trois ou quatre fois plus grands des fours électriques, si la fusion est effectuée dans un autre four, le coût de l'installation n'influence presque pas le prix de l'acier.

Les fours électriques trouveront ainsi leur plus grande application dans le traitement de l'acier liquide, que celui-ci soit fourni par un convertisseur Bessemer ou un four Martin-Siemens.

Dans la plupart des cas, il vaudra mieux ériger les fours électriques à une certaine distance des fours auxiliaires, et transporter l'acier de l'un à l'autre avec une poche, ou par un conduit communiquant d'un four à l'autre.

Si l'on se sert d'une poche, on versera son contenu dans un petit canal muni d'un appareil pour retenir le laitier, et terminé par un conduit vertical qui dirige l'acier jusqu'au fond du creuset.

Immédiatement après la formation d'un anneau métallique, on ferme les interrupteurs et on augmente l'excitation de la dynamo, aussi rapidement que possible, de façon qu'elle atteigne sa pleine charge avant que la poche soit vide, et ce point constitue un avantage sur les fours à arc.

Le traitement de l'acier dépend du degré d'affinage que l'on veut obtenir.

Décrassage. — Avant d'aborder l'étude de l'affinage, l'on doit mentionner les différentes méthodes de décrassage.

Quand les matières premières sont pures, il faut peu de laitier, et on doit ajouter seulement la chaux nécessaire pour neutraliser les silicates du métal. Ce laitier est enlevé quand on coule l'acier.

Dans un four du type I avec couvercle rotatif, le laitier, un peu avant et pendant la coulée, est ramené facilement en avant du trou de coulée à l'aide d'une sorte d'écumoir. Un homme étant sur le couvercle, commence par l'arrière du four, à ramener avec son écumoir les scories en avant vers le trou de coulée pendant que l'on tourne le couvercle. Il opère de même pour l'autre côté. L'opération peut se faire en moins d'une minute.

Si le laitier devient un peu épais, il peut être nécessaire de l'aider à parvenir près du trou de coulée, mais si la chaux a été mise en quantité suffisante, le laitier est assez fluide pour sortir de lui-même, avec seulement un peu de travail pour la partie arrière du four.

Dans un four du type II, avec un couvercle fixe, ayant au-dessus de nombreuses ouvertures, le décrassage se fait d'une manière analogue, mais, comme l'écumoir doit être passé d'une ouverture dans la suivante, le travail est un peu moins facile.

Dans un four du type III, avec deux ou quatre portes latérales, le laitier peut être enlevé par ces portes ou soutiré par le trou de coulée.

L'affinage de l'acier, exigeant une plus grande quantité de laitier, leur enlèvement est plus difficile et, pour cela, on doit préférer les types I et III.

Pour l'affinage, il faut au moins deux laitiers.

La manière la plus effective et la plus facile d'enlever le premier laitier, est de soutirer tout l'acier du four dans une poche et d'évacuer tout le

laitier par le trou de coulée comme ci-dessus. Le métal est remis dans le four par le fond de la poche.

Le décrassage dans le four "Frick" est aussi facile que dans tout autre four. Dans les fours à arc, les électrodes gênent le travail. Dans les fours ordinaires à transformateur, il a été démontré précédemment que le décrassage est impossible. De telles affirmations sont basées sur l'expérience acquise avec le four Kjellin, dans lequel on emploie un canal étroit et profond et où un certain nombre de couvercles doivent être enlevés pour avoir accès au bain, et les scories sont refroidies par suite des pertes de chaleur considérables occasionnées par la construction même des couvercles.

Dans le four Frick, les scories sont chaudes par suite de l'isolement calorifique obtenu avec le couvercle en une pièce.

Les laitiers suffisamment basiques, ne produisant pas d'érosion sur le garnissage, sortent pendant la coulée sans beaucoup de travail; l'on n'a jamais signalé la moindre difficulté à ce point de vue.

Il est évident que ce four ne peut pas présenter de plus grandes difficultés que le four Roechling-Rodenhauser, en ce qui concerne l'élimination des scories, car il y a un creuset suffisamment large pour les ringards, la largeur étant de 300, 420 et 500 millimètres, à la surface du bain, pour des fours de 3, 5, 8 et 15 tonnes respectivement.

Affinage. — La conduite de l'affinage au four Frick est la même, et se fait de la même façon que dans les autres fours électriques.

La surface du bain, étant en général de 10 à 20 pour cent plus grande que dans les autres fours, l'on a une surface de réaction suffisante entre l'acier et le laitier.

Les réactions sont très favorisées par le remous léger et incessant de l'acier que l'on décrira plus loin.

La température du laitier est aussi d'une grande importance; et pour une température donnée de l'acier, la température au point de contact entre le laitier et l'acier doit être uniforme pour tout le four.

Dans les fours à arc, la température du laitier augmente vers la surface supérieure, la chaleur étant produite au-dessus du bain. Dans un four à induction, le laitier est moins chaud au-dessus, toute la chaleur étant engendrée dans l'acier. La température moyenne des laitiers dans les fours à arc est donc plus grande que pour les fours à induction.

Les chutes de température ne seront pas très grandes si l'on prend soin d'isoler convenablement le dessus du bain; pour cette raison, les couvercles sont parmi les principaux avantages du four Frick.

En fondant des matériaux purs, on a seulement une couche très mince de laitier, et la différence de température entre l'acier et le dessus du laitier est à peine perceptible avec un pyromètre Féry ou Wanner. Dans l'affinage, on a une plus grande quantité de laitier et, par suite, une différence de température plus grande.

Si, par hasard, le dessus du laitier n'était pas fluide et ne participait pas ainsi aux réactions, on peut y remédier facilement en agitant la masse, ce qui peut se faire plus facilement dans le four Frick que dans un four à arc, où les électrodes sont une gêne, car on peut les endommager et, de plus, l'ouvrier peut recevoir des chocs électriques.

Les résultats de l'affinage dans les fours à induction sont en tous points semblables à ceux obtenus avec les fours à arc.

Déphosphoration. — Selon la quantité de phosphore à réduire, l'on aura un ou deux laitiers. La déphosphoration s'accomplit comme au four Martin, par l'action combinée de la chaux et de l'oxyde de fer.

La température élevée du four électrique facilite l'élimination du phosphore.

Jusqu'à présent, tous les fours n'étant employés qu'à la fusion de matériaux presque purs, l'on ne peut citer aucun résultat. Cependant, dans un cas, le phosphore a été réduit à 0.004 pour cent.

Les expériences faites avec des fours électriques de types semblables montrent que l'on obtient à coup sûr et très régulièrement, des résultats analogues.

Quand la déphosphoration est complète, tout le laitier est enlevé; la manière la plus radicale et la plus rapide est de vider complètement le four et de remettre seulement l'acier. Cette méthode est plus appropriée au four Frick qu'aux fours à arc, la perte de temps étant moindre, comme on l'a démontré plus haut. Pendant cette opération, on doit éviter avec soin toute perte considérable de chaleur. Les conduites et les poches doivent rester bien couverts.

Désulphuration. — La désulphuration peut être plus complète dans un four électrique que dans un convertisseur ou un four Martin, à cause de la facilité que l'on a à maintenir une atmosphère neutre ou non oxydante, et, par suite, un laitier libre d'oxydes.

Avant que le soufre ne soit éliminé, il faut, autant que possible, réduire les oxydes ferreux absorbés par l'acier, pendant la période d'oxydation. Ceci se pratique économiquement en répandant sur le bain de la poussière de charbon de bois ou de coke. Afin de prévenir l'ignition du charbon dans l'air, on le protège avec la chaux nécessaire à la formation du laitier final.

Pour rendre ce laitier fluide, une certaine quantité de sable, spath-fluor, et chlorure de calcium doit être ajoutée.

Aussitôt que les oxydes sont réduits, le soufre peut être absorbé par le laitier, en se combinant selon la formule: $\text{CaO} + \text{C} + \text{FeS} = \text{CaS} + \text{Fe} + \text{CO}$.

Le sulfure de calcium étant insoluble dans l'acier, aucune réabsorption du soufre n'est à craindre, aussi longtemps que le bain sera protégé par une atmosphère neutre, s'opposant à la formation de FeO.

Teneur de l'acier en carbone. — Quand les aciers supérieurs sont obtenus par la fusion de matières premières très pures, le four électrique

ne fait que remplacer le four à creusets, et la teneur convenable en carbone est obtenue en mélangeant de la fonte avec des riblons.

Une certaine quantité de carbone est oxydé par les écailles et la rouille que l'on trouve sur les matériaux. Après que le bain est bien en fusion, une éprouvette est prise et, si la teneur est trop forte, l'on ajoute des morceaux de minerai pur. Si la teneur est trop faible, l'on ajoute des carburants comme le spiègel ou le charbon de cornue.

Dans quelques cas, où le four travaille avec un four Martin, l'acier liquide que l'on verse possède la même teneur que le produit à obtenir, l'acier ayant été fondu et déphosphoré à un degré suffisant, sans pour cela éliminer son carbone.

Si l'acier est fourni par un convertisseur Bessemer, ou si l'on veut avoir une teneur en phosphore égale ou inférieure à 0.01 pour cent, il est préférable d'avoir de l'acier peu carburé.

La récarburation s'effectue après la déphosphoration et conjointement avec la désulphuration.

Pour carburger rapidement le bain, le carburant doit être suffisamment lourd pour plonger dans l'acier et offrir une grande surface d'attaque.

Du charbon de cornue, ou des briquettes de charbon, lestés avec de la limaille d'acier sont employés à cet effet.

Si l'éprouvette prise avant la coulée montre un manque de carbone, une récarburation peut encore se faire en ajoutant du charbon de bois au fond de la poche de coulée.

Désoxydation. — Par suite de la construction même du four, l'air ayant difficilement accès à l'intérieur du creuset, et l'atmosphère du bain étant réductrice ou neutre, il s'ensuit que l'oxygène de l'air qui se combine à l'acier est en très petite quantité. Cependant, même dans la fusion des aciers supérieurs avec des matériaux presque purs, il y a une certaine oxydation produite par la rouille et les lamelles d'oxyde de riblons et des gueuses de fonte. Une désoxydation doit suivre et elle est opérée comme d'ordinaire, en ajoutant dans le four, un peu avant la coulée, une quantité convenable d'alliages réducteurs tels que ferro-silicium, ou silicium-manganèse-aluminium. D'après la quantité de réducteurs employés, on doit conclure que la quantité de fer réduite est d'environ 0.2 à 0.6 pour cent du poids total de l'acier.

Si l'acier a déjà été déphosphoré, soit dans le four lui-même, soit préalablement dans un four Bessemer ou Martin-Siemens, il contient une quantité considérable d'oxydes. Comme on l'a dit plus haut les oxydes sont enlevés par l'apport de charbon de cornue ou de charbon de bois, et si le métal doit être désulphuré, la désoxydation étant pour cela nécessaire, va de pair avec l'élimination du soufre. C'est pourquoi, s'il ne reste que des traces de soufre, la plus grande partie des oxydes ayant été éliminés, une petite quantité d'alliages réducteurs sera suffisante pour terminer la désoxydation.

Si cependant l'acier est fortement agité et remué, comme c'est le cas pour la plupart des fours électriques, les petites particules de laitier, dispersées dans le métal et formant avec lui une sorte d'émulsion, ne peuvent pas être séparées et empêchent la désoxydation complète. Comme on le verra plus loin, la circulation dans les fours Frick est beaucoup moindre que dans les autres fours électriques et n'est plus qu'un léger remous de l'acier.

Apport pour les aciers spéciaux. — Les fours électriques, surtout les fours à induction, conviennent admirablement à la fabrication des aciers à grande vitesse et des autres alliages d'acier. Dans les fours à arc, la production d'un alliage déterminé est difficile et incertaine parce que les différences de température et la chaleur de l'arc en particulier influent sur les réactions entre l'acier et les apports. Mais dans les fours à induction, où la température de l'acier est uniforme, les apports peuvent être déterminés de la même façon que pour un four à creusets en tenant compte du laitier et du garnissage basiques.

Coulée. — Quand l'acier est formé et prêt à être coulé, le laitier est ramené près du trou de coulée, le courant est coupé, le four est incliné et l'acier versé dans la poche. L'addition finale du manganèse et du silicium à l'acier a lieu quand le métal est dans la poche de coulée; de cette façon on a le contrôle absolu de la composition du produit final.

Si le four est chargé avec des matières solides, l'on doit laisser environ un tiers à un quart de l'acier pour former un bain, mais si l'on emploie du métal fondu, le creuset est complètement vidé. Ceci étant fait, l'on ramène le four en arrière, le courant est remis et le four est prêt pour une nouvelle charge.

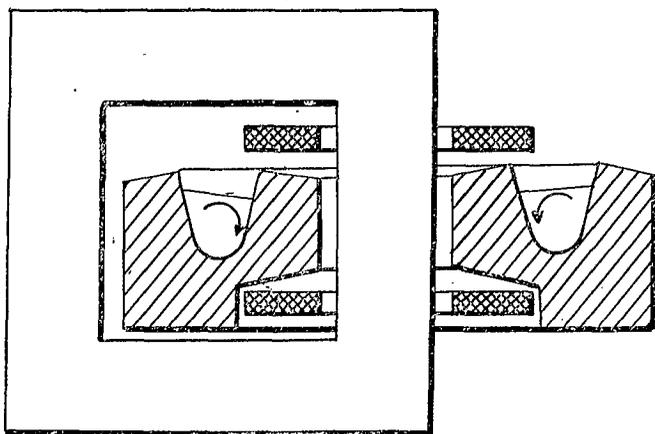


Fig. 17.

Rotation du bain d'acier. — Le champ de dispersion du bain magnétique autour de la bobine primaire coupant le courant électrique qui traverse l'acier, il se produit un mouvement dans le sens des flèches (fig. 17)

et une force presse l'acier contre la paroi extérieure, forçant ainsi la surface de l'acier à prendre une position inclinée.

Cette rotation a donc une tendance à entraîner les scories flottant sur l'acier contre la paroi intérieure, et peut, surtout dans les gros fours, si le mouvement est trop rapide, ronger par la friction le garnissage du creuset.

Comme cette rotation est produite par une force électro-magnétique, on peut seulement la régler par une disposition convenable des bobines. Dans cet ordre d'idées, l'emploi des deux bobines plates présente un avantage considérable sur l'emploi d'une seule bobine, plus haute, placée entre la partie intérieure du creuset et le noyau métallique, ainsi que l'a prouvé la comparaison des deux systèmes en usage aux usines Krupp.

Influence du laitier sur le garnissage. — Le laitier étant repoussé de la paroi extérieure, peut difficilement l'endommager, mais sa force de désagrégation est reportée sur la paroi intérieure.

A première vue, il semble que cette désagrégation constitue, par suite de l'usure inégale des deux parois, un sérieux désavantage. Mais cette rotation de l'acier est trop importante pour considérer la désagrégation de l'acier, qui peut être en partie neutralisée si l'on ajoute des matériaux basiques, de préférence de la chaux et de la magnésie, avant d'introduire des matériaux silicieux ou phosphoreux. Par suite de la rotation, la chaux est forcée contre la paroi intérieure, et empêche les particules d'acide phosphorique et de silice, amenés à la surface par la rotation en suivant la paroi extérieure, d'attaquer la paroi intérieure. Les particules acides étant pour ainsi dire neutralisées par les matières basiques avant l'arriver à la paroi intérieure, celle-ci, avec un peu d'attention peut être gardée pratiquement intacte.

Cette méthode peut être considérée comme la réparation automatique du garnissage.

Dans certains cas, où il est moins désirable d'avoir un laitier trop basique et consistant, la paroi intérieure peut être protégée contre la désagrégation par un refroidissement artificiel de la zone du laitier. Il est évident que les pertes de chaleur avec un tel procédé sont préférables à la désagrégation des parois par le laitier.

Production uniforme. — On a exprimé des doutes en ce qui concerne la distribution uniforme dans l'acier des matériaux d'apport, par suite du creuset plutôt long et étroit du four à induction; des analyses prouvent que le métal obtenu au four Frick est parfaitement uniforme pour toutes les parties du four.

Malgré ces analyses, les lingots d'une charge, ou même les barres tirées d'un lingot, peuvent différer comme qualité, et des objections ont été formulées comme quoi les fours électriques ne peuvent pas produire des aciers de composition égale et sûre. Ceci peut arriver quelquefois dans les fours où il y a des différences de température, ou quand le bain

est si fortement agité que les particules de laitier brassées avec l'acier ne peuvent pas se fixer séparément. Dans les fours Frick où règne une chaleur égale et seulement un léger remous, il y a moins de danger que ces faits se produisent.

Refroidissement des bobines et du noyau. — La chaleur produite par les pertes magnétiques et électriques des bobines et du noyau, aussi bien que par la radiation calorifique des parois du four, doit être détruite pour préserver les matières isolantes des bobines, et aussi pour diminuer les pertes dans les bobines, la résistance électrique augmentant avec la température.

Les bobines sont construites pour supporter une température inférieure à 120° C, mais qui n'atteint pas plus que 60° à 70° C.

Le refroidissement se fait par un ventilateur électrique, la quantité d'air requise est calculée sur la base de 1 mètre cube d'air par seconde pour traiter une perte de 1 kilowatt et une augmentation de température de 1° C.

La puissance requise par le ventilateur est d'environ 0.25 à 0.5 pour cent de l'énergie totale du four, à moins que l'air ne soit filtré.

Dans les gros fours, au-dessus de 2,000 H. P., la résistance opposée au ventilateur pour envoyer une quantité suffisante d'air entre le four et le noyau, serait telle qu'il est plus économique et plus effectif d'assurer le refroidissement par une circulation d'huile d'une manière analogue à celle employée pour les transformateurs.

Protection de la bobine inférieure. — Une des principales critiques formulées contre le four Frick est le danger auquel est exposée la bobine inférieure dans le cas d'une rupture du creuset.

Ce danger est totalement évité par l'emploi de canaux dans la maçonnerie, dirigeant tout acier liquide du centre vers des couvertures pratiquées dans le fond du four, et de manière à ce que la bobine non plus que les autres parties métalliques ne soient endommagées.

Depuis l'introduction de cette précaution, aucun dommage n'a été signalé, malgré les nombreuses ruptures advenues pendant les expériences faites sur le garnissage.

Régularité de l'énergie. — Un des avantages du four Frick sur les fours à arc est la régularité absolue dans la consommation d'énergie électrique.

Dans le traitement de l'acier liquide, la pleine charge peut être maintenue d'un bout à l'autre de l'opération, sans avoir à la régler ou à la surveiller.

Dans la fusion des riblons, l'excitation doit croître avec l'augmentation du bain.

Cette régularité de la charge est d'une grande importance pour l'installation électrique, et le prix de l'entretien et des réparations est beaucoup moindre qu'avec des fours à arc.

Capacité et puissance maximum du four. — L'économie des fours électriques augmente quand l'on accroit les dimensions, d'ailleurs comme pour la plupart des appareils techniques. Par conséquent il est important de ne pas être trop limité en ce qui concerne les dimensions et la puissance.

Le four Frick a déjà été construit jusqu'à 10 tonnes de capacité et 1000 chevaux comme consommation d'énergie. Les résultats excellents donnés par ce four montrent qu'il n'y aura pas de difficultés spéciales pour de plus gros modèles.

Un four de 15 tonnes, consommant 2,500 chevaux a été conçu pour le traitement de l'acier liquide. Les dimensions et les prix de ce four ne montrent pas que l'on ait atteint une limite. En combinant deux des fours ci-dessus, l'on doit avoir un modèle de 50 tonnes et 4,000 chevaux.

Fours construits et en marche. — Trois fours ont été construits tous pour remplacer des fours à creuset, et jusqu'à présent, l'on a traité des matériaux solides.

Un four, d'une capacité de 1,800 kg. et 250 chevaux, construit pour des fins d'expérimentation par MM. John Brown and Company, Limited, Sheffield, a donné, au point de vue de la fusion, d'excellents résultats, et l'acier est aussi bon que l'acier au creuset. Chez MM. William Jessop and Sons, Limited, Sheffield, l'on a construit un four de 3,000 kg. et 600 chevaux, qui n'a pas encore travaillé.

Les résultats les plus probants ont été obtenus par MM. Fried Krupp, A. G., à Essen. Le four marche régulièrement depuis janvier de cette année, et les résultats ont été si bons que cette maison s'est assuré les droits exclusifs du brevet pour l'Allemagne. Les résultats pour une campagne sont les suivants:—

Durée de la campagne, du 2 juin au 14 juillet ..	42 jours.
Nombre de charges	134
Temps moyen pour une charge	6½ heures.
Métal chargé	888 tonnes
Lingots satisfaisants obtenus	850
Pertes et déchets	33 tonnes ou 3.73 %
K.W.H. par tonne chargée y compris le chauffage du four	638
“ “ “ “ non compris “ “	623
“ “ “ tonne de lingot, non compris “ “	647
“ “ “ “ y compris “ “	663

Opérations possibles avec le four Frick.

(1) *Acier de qualité supérieure* (acier extra rapide, acier à outils). L'acier obtenu avec le four Frick a donné de bons résultats pour la fabrication d'outils pour différents usages. Des burins essayés au moulage se sont montrés égaux et supérieurs dans quelques cas à ceux en acier fondu au creuset. Ceci s'applique aussi aux lames de cisailleuse: des lames travaillant sur des barres ayant jusqu'à 1 pour cent de C, ont duré 64 heures et celles en acier au creuset 52 heures.

(2) *Acier forgé et laminé de bonne qualité.* (rails, bandages, arbres, fils) Des bandages en acier (C=0.65 à 0.70%) obtenus au four Frick ont donné les résultats suivants au choc :

Diamètre original du bandage = 1265 m/m = 49 $\frac{3}{4}$ ''.

Poids du "Mouton" = 1,000 kg. = 2,200 lbs.

No. des chutes	Hauteur des chutes	Pieds livres	Pieds livres	Diam. du bandage.	No. des chutes	Hauteur des chutes	Kgm	Pieds livres	Diam. du bandage
1	3 m.	3000	26000	1244	13	5 m	5000	43300	1102
2	"	"	"	1229	14	"	"	"	1090
3	"	"	"	1215	15	"	"	"	1079
4	"	"	"	1205	16	"	"	"	1069
5	"	"	"	1190	17	10 m.	10000	86600	1022
6	"	"	"	1188	18	"	"	"	987
7	"	"	"	1181	19	"	"	"	955
8	4 m.	4000	34700	1162	20	"	"	"	923
9	"	"	"	1149	21	"	"	"	898
10	"	"	"	1138	22	"	"	"	877
11	"	"	"	1127					
12	"	"	"	1118					
							Non cassé		

(3) *Moulages d'acier.* — L'acier électrique convient pour tous les moulages d'acier par suite de l'absence des gaz causant des soufflures, dans les moulages de Bessemer ou d'acier Martin. Dans les fours électriques un métal homogène d'une température presque illimitée pouvant être obtenue, l'on a des moulages parfaitement propres et solides aussi minces qu'ils soient.

Le "facteur d'énergie" relativement bas du four Frick n'influence pas le coût de la fusion, et à peine le prix de l'installation, mais seulement le prix de la dynamo.

D'après une formule exposée par l'inventeur dans un rapport lu devant la Swedish Metallurgical Society "Jern Kontoret" en mai 1905, le facteur d'énergie d'un four à inducteur étant $\cos \phi$, l'on a :

$$\text{tg } \phi = \frac{\omega}{15,950,000} \times \frac{1}{R} \left(\frac{1}{W_p} \times \frac{1}{W_s} \right)$$

ω = fréquence du courant alternatif.

R = résistance ohms du bain d'acier.

Wp = résistance magnétique autour de la bobine primaire.

Ws = " " " " " " secondaire.

ou du bain d'acier.

La même formule s'applique aux fours à arc et montre qu'une forte résistance électrique et un faible champ de dispersion magnétique augmente $\text{tg } \phi$ et diminue $\cos \phi$ ou le facteur d'énergie.

Dans un four à arc, la résistance électrique est concentrée dans l'arc, et demande un voltage de 50 à 60 volts pour être surmontée.

Dans le four Frick, le voltage nécessaire pour vaincre la résistance du bain est seulement de 8 à 12 volts.

La résistance magnétique du champ de dispersion est aussi très faible.

La conséquence de ceci est que la valeur de $\text{tg } \phi$ est très grande. C'est une bonne habitude de prendre $\text{tg } \phi$ de 10 en 10 périodes comme indication des conditions magnétiques et électriques du four. La valeur de $\text{tg } \phi$ 10 varie entre 0,6 et 5 pour les fours Frick de 1 à 15 tonnes.

La formule montre que $\text{tg } \phi$ augmente proportionnellement à la fréquence du courant. Comme une grande valeur de $\text{tg } \phi$ correspond à une petite valeur de $\cos \phi$, la meilleure façon d'avoir un facteur d'énergie très grand est d'employer un courant à basse fréquence.

Le facteur d'énergie n'a pas d'influence sur la consommation d'énergie du four; mais seulement sur la dimension et le prix de la dynamo.

Pour toutes les dimensions et forces de four, le courant monophasé est le meilleur, donnant le plus bas prix pour l'installation.

La fréquence varie de 5 à 15 périodes par seconde.

Dans tous les cas, le prix de la dynamo est plus élevé que pour un four à arc. Grâce aux conditions extraordinaires produites par la fréquence et le facteur d'énergie, on a pu simplifier la construction de la dynamo de façon à ce que la diminution du prix de revient influe très légèrement sur le prix de l'acier.

Dans le cas d'un four de 15 tonnes, 2,500 chevaux, l'augmentation du prix de la dynamo sur celui du type régulier serait seulement de £ 2,000, augmentant le prix de l'acier d'environ 0.15 sh. par tonne si c'est l'acier fondu qui est traité.

Pourquoi le courant monophasé est préférable au polyphasé. Comme on le verra plus loin, l'économie réalisable sur un four électrique dépend surtout de la diminution possible des pertes de chaleur par rayonnement qui atteignent 80 à 92 pour cent des pertes totales.

Comme, d'autre part, le rayonnement augmente avec la surface, toutes conditions étant égales, il est important de ne pas accroître inutilement cette surface.

La plus petite surface et, par suite la plus petite radiation est obtenue par l'emploi d'un creuset annulaire.

Pour employer un courant biphasé ou triphasé, deux ou trois creusets seraient nécessaires, et augmenteraient la surface radiante d'environ 30 pour cent.

Le seul avantage du courant triphasé est que l'alternateur est meilleur marché, mais cet avantage est contrebalancé par la plus grande consommation d'énergie, à moins que l'énergie soit très bon marché.

Exceptionnellement, on peut brancher un four électrique de petite capacité seulement sur une distribution existante à courant triphasé; mais,

en général, il est préférable d'avoir une dynamo séparée pour les fours, de façon à régler la consommation dans l'alternateur sans pour cela gêner les autres consommateurs.

La meilleure combinaison est d'avoir un alternateur pour chaque four.

Si un alternateur individuel est employé, il est inutile de compliquer le four, et l'on prendra le système le plus simple du courant monophasé.

Rendement et consommation d'énergie. — L'énergie électrique fournie au four est transformée :

(1) En pertes électriques dans la bobine primaire et le noyau magnétique. Ces pertes ne seront pas trop élevées si l'on emploie des dimensions suffisantes : généralement elles sont de 4 à 5%.

(2) En pertes calorifiques, au travers des murs par conductibilité du bain aux surfaces extérieures, et ensuite par radiation ou bien par rayonnement de l'acier au travers des ouvertures du four.

Ces pertes dépendent de la température de l'acier, de l'épaisseur et de l'isolement des murs, et enfin de la dimension des surfaces radiantes.

Les pertes par rayonnement dans un four Frick peuvent se représenter par :

$$W_r = 60 + 8 \text{ à } 10 \times G.$$

W_r = perte par radiation en kilowatts, pour une température de 1,500°.

G = capacité du four en tonnes.

Un four produisant de l'acier très carboné en partant de matériaux solides, a une plus basse température qu'un four produisant de l'acier pur carburé, lequel demande une plus haute température pour la coulée.

De même, la température moyenne d'un four traitant de l'acier déjà en fusion est plus élevée que pour un four traitant des matériaux solides.

Les pertes par rayonnement accroissent comme le carré de la température.

(3) En chaleur théoriquement requise pour la fusion de l'acier, des laitiers, et par les diverses réactions qui se produisent dans le four.

Pour se faire une idée approximative de la chaleur théoriquement nécessaire à une opération déterminée, les chiffres suivants sont très utiles :

l'énergie calorifique totale contenue dans une tonne	
d'acier à 1,400° C est de	330 K.W.H.
pour accroître la température d'une tonne d'acier ..	0.4 "
l'énergie moyenne pour fondre 1 tonne de laitier à	
1,400° C	600 "
pour accroître de 1° C la température d'une tonne de	
laitier	0.6 "
l'énergie nécessaire pour séparer l'acide carbonique	
d'une tonne de chaux	500 "

La chaleur produite par la plus grande partie des réactions chimiques dans un bain d'acier ou entre l'acier et les laitiers est connue avec assez

d'exactitude. Dans un rapport lu par M. Frick, (voir "Jern Kontoretts Annals" 1905) l'on trouve un tableau donnant les réactions les plus usuelles.

D'après des calculs basés sur ces données, il est démontré que :

L'énergie totale théoriquement nécessaire pour produire et fondre 1 tonne d'acier avec des matériaux solides contenant 0.1 pour cent de Si et oxydés au point que 0.1% de carbone est nécessaire à leur réduction, 4 kg. de chaux étant ajoutés pour former un laitier basique, si la température de coulée est 1550°C : 390 K.W.H.

Mêmes conditions, avec température de coulée à 1,650° C 430 " "

Energie théoriquement nécessaire pour surchauffer

une tonne d'acier liquide de

100° C par exemple de 1,500° à 1,600° C	60	"
150° C " " 1,500° à 1,650° C	40	"
200° C " " 1,450° à 1,650° C	80	"

Energie théoriquement nécessaire à l'élimination

de 0.1% de phosphore contenu dans 1 tonne d'acier liquide sans augmenter sa température si un laitier oxydant est formé avec 1% de P²O⁵, 50 pour cent de CaO, 20 pour cent de FeO et 10 pour cent de SiO², 15 pour cent de ce laitier étant formé à la livraison de l'acier 15 "

Température finale du laitier = 1,650° C.

Des calculs analogues peuvent être faits pour tous les cas; les précédents sont donnés seulement pour se faire une idée des grandeurs impliquées.

On peut maintenant facilement calculer la consommation d'énergie.

Exemple 1. — Un four de 10 tonnes travaille avec 8.5 tonnes et une consommation de 560 K. W. à la fusion de matériaux solides, comme précédemment, que l'on coule à 1,650° C.

Température moyenne du bain = 1,550° C

Pertes électriques 4.2 pour cent	=	23.5 K.W.
Pertes par rayonnement		160 "

Pertes totales 183.5 "

$$\text{Pourcentage des pertes totales} = \frac{183.5 \times 100}{560} = 32.8 \text{ pour cent}$$

Rendement du four = 430 K.W.H.

Energie théorique par tonne = 67.2 "

Consommation totale théorique = $\frac{430}{0.672}$ = 640 "

Consommation réelle d'après une marche prolongée du four 610 "

Exemple 2. — Si un four de 15 tonnes, consommant 1,600 K. W. pour surchauffer de l'acier d'un convertisseur basique, et 150° C pour éliminer 0.04% de phosphore et 0.06% de soufre.

Température de coulée 1700°	
Température moyenne 1625°	
Pertes électriques 4.0 pour cent	64 K.W.
Pertes par rayonnement	210 “
	<hr/>
Pertes totales	270 “
Pourcentage des pertes totales	17 pour cent
Rendement du four	83 “
Energie théorique par tonne	156 K.W.H.
Consommation totale théorique par tonne $\frac{156}{0.83} =$	188 “

On n'a pas encore traité d'acier liquide pour avoir des résultats certains, mais les chiffres précédents peuvent être considérés comme moyens.

La consommation d'énergie pour fondre des matériaux solides a été :—

- Pour un four de 1.8 tonnes, 180 kw. marchant à 150 kw. environ 800 K.W.H. par tonne.
- Pour un four de 3 tonnes, 400 kw. travaillant à 300kw. avec des matériaux très oxydés 750 “ “
- Pour un four de 10 tonnes, 736 kw. travaillant à 560 kw. et 8.5 tonnes 610 “ “

Il est très difficile de comparer, au point de vue consommation et rendement, le four Frick avec les autres fours électriques, par suite du manque d'informations sur les températures, poids des laitiers, etc.

On peut prendre comme base de comparaison entre les différents systèmes, les pertes totales correspondant à une température de l'acier de 1,500° C. Cette perte peut être fixée exactement par le réglage de l'énergie, de façon à garder cette température uniforme pendant 10 heures. En soustrayant les pertes électriques, que l'on peut calculer et mesurer spécialement, l'on a les pertes par rayonnement.

Coût de la production. — Le prix de revient dépend avant tout du prix de l'électricité.

Si l'on dispose d'un pouvoir hydraulique, le prix de l'électricité est généralement bas, variant entre 30 et 150 shillings par kilowatt-an. La pleine puissance pouvant être utilisée pendant 6,000 heures par an, chiffre modéré pour un four électrique, le prix par unité ou kilowatt-heure est de 0.005 sh. = 0.06 d., à 0.025 sh. = 0.3 d.

Si l'on marche avec le gaz des hauts-fourneaux ou des fours à coke, le prix du kilowatt-heure sera environ 0.017 sh. = 0.2 d.

Un gazogène avec récupération de l'ammoniaque peut aussi produire l'électricité à un prix unitaire de 0.017 sh. = 0.2 d.

Pour les petites installations, la vapeur peut être aussi économique et, pour plusieurs raisons, mieux appropriée que le gaz. A cause de la longue marche annuelle, il est mieux d'avoir une installation aussi moderne que possible; la machine devra utiliser la vapeur surchauffée et être du type Corliss ou autres modèle à valves de précision, et à marche lente. Le prix de revient de l'électricité ne doit pas dépasser 0.034 sh. = 04 d. par kw-heure, même avec une installation de seulement 250 chevaux.

Le prix du garnissage dépend de sa durée. Aux usines Krupp, des garnissages ont duré 6 semaines et dureront plus longtemps avec de la pratique. En traitant de l'acier en fusion, l'on peut maintenir à un même niveau la coulée de laitier; de cette façon les réparations des parties faibles sont plus faciles qu'avec l'emploi des matériaux solides.

Avec un peu d'attention et par l'addition de chaux en avant de la paroi intérieure, de légères réparations seront suffisantes.

Pour éviter des pertes de temps occasionnées par de fréquentes réparations, il vaut mieux utiliser les creusets le plus longtemps possible et avoir à sa portée un creuset de rechange de façon à ne pas prolonger l'interruption de la marche.

Le coût du garnissage y compris le prix de 0.04 d. par unité pour le courant nécessaire au chauffage du four à sa température normale, est à peu près:—

Pour un four de 1,800 kg.	=	900 sh.
“ “ 3,000 “	=	1,500 “
“ “ 10,000 “	=	3,000 “
“ “ 15,000 “	=	6,000 “

<i>Le nombre d'hommes employés, pour fondre des matériaux solides dans</i>			
un four de	1.8	3	10 tonnes.
Contremaître	1	1	1 “
Hommes pour charger			2 “
Hommes pour le charroyage et le pesage des matières premières	2	2	1 “
Hommes pour la poche et la coulée	1	1	2 “
Hommes pour les moules		1	1 “
Conducteur à la grue	1	1	1 “
<hr/>			
Total	5	6	8 “

Le nombre d'ouvriers supplémentaires pour le traitement de l'acier liquide d'un four Bessemer ou Martin, dépend du travail que doit fournir le four électrique.

Si l'acier est seulement chauffé et désoxydé, un ou deux hommes suffiront pour faire les additions au bain, nettoyer le trou de coulée et diriger les poches employées au transfert de l'acier d'un four à l'autre.

Si l'on doit déphosphorer, un ou deux hommes en plus deviendront nécessaires suivant la grosseur du four.

Pour donner une idée du prix de revient de la fonderie électrique, les calculs suivants ont été faits répondant à différentes conditions.

Exemple 1.—

Capacité du four	3 tonnes.
Puissance du four	300 K.W.
Durée du garnissage	6 semaines
Arrêts du dimanche	42 heures
Température de coulée	1550° C.
Matières premières solides et pures.	
Production annuelle de bons lingots	2,350 tonnes.
Travail du four: fusion et désoxydation	
	Coût par tonne.
Garnissage	sh. 4.7
Courant à 0.4 d.	“ 24
Salaires	“ 8.3
	<hr/>
Total	“ 37.6

Exemple 2.—

Capacité du four	10 tonnes
Puissance du four	560 K.W.
Durée du garnissage	6 semaines
Arrêts du dimanche	24 heures
Température de la coulée	1,650° C.
Matières premières pures et solides.	
Production annuelle de bons lingots	5,880 tonnes
Travail: fusion et désoxydation.	
	Coût par tonne.
Garnissage	sh. 3.8
Courant à 0.4 d.	“ 22
Salaires	“ 5.3
	<hr/>
Total	“ 31.1

Exemple 3.—

Capacité du four	10 tonnes
Puissance du four	560 K.W.
Durée du garnissage	6 semaines
Arrêts du dimanche	24 heures
Température de la coulée	1,650° C.
Matières premières: acier liquide à 1,450° C, déphosphoré dans un four Martin-Siemens.	
Production annuelle de bons lingots	26,000 tonnes.

Travail du four: surchauffage de 200° C et désoxydation:

	Coût par tonne.
Garnissage	sh. 0.8
Courant à 0.24 d = 0.02 sh.	" 2.7
Salaires	" 0.3
	<hr/>
Total	" 3.8

Exemple 4.—

Capacité du four	15 tonnes
Puissance du four	24 heures
Durée du garnissage	1,600 K. W.
Arrêts du dimanche	4 semaines
Température de la coulée	1,700° C.
Matières premières: acier liquide à 1,550° C. con- tenant 0.05% de P. 0.06% de S Provenant d'un convertisseur Bessemer acide.	
Production annuelle de bons lingots	39,000 tonnes.

Travail du four: surchauffage de 150°, élimination de 0.04% de P et 0.06% de S, désoxydation:

	Coût par tonne.
Garnissage	sh. 1.5
Courant à 0.2 d. = 0.0167 sh.	" 3.5
Salaires	" 0.4
	<hr/>
Total	" 5.4

Ces calculs ne donnent pas le prix de revient total de l'acier, ils ont pour but de montrer les variations que peut subir ce prix dans différentes conditions.

Pour avoir le prix de revient total, il faut ajouter: le prix des matières premières, de la chaux, du minerai, des désoxydants, des outils, le chauffage et la réparation des poches de coulée, les moules, les analyses, les réparations, l'intérêt et l'amortissement de l'installation, y compris les appareils de levage.

Ces items sont trop spéciaux et ne peuvent entrer en ligne de compte que pour des estimations particulières.

D'ailleurs l'amortissement de l'installation électrique est compris dans le prix de l'électricité.

Dans les exemples 3 et 4, les chiffres donnent le prix total supplémentaire provenant du passage de l'acier dans le four électrique, sans compter toutefois l'intérêt, l'amortissement et les réparations; dans l'exemple 4 environ 70 kg. de chaux et 20 kg. de minerai sont employés pour former le laitier.

Par ces calculs, l'on voit clairement que les fours électriques peuvent se travailler, dans de nombreux cas, conjointement avec d'autres fours.

Avantages revendiqués.

(1) Le four convient également à la fusion des matériaux, au surchauffage de l'acier liquide, provenant soit d'un convertisseur Bessemer, soit d'un four Martin, à la désoxydation, désulphuration et déphosphoration du métal. (Le four Roechling-Rodenhauser et tous les fours à arc, excepté le Stassano, peuvent difficilement servir à la fusion des matériaux solides.) des.)

(2) La charge appliquée est absolument fixe. Dans les fours à arc, des court-circuits causent de temps à autres de fortes variations.

(3) Avantages par suite de l'absence d'électrodes.

(a) Pas de dépenses pour les électrodes (montant de 1 sh. à 2 sh. par tonne).

(b) Pas de perte d'énergie (spécialement pour les électrodes à refroidissement d'eau Girod).

(c) Dans le traitement de l'acier en fusion, la pleine charge peut être atteinte avant que le chargement ne soit fini, (dans les fours à arc le courant ne peut être mis que quand le chargement est terminé.)

(d) Travail simplifié; le courant peut être maintenu pendant le décrassage, (dans les fours à arc, il faut enlever les électrodes).

(4) L'emploi de deux bobines plates en dessus et en dessous du creuset est préférable à celui d'une seule bobine, plus haute, située entre le noyau et la paroi intérieure du four (système Kjellin) et cela pour les raisons suivantes :

(a) Dans les mêmes conditions, le facteur d'énergie est plus grand, ou, pour un même facteur, l'on peut avoir des parois plus minces et un meilleur isolement du four, réalisant ainsi une économie de consommation.

(b) La disposition de l'appareillage électrique produit dans l'acier un léger mouvement suffisant pour faciliter les réactions et assurer l'uniformité, mais pas assez fort pour endommager la paroi intérieure du creuset ou gêner le travail.

(5) Le couvercle rotatif présente les avantages suivants:—

(a) On peut inspecter toutes les parties du creuset.

(b) Le chargement est simplifié.

(c) Les laitiers sont facilement enlevés.

(d) Les pertes par rayonnement sont moindres par suite du petit nombre d'ouvertures, et, par conséquent, les laitiers sont plus liquides.

(e) Réparations faciles.

(6) Un seul creuset à section uniforme est préférable à deux ou trois canaux étroits et à une large sole (système Roechling-Rodenhauser) parce que :

- (a) La chaleur est développée uniformément dans le bain, évitant ainsi toute transmission de charbon.
- (b) Pas de circulation intense.
- (c) Pour une même épaisseur de mur, la surface du four, et par suite la surface radiante est moindre.

(7) L'isolement bien compris réduit les pertes de chaleur au minimum, faisant le rendement total du four bien supérieur à ceux de tous les autres fours électriques.