

CALCUL ET ÉTUDE
DU
HAUT FOURNEAU

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DES CALCULS NÉCESSAIRES
POUR
L'ÉTUDE DE LA MARCHE DU HAUT FOURNEAU

PAR
CARL BRISKER
Ingénieur,
Professeur à l'École supérieure des Mines de Leoben.

TRADUIT DE L'ALLEMAND

PAR
L.-E. GRUNER
Ingénieur civil des Mines.

Avec 37 figures et de nombreux tableaux dans le texte.

PARIS ET LIÈGE
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
SUCCESSEUR DE BAUDRY ET C^e
PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1909

Tous droits réservés.

FA 669.1 BRI



UNIVERSITAT
POLITECNICA
DE CATALUNYA
BIBLIOTECA
C. TERRASSA

AVANT-PROPOS

Pour comprendre le fonctionnement du plus important des appareils métallurgiques, le Haut Fourneau, il est nécessaire de se familiariser complètement avec tous les calculs relatifs à la marche de cet appareil.

Ces études et ces calculs sont exposés dans ce livre, avec les explications et les tableaux numériques nécessaires pour que les points de vue nouveaux qu'il contient puissent être facilement compris.

Je crois avoir répondu à un besoin réel en publiant cet ouvrage, car les différences que présentent les procédés de calcul indiqués par les divers auteurs sont une cause de difficultés.

Je serais heureux de recevoir toutes les communications qui me permettraient d'améliorer et de développer les tableaux numériques contenus dans ce livre.

Leoben, juillet 1908.

CARL BRISKER.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x

I

LES MATÉRIAUX DE LA FUSION AU HAUT FOURNEAU

Fer carbonaté spathique. — Sphérosidérite. — Hématites brunes. — Minette et minerais analogues. — Hématites rouges. — Minerais magnétiques. — Pyrites grillées et autres produits d'usine. — Minerais de manganèse. — Additions, basiques et acides. — Combustibles : charbon de bois et coke. — Fontes. — Laitiers de haut fourneau. — Gaz du gueulard. — Poussières du gueulard. — Poids des matières au mètre cube.	1
--	---

II

CALCUL DU LIT DE FUSION

Consommation de combustible. — Laitier de haut fourneau. — Composants du laitier. — Fusibilité du laitier. — Recherches de Boudouard sur les laitiers. — Calcul du lit de fusion d'après Mrázek. — Calcul du lit de fusion d'après Platz. — Calcul graphique du lit de fusion d'après Mathésius. — Modifications du lit de fusion normal. — Teneur en soufre du mélange. — Composition du lit de fusion.	10
--	----

III

CALCUL DE LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE

La réduction au haut fourneau. — Equations de réduction. — Bilan thermique provisoire. — Calcul de la consommation de combustible	35
---	----

IV

CALCUL DE LA QUANTITÉ D'AIR INSUFFLÉ ET DES GAZ DU GUEULARD

Quantité d'air et pertes. — Calcul de la pression du vent et de la puissance indiquée des machines soufflantes. — Calcul de la quantité de gaz du gueulard. — Calcul de l'énergie disponible dans les gaz de gueulard.	57
--	----

V

BILAN THERMIQUE DU HAUT FOURNEAU

Discussion du bilan thermique. — Rendement du haut fourneau	69
---	----

VI

CALCUL DU PROFIL DU HAUT FOURNEAU

Volume. — Durée de l'opération. — Profil du haut fourneau. — Calculs théoriques.	73
--	----

VII

DIAGRAMME DU HAUT FOURNEAU 83

ANNEXE. — Tableaux pour les calculs.	93
--	----

INDEX ALPHABÉTIQUE.	101
-----------------------------	-----

LISTE DES FIGURES

Figure	1. Diagramme de Boudouard sur les éléments primaires des laitiers de haut fourneau.	15
—	2. Diagramme triangulaire.	16
—	3. — — de Boudouard sur les laitiers	17
—	4. — — de Mathésius sur la composition des laitiers du haut fourneau dans la marche en fonte grise.	27
—	5. Diagramme de Mathésius sur la composition des laitiers du haut fourneau dans la marche en fonte blanche	28
—	6. Calcul graphique du lit de fusion.	29
—	7. Diagramme triangulaire.	30
—	8. Échelle pour les calculs graphiques du lit de fusion.	30
—	9. Diagramme de l'état d'équilibre des divers oxydes de fer dans une atmosphère de CO et CO ²	36
—	10. Diagramme de la comparaison des températures du vent et des gaz du gueulard.	54
—	11. Croquis pour le calcul du profil	80
—	12. Diagramme du haut fourneau de Bärum	83
—	13. — — — de Wrbna, à Eisenerz.	84
—	14. — — — de Hammerby	85
—	15. — — — de Forssjö	86
—	16. — — — de Hasselfors.	88
—	17. — — — d'Eisenerz (Schöffel et Kupelwiesei).	89
—	18. — — — d'Audincourt.	90
—	19. — — — d'Alfreton	91

Profils de hauts fourneaux. 76-79

LISTE DES TABLEAUX

		Pages.
Tableau I.	Minerais de fer spathiques	1
— II.	Sphérosidérîtes	2
— III.	Hématites brunes	2
— IV.	Minettes et minerais analogues	3
— V.	Hématites rouges	3
— VI.	Minerais magnétiques	4
— VII.	Déchets de grillage des pyrites et autres produits d'usines employés comme minerais	4
— VIII.	Minerais de manganèse	5
— IX.	Additions, basiques et acides	5
— X.	Combustibles : charbon de bois et coke	6
— XI.	Diverses sortes de fontes	6
— XII.	Laitiers de haut fourneau	7
— XIII.	Gaz du gueulard	8
— XIV.	Poussières du gueulard	8
— XV.	Poids du mètre cube des différentes matières	9
— XVI.	Consommation normale de combustible dans la marche du haut fourneau	11
— XVII.	Proportion des éléments dans les divers composés, et inverses de ces chiffres	20
— XVIII.	Calcul du lit de fusion d'après Mrázek	23
— XIX.	Rapport des bases aux acides	24
— XX.	Calcul du lit de fusion d'après Platz	25
— XXI.	Calcul du lit de fusion	31
— XXII.	— de l'analyse de la fonte d'après le lit de fusion	32
— XXIII.	Composition du lit de fusion pour obtenir 100 kilogrammes de fonte	33
— XXIV.	Réduction des divers éléments	42
— XXV.	— — —	43
— XXVI.	Réductions dans l'exemple étudié	44
— XXVII.	Bilan thermique provisoire	45
— XXVIII.	Valeurs de $\frac{1000}{a-b}$	50
— XXIX.	Valeurs de $m = \frac{CO^2}{CO}$	59
— XXX.	Valeurs du facteur A dans la formule du calcul de la puissance indiquée des machines soufflantes	61
— XXXI.	Calcul de la pression de vent nécessaire	62
— XXXII.	Calcul des gaz du gueulard	63

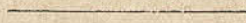
LISTE DES TABLEAUX

xi

Tableau	XXXIII. Chiffres relatifs aux gaz de différents fourneaux	65
—	XXXIV. Bilan thermique.	69
—	XXXV. Conditions de marche de quelques fourneaux.	71
—	XXXVI. Dimensions normales pour le calcul du profil	80

ANNEXES

Tableau	I. Tables pour les calculs calorimétriques	94
—	II. Chaleurs spécifiques moyennes des gaz facilement liquéfiables.	96
—	III. — — — — — difficilement liquéfiables	96
—	IV. Equivalents mécaniques de la chaleur	97
—	V. Humidité de l'air.	97
—	VI. Poids du mètre cube d'air	97
—	VII. Table de $n = 1,0$ à $0,01$	98



I

LES MATÉRIAUX DE LA FUSION AU HAUT FOURNEAU

L'exécution des calculs nécessaires pour la conduite du haut fourneau exige la connaissance de la composition chimique des matières à traiter et de celles que l'on veut obtenir. Il faut donc, avant d'entreprendre l'exposé de ces calculs, indiquer un certain nombre d'analyses de chacune de ces matières.

On les trouvera réunies dans les tableaux ci-dessous (tabl. I-XV).

TABLEAU I. — Fers carbonatés spathiques.

	Fe ² O ³	FeO	Fe	Mn ² O ⁴	MnO	Mn	Cu	Al ² O ³
1. Minerai d'Eisenerz, cru, analyse normale.	16,26	30,77	»	»	3,04	»	»	3,29
2. Minerai d'Eisenerz, grillé, analyse normale.	69,20	0,89	»	4,51	»	»	»	3,68
3. Minerai d'Eisenerz, cru	»	»	38,93	»	»	2,15	»	2,09
4. Minerai d'Eisenerz grillé.	»	»	51,80	»	»	2,84	»	2,81
5. Rudobanya	»	»	45,2	»	»	2,4	0,1	2,3
6. Kotterbach, grillé.	»	»	46,7	»	»	2,5	0,4	1,4
7. Minerai de Siegen.	»	»	38,86	»	»	9,2	0,3	»
8. Minerai de Thuringe, cru	»	»	33,7	»	»	5,10	0,02	1,32
9. Minerai d'Innerberg, grillé.	»	»	45,34	»	»	2,82	»	1,95
10. Fer spathique d'Eisenerz, grillé.	»	»	50,92	»	»	2,76	»	3,52
11. Fer spathique de Bosnie (Droskovich)	»	»	45,9	»	»	5,08	0,02	n. d.
12. Fer spathique de Bosnie (grillé).	»	»	57,66	»	»	6,17	0,08	n. d.

(Suite).	SiO ²	CaO	MgO	P ² O ⁵	S	CO ²	H ² O
1. Minerai d'Eisenerz cru, analyse normale.	4,98	7,52	3,87	0,08	0,27	28,05	1,87
2. Minerai d'Eisenerz, grillé, analyse normale.	9,42	5,46	4,75	0,12	0,32	1,44	0,21
3. Minerai d'Eisenerz, cru	8,20	3,06	2,92	0,017	»	29,04	2,05
4. Minerai d'Eisenerz, grillé	11,04	4,12	2,92	0,022	»	2,57	
5. Rudobanya	10,3	1,9	1,2	0,024	BaSO ⁴ 3,2	12,0	
6. Kotterbach, grillé.	8,0	1,1	6,6	0,01	»	n. d.	
7. Minerai de Siegen	0,22	0,7	0,51	tr.	0,03	n. d.	
8. Minerai de Thuringe, cru	1,68	4,51	3,61	0,01	n. d.	28,81	
9. Minerai d'Innerberg, grillé	12,33	6,65	1,59	0,06	»	8,75	
10. Fer spathique d'Eisenerz, grillé.	9,21	5,76		0,03	0,35	1,26	0,40
11. Fer spathique de Bosnie (Droskovich)	6,55	n. d.	n. d.	4,62	P	n. d.	
12. Fer spathique de Bosnie (grillé).	7,04	n. d.	n. d.	0,02	0,30	n. d.	

Nota. — Minerais 1-6 d'après l'auteur, 7 et 8 d'après Ledebur; 9 d'après Dürre, 11 d'après Stahl und Eisen, 1902, p. 491.

TABLEAU II. — *Sphérosidérites (sphérosidérites argileuses et minerais houillers).*

	Fe	Mn	Cu	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	C	CO ² H ² O
1. Blackband traité à Kladno, d'après l'auteur	48,36	—	—	3,41	15,23	—	—	0,41	0,35	21,46	—
2. Sphérosidérite, Staffordshire, Wedding II, 88	36,14	1,12	—	4,80	10,17	0,76	0,94	0,33	—	—	32,96
3. Minerai houiller de Shelton, Staffordshire	36,20	1,97	—	1,23	1,93	2,44	1,39	—	0,18	10,46	32,24
4. Blackband traité à Hörde (St. u. E. 1896, p. 266)	21,21	0,57	—	1,64	4,98	2,87	1,27	0,58	1,06	—	58,56
5. Blackband, grillé, de Westphalie (Dürre I, 136)	52,12	1,21	—	5,75	9,64	3,15	1,96	0,49	0,79	—	3,0
6. Blackband, grillé, de Westphalie (St. u. E. 1896, p. 260)	47,66	1,21	—	3,62	9,75	6,39	2,84	1,57	1,29	—	1,60
7. Sphérosidérite argileuse, Vogtland (Ledebur I, 229)	37,30	10,48	0,03	11,84	21,92	0,27	1,19	0,68	0,04	—	9,00
8. Sphérosidérite de Jeckelsdorf, Witkowitz, d'après l'auteur	27,0	0,38	0,02	5,7	53,3	0,4	0,17	0,017	—	—	—

TABLEAU III. — *Hématites brunes (Limonites).*

	Fe	Mn	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	CO ² H ² O	Zn	Pb
1. Bilbao (St. u. E. 1882, p. 339)	54,80	0,57	1,15	8,80	0,50	0,02	0,02	0,04	10,55	—	—
2. Nucic, traité à Kladno, d'après l'auteur	43,04	0,08	8,47	17,27	4,56	2,43	2,68	0,77	—	—	—
3. Erzberg de Carinthie (Glaskopf)	49,12	3,00	0,91	9,35	0,15	0,11	0,21	0,60	14,26	—	—
4. Minerai de Thuringe, de la mine de Sulzbach (St. u. E. 1882, p. 35)	50,68	1,90	3,21	8,68	—	—	0,92	—	12,14	—	—
5. Gömör (Hongrie) d'après Kerpely : minerais de fer de Hongrie, p. 32)	57,11	—	2,23	3,30	1,53	—	0,21	0,30	10,77	—	—
6. Minerai de Haute Silésie, Tarnowitz, d'après Ledebur	36,39	3,50	6,22	17,95	0,40	0,27	0,28	—	—	3,15	0,07
7. Limonite de Bosnie (St. u. E. 1902, p. 491)	48,70	2,00	1,35	6,28	0,7	0,39	0,25	0,12	—	Cu 0,26	—

TABEAU IV. — *Minette et minerais analogues.*

	Fe	Mn	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	CO ²	H ² O
1. Minette verte, Moyeu- vre, d'après Ledebur.	39,79	0,48	6,21	8,70	6,25	1,47	0,74	—	5,76	8,20
2. Minette rouge, Bel- vaux (Dürre I, 75).	40,90	—	4,95	16,63	3,59	0,49	1,13	0,1	4,25	11,78
3. Minette brune de Re- dingen (Dürre I, 79).	21,69	—	3,88	14,71	28,25	0,30	0,48	0,05	18,89	9,81
4. Minerai liasique de Hof, Königin Marien- hütte (Ledebur).	42,53	0,38	10,25	13,90	0,85	0,59	0,44	—	—	—
5. Minerai en grains d'Adenstedt près Peine (Ledebur).	45,25	5,03	3,54	4,35	4,69	—	1,53	—	—	11,73
6. Minerai de Smaland, Karsten II, 48 . . .	53,10	0,55	1,76	7,05	2,95	0,08	0,29	0,01	—	10,83
7. Minette de Belvaux (St. u. E. 1901, p. 1028).	38,32	0,54	6,16	14,60	6,40	0,74	0,87	—	—	—
8. Minette grise d'Esch (St. u. E. 1901, p. 1028).	30,84	0,39	5,49	8,01	19,04	0,83	0,69	—	—	—
9. Minette rouge cal- caire d'Esch (St. u. E. 1901, p. 1028).	16,13	0,16	4,66	5,15	35,04	0,43	0,44	—	—	—

TABEAU V. — *Hématites rouges.*

	Fe	Mn	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	CO ²	H ² O
1. Amérique du Nord. Lac Supérieur (Wed- ding: usines de l'Amé- rique du Nord, p. 14).	62,91	—	1,39	5,89	0,70	0,42	0,25	0,12	—	1,26
2. Russie méridionale Kriwoï Rog (St. u. E. 1901, p. 64)	58,85	0,23	4,56	7,85	0,22	0,21	0,07	0,07	—	2,55
3. Nord de l'Afrique Mokta (Dürre I, 45).	62,54	1,93	1,71	3,80	—	0,50	0,09	0,05	Cu 0,09	1,63
4. Hématite rouge de Przici, Bosnie (St. u. E. 1902, p. 491)	65,07	0,53	1,00	4,14	0,48	0,26	—	0,04	Cu 0,01	—
5. Hématite bleue de Przici, Bosnie (St. u. E. 1902, p. 491)	61,20	0,11	0,68	6,05	0,35	—	0,075	0,16	—	—
6. Hématite de Dros- kowich, Bosnie (St. u. E. 1902, p. 491)	54,30	2,53	2,20	11,20	1,83	1,74	0,31	0,23	Cu 0,01	—

TABLEAU VI. — *Magnétites, minerais magnétiques.*

	Fe	Mn	Cu	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	TiO ²	H ² O
1. Minerai de Gellivara, riche en P; Witkowitz (d'après l'auteur)	65,3	0,1	—	1,5	3,3	2,3	1,1	0,6	—	—	—
2. Minerai de Freya, pauvre en P; Witkowitz (d'après l'auteur)	65,4	0,16	0,00	2,0	4,8	0,8	1,2	0,02	—	—	—
3. Minerai de Gellivara, non grillé (Jernkontorets Annaler, 1900, p. 493)	66,72	0,15	Tr.	0,32	1,75	1,18	1,53	0,041	0,034	0,23	—
4. Minerai de Gellivara, grillé (Jernkontorets Annaler 1900, p. 493)	61,14	0,69	—	2,26	7,50	1,75	1,93	0,016	—	—	—
5. Oural : Wiskokaïa gora (St. u. E. 1901, p. 64)	63,00	1,60	—	1,90	3,12	2,13	1,40	0,04	—	—	2,13
6. Oural : Blagsdal gora (St. u. E. 1901, p. 64)	60,00	1,30	—	2,40	7,10	3,41	1,22	0,09	0,20	—	0,95
7. New Jersey (Wedding Usines de l'Amérique du Nord, p. 6)	52,96	—	—	9,48	9,80	1,46	0,72	0,53	0,15	4,10	0,68
8. Reschitza	58,67	0,29	—	1,69	11,48	2,96	1,80	0,16	0,24	—	1,30
9. Grängesberg	63,17	0,29	—	1,00	3,48	2,07	0,91	0,11	—	—	1,06

TABLEAU VII. — *Pyrites grillées et autres produits d'usines employés comme minerais.*

	Fe	Mn	Cu	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	Pb	Zn	As	Sb
1. Pyrite grillée, Witkowitz, d'après l'auteur	50,24	0,12	0,12	2,04	4,82	0,26	0,14	0,005	—	—	—	—	—
2. Pyrite grillée (Ledebur I, 240)	65,80	Tr.	0,02	n. d.	1,66	0,10	Tr.	0,01	0,67	0,14	0,03	0,00	0,02
3. Pyrite grillée (Ledebur I, 240)	63,62	0,04	0,04	1,82	4,67	0,46	0,12	0,01	0,55	0,45	0,24	0,05	0,06
4. Pyrite grillée (Ledebur I, 240)	64,94	0,02	0,12	0,26	2,77	0,41	0,07	0,01	0,47	1,07	0,25	0,03	0,04
5. Pyrite grillée, Witkowitz, d'après l'auteur	63,0	0,17	0,06	1,7	5,3	0,6	0,5	0,01	—	—	—	—	—
6. Scories de réchauffage, Witkowitz, d'après l'auteur	49,20	1,08	0,07	2,73	31,45	0,14	0,10	0,06	—	—	—	—	—
7. Scories de réchauffage, Donawitz (Jahrb. f. Eisenh., 1900, p. 207)	47,27	1,67	—	1,08	32,85	0,90	0,36	—	—	—	—	—	—
8. Scories d'affinage (scorie brute)	40,89	5,29	—	—	30,5	4,82	4,2	n. d.	n. d.	—	—	—	—
9. Scories d'affinage (scorie riche)	57,08	3,68	—	1,23	14,18	1,28	—	0,35	0,13	—	—	—	—
10. Scories de puddlage	50,0	4,0	—	1,0	25,0	3,0	2,0	2,0	—	—	—	—	—

TABLEAU VIII. — *Minerais de manganèse.*

	Fe	Mn	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	Cu
1. Minerai de manganèse de Jakobenyi, Fordergut, Witkowitz. . .	11,5	40,1	1,7	12,0	1,1	0,2	0,4	»	0,02
2. Minerai de manganèse de Jakobenyi, Graupen, Witkowitz . . .	8,8	45,5	0,5	8,0	0,2	0,2	0,3	»	0,02
3. Minerai de manganèse de Jakobenyi, déchets, Witkowitz. . .	12,7	31,0	2,8	23,3	0,8	0,1	0,4	»	0,02
4. Minerai du Caucase, Witkowitz, d'après l'auteur	1,1	49,8	1,7	10,5	1,3	Tr.	0,17	»	0,03
5. Minerai du Brésil, Witkowitz, d'après l'auteur	3,3	50,1	5,6	1,9	0,3	0,1	0,07	»	0,05
6. Minerai des Indes (<i>St. u. E.</i> , 1902, p. 894).	5,6	40,1	n. d.	9,52	n. d.	n. d.	0,09	»	»
7. Pyrolusite d'Huelva (Kerpely).	1,89	52,78	1,40	6,20	3,40	»	0,15	»	»
8. Pyrolusite d'Huelva (<i>St. u. E.</i> , 1896, p. 268).	5,02	44,74	n. d.	13,95	n. d.	n. d.	0,10	»	»
9. Minerai du Canada (<i>St. u. E.</i> , 1896, p. 268).	1,40	55,03	n. d.	8,30	n. d.	n. d.	0,01	»	»
10. Minerai de Hongrie (d'après Kerpely, <i>Ind. métall. en Hongrie</i> , p. 42).	14,24	51,98	2,50	2,15	0,30	»	0,12	0,02	»
11. Minerai du Nassau (Dürre).	11,63	36,87	n. d.	15,15	n. d.	»	0,14	»	»
12. Oural, Nischni Tagilsk (<i>St. u. E.</i> , 1901, p. 64).	7,80	57,60	2,97	2,75	2,20	1,60	0,02	»	»
13. Oural, Sapalski (<i>St. u. E.</i> , 1901, p. 64).	7,20	54,80	6,56	2,50	0,18	0,52	0,03	»	»

TABLEAU IX. — *Additions, basiques et acides.*

	CaO	MgO	Fe	Mn	Al ² O ³	SiO ²	P	S	CO ²
a) <i>Additions basiques :</i>									
1. Calcaire cristallin de Meissen (Ledebur) . . .	51,85	»	Tr.	Tr.	»	2,10	»	Tr.	40,75
2. Calcaire cristallin de Hongrie (Ledebur) . . .	52,58	1,58	0,51	»	0,12	1,17	»	Tr.	43,06
3. Castine de Limburg a. d. Lenne (Dürre). . .	55,33	1,86	»	»	0,75	2,10	0,01	0,11	42,89
4. Castine dolomitique de l'Eifel (Dürre). . . .	33,21	16,00	0,77	»	4,70	2,40	n. d.	n. d.	n. d.
5. Castine dolomitique de Saxe (Ledebur) . . .	26,65	16,48	3,42	Tr.	Tr.	11,00	»	n. d.	41,17
6. Castine dolomitique de Königin Marienhütte (Ledebur)	29,06	11,34	0,26	»	0,71	1,54	»	n. d.	n. d.
7. Castine ferrugineuse de Thuringe (Ledebur).	33,64	0,70	16,35	2,82	0,63	1,92	»	n. d.	n. d.
8. Castine dolomitique de l'Oural (Ledebur) . . .	39,40	13,00	0,50	0,10	0,40	2,25	0,02	0,04	44,50
9. Castine de Dornap, Niederrhein (Ledebur). . .	54,21	1,35	0,50	»	0,20	0,86	n. d.	n. d.	n. d.
b) <i>Additions siliceuses (d'après Ledebur) :</i>									
			FeO				Alcalis, Eau, Acide carbonique.		
1. Schistes argileux.	3,0		8,0	»	19,0	60,0			10,0
2. Gabbro	10,0		15,0	»	15,0	50,0			10,0
3. Diabase.	10,0		13,0	»	16,0	50,0			11,0
4. Granite	2,0		2,0	»	16,0	72,0			8,0

TABLEAU X. — Combustibles, charbon de bois et cokes.

	L'UNITÉ DE POIDS CONTIENT						MENU
	C	H	O + Az	S	Cendres.	H ² O	
Charbon de bois dur . . .	84,5	0,6	3,4	Tr.	3,5	8,0	5-6 p. 100
— tendre . . .	84,0	0,6	3,4	Tr.	3,0	9,0	5-6 —
— (Russie) . . .	75,04	3,49	19,83	»	0,90	»	»
Coke de Westphalie . . .	79-80,3	1,0	2,0	0,7-1,3	13-14	3,0	7-10 p. 100
Coke de Belgique . . .	81,5	1,0	2,0	0,9	12,0	2,6	»
Coke d'Autriche . . .	80,4-82,6	1,0	2,0	1,2-1,4	10-12	3,2	11-12 p. 100
Coke de Haute-Silésie . . .	»	»	»	»	»	»	»
Gottersberg . . .	»	»	»	1,3	10-12	»	»
Westphalie . . .	85,06	0,86	7,68	»	6,40	»	»
— . . .	91,77	1,26	0,04	»	6,93	»	»
— . . .	83,49	0,74	5,47	»	10,31	»	»
Sarrebrück . . .	86,49	1,98	3,02	»	8,54	»	»
Haute-Silésie . . .	84,87	0,44	1,69	1,08	13,00	»	»
Liège . . .	81,05	0,38	1,38	1,22	12,00	»	»
Charleroi . . .	78,30	0,42	1,59	0,92	14,32	»	»
Durham . . .	92,02	0,47	»	1,25	7,28	»	»
Ecosse . . .	92,05	0,43	»	0,78	5,75	»	»
Etats-Unis, Connelsville . . .	89,58	0,46	»	0,82	9,11	»	»
Etats-Unis, Alabama . . .	88,22	0,99	»	0,56	11,32	»	»

O. Simmersbach, *L'Industrie du fer*, p. 21.

Analyse des produits complètement desséchés.

	ANALYSE DES CENDRES								
	Alcalis.	SiO ²	Al ² O ³	CaO	MgO	Mn	Fe	P ² O ⁵	CaS
Charbon de bois dur . . .	18,59	1,96	3,4	30,75	10,33	2,5	0,56	5,12	»
— tendre . . .	13,04	1,80	»	39,25	10,80	3,8	2,1	0,36	»
— (Russie) . . .	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Coke de Westphalie . . .	»	45,0	25,0	5,0	5,0	»	7,0	»	10,0
Coke de Belgique . . .	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Coke d'Autriche . . .	»	42,9	28,0	9,0	3,4	0,2	5,2	P 0,7	»

TABLEAU XI. — Différentes sortes de fonte.

	C	Si	Mn	P	S	Cu
Fonte Martin	3,5	0,5	1,5-2,5	0,3	0,1	D'après la teneur de la charge, tout le cuivre étant réduit.
Fonte de puddlage	3,0-3,5	1,5-2,5	1,0-2,0	1,0	< 0,05	
Fonte Bessemer	3,0-3,5	1,2-2,5	2,0	< 0,03	< 0,05	
Fonte Thomas	3,25	< 0,5	1,0-2,0	2,5-3,0	< 0,05	
Fonte de moulage	3,25	1,5	0,2	0,75	< 0,05	
Fonte noire	4,0-4,5	2-3,5	très peu	0,75	< 0,05	
Fonte grise	3,5	1,5-2,0	peu	0,75	< 0,05	
Fonte hématite	3,2	1,75	0,2	< 0,1	< 0,05	
Fonte truitée	3,0	1,0	1,0	»	»	
Fonte blanche	3,2	< 1,0	> 1,0	0,1-3,0	(0,05-0,2)	
Spiegeleisen	4-5	très peu.	5-20,0	0,15	»	
Ferromanganèse	— 7,5	< 1,4	jusqu'à 80,0	minim.	»	
Ferrosilicium	1,5	— 15,0	1,0	minim.	0,02	
Silicospiegel	1,5	— 15,0	— 20,0	0,05	Tr.	

TABLEAU XII. — *Laitiers de haut fourneau.*

	DANS LA MARCHÉ EN							
	FONTE GRISE		FONTE BLANCHE		SPIEGELEISEN	FERROSILICIUM (avec 14 p. 100 Si d'après Ledebur).	FERROMANGANÈSE	
	Fourneaux au bois.		Fourneaux au coke.		Fourneaux au bois.		Fourneaux au coke.	
	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	Max. Min. Moyenne.	
SiO ²	66,9 — 40,95 50	37,10 — 23,59 30 — 35	48,8 — 43,7 47	40,65 — 29,85 35	41,22 — 29,00 30	37,50 — 27,70 32	36,60 — 23,50 27	
Al ² O ³	14,08 — 3,33 6	24,69 — 7,14 10 — 15	10,40 — 6,63 7	19,50 — 4,44 7	11,60 — 6,45 8	24,56 — 12,40 18	15,30 — 8,10 13	
MgO	16,32 — 0,57 2,5	13,41 — 1,58 5,0	13,17 — 4,11 4,5	12,23 — 2,03 6	8,51 — 1,48 7	6,97 — 3,45 5	5,14 — 0,86 4	
CaO	38,14 — 17,00 33	49,51 — 31,26 39	26,50 — 21,77 24	46,73 — 32,90 38	43,05 — 9,55 35	41,20 — 25,92 32	48,94 — 19,98 40	
MnO	6,30 — 0,85 2	4,91 — 0,20 10	11,30 — 5,10 8	13,58 — 0,46 5	39,49 — 2,97 9	0,37 — Tr. 0,25	27,69 — 7,56 17	
FeO	2,70 — 0,60 0,9	1,60 — 0,27 0,6	2,26 — 0,13 1	2,98 — 0,19 0,6	1,54 — 0,42 0,75	0,31 — Tr. 0,25	0,74 — Tr.	
Alcalis	3,83 — 0,32 —	2,35 — Tr. 1,0	2,22 — Tr.	n. d.	n. d.	1,93 — 1,01 1,5	n. d.	
CaS	2,10 — 0,03 0,4	9,08 — 1,33 4,7	1,40 — 0,20 1,2	4,36 — 1,05 3	4,15 3 — 4	7,76 — 5,33 6,0	— 4	
Degré d'acidité .	2,4 — 1,1 1,5	1,0 — 0,5 0,75	1,6 — 1,3 1,3	1,2 — 0,77 1,0	1,4 — 1,8 0,8	—	0,70	
D'après Ledebur {	SiO ² 45—65 Al ² O ³ 10—5 Bases. 45—30	30—35 15—10 50—55	45—50 10—5 45—45	30—40 10—5 60—55	30 10 MnO 5—15%, CaO, MgO 55-45	— — —	— — —	
	Laitiers pas plus basiques que les protosilicates. Avec les minerais riches en MgO addition de castine.	Vu le S du coke, laitier ne dépassant pas le protosilicate.	Laitier facilement fusible. Teneur en Al ² O ³ faible. Avec des fontes rayonnées (riches en Mn) 2/3 du Mn dans le laitier.	Laitier facilement fusible. Faible teneur en Al ² O ³ . Plus la fonte doit être riche en P (fonte Thomas) plus la teneur du laitier en FeO doit être faible.	Minerais facilement réductibles. Addition de minerai de Mn. Les minerais doivent être pauvres en P. Teneur en Mn du laitier = 20 à 30 p. 100 de la teneur de la charge. Rendre la teneur en Al ² O ³ aussi faible que possible.	Minerais facilement réductibles, pauvres en phosphore. Une teneur en Si plus forte dans le laitier serait nuisible vu le S du coke. Laitiers riches en alumine.		

LES MATÉRIAUX DE LA FUSION AU HAUT FOURNEAU

TABLEAU XIII. — *Gaz du gueulard.*

	VOLUMES P. 100					CALORIES pour 1 mc ³
	CO ₂	CO	H	O	Az	
a) <i>Hauts fourneaux au coke :</i>						
Moyenne (Lürmann, St. u. E. 1901, p. 1154)	9,37	23,84	2,96	CH ⁴ 0,54 (H ² O 5,29)	56,00	877
1. Kladno, four n° 1, fonte Thomas.	12,7	26,1	1,0	—	Différence	805
2. Kladno, four n° 2, fonte Thomas.	16,4	22,8	1,7	—	Différence	725
3. Kladno, four n° 3, gaz normal.	12,8	26,9	1,5	—	Différence	842
4. Eisenerz, fonte Martin	11,0	25,0	3,0	0,4	60,6	—
5. Donawitz, fonte Martin	13,0	23,5	2,5	—	61,0	—
6. Westphalie, fonte Bessemer	12,12	24,78	2,03	—	61,07	—
7. Lorraine, fonte de moulage	9,76	26,20	2,76	CH ⁴ 2,19	58,81	—
8. Lorraine, fonte de puddlage	14,0	24,0	—	—	62,0	—
9. Lorraine, fonte Thomas	10,0	25,0	—	—	65,0	—
10. Haute-Silésie	6,2	30,8	3,0	—	60,0	—
11. Luxembourg	13,80	23,50	2,33	0,60	59,77	—
b) <i>Hauts fourneaux au char- bon de bois :</i>				CH ⁴		
12. Suède, fonte hématite	10,88	28,29	2,61	4,96	53,26	—
13. Suède, fonte de moulage	7,63	29,70	2,00	4,20	56,47	—
14. Suède, fonte Martin	6,70	31,10	2,20	4,53	55,47	—
15. Suède, fonte Spiegel	10,45	27,49	3,25	8,45	50,36	—
16. Suède	14,8	23,1	0,5	4,3	57,3	—
	Pour un tonne de fonte on obtient par mi- nute environ 3 m ³ ,5 de gaz.					
Analyses 6-16 d'après O. Simmersbach. <i>L'industrie du fer</i> , p. 36.						

TABLEAU XIV. — *Poussières du gueulard.*

	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	ZnO
1. Kladno, d'après l'auteur	24,56	29,04	8,83	6,31	0,52	12,31	2,62
2. Donawitz, d'après l'auteur	12,98	9,08	3,42	56,00	3,08	2,04	—
3. Fourneau au charbon de bois d'après Ledebur	35,88	16,64	1,97	3,46	2,40	4,94	2,23
4. Fourneau au charbon de bois d'après Ledebur	52,66	4,12	Tr.	23,70	3,04	2,26	—
5. Fourneau au coke à Mülheim ¹ .	24,05	25,95	2,31	0,91	0,37	10,09	1,30
6. Fourneau au coke à Gleiwitz ² .	7,45	3,14	2,90	20,41	1,34	2,07	26,88
7. Fourneau au coke à Esch ³ .	10,10	8,20	—	29,5	0,5	10,73	7,45
8. Marche en fonte manganésée ⁴ .	27,50	12,2	1,57	8,52	31,9	3,31	1,70
¹ Stahl und Eisen 1882, p. 216. ² Ztschr. f. Berg, Hütten- und Salinenwesen, Vol 12, p. 266. ³ Stahl und Eisen 1890, p. 593. ⁴ D'après Valton-Ledebur, <i>Métallurgie du fer</i> , Vol, II, p. 129.							

TABLEAU XIV. — Poussières du gueulard (Suite).

(Suite).	PbO	K ² O Na ² O	SO ³	P ² O ⁵	CO ²	C	S	Cl
1. Kladno, d'après l'auteur. . .	—	4,00	n d.	4,49	11,61	0,73	1,29	—
2. Donawitz, d'après l'auteur. . .	—	2,039	1,52	0,101	6,19	12,97	—	—
3. Fourneau au charbon de bois d'après Ledebur.	—	12,84	20,89	0,10	—	—	—	Tr.
4. Fourneau au charbon de bois d'après Ledebur.	—	5,02	4,01	—	n. d.	—	—	Tr.
5. Fourneau au coke à Mülheim ¹ .	—	26,59	—	—	n. d.	—	1,71	—
6. Fourneau au coke à Gleiwitz ² .	13,63	7,96	—	—	4,36	7,04	0,24	—
7. Fourneau au coke à Esch ³ . . .	n. d.	2,17	0,58	1,63	—	13,74	—	—
8. Marche en fonte manganésée ⁴ .	n. d.							

¹ Stahl und Eisen 1882, p. 216.
² Ztschr. f. Berg, Hütten- und Salinenwesen, Vol. 12, p. 266.
³ Stahl und Eisen 1890, p. 593.
⁴ D'après Walton-Ledebur, *Métallurgie du fer*. Vol. II, p. 129.

TABLEAU XV. — Poids du mètre cube des différentes matières.

1 MÈTRE CUBE ==	KG.	1 MÈTRE CUBE ==	KG.
1. Ferspathique d'Eisenerz, fin.	2200	Castine	1500—1600
2. Fer spathique d'Eisenerz, gros	2150		
3. Fer spathique d'Eisenerz, grillé	1900	Coke.	450 *
4. Hématite rouge.	1800—2480	Charbon de bois tendre.	150 *
5. Hématite brune, Bilbao . . .	2100	Charbon de bois dur . .	250 *
6. Hématite brune, minerai de la Lahn	1800—1900		
7. Hématite brune de Haute- Silésie	1350		
8. Fer spathique du pays de Siegen, non grillé.	2125—2275	*) Variable avec le degré d'humidité.	
9. Fer spathique du pays de Siegen non grillé	1830—1970		
10. Fer spathique, Bilbao, grillé.	2100		
11. Scories de puddlage et d'af- finage	1850—2100		
12. Minettes	1.00—1510		
13. Pyrite grillée	1400—1900		
14. Sphérosidérite argileuse . .	1780		
15. Limonite.	1310		
16. Minerai magnétique	2990		
17. Minerai de Poti	2080		

4-17 d'après Stahl und Eisen, 1906, p. 442.

II

CALCUL DU LIT DE FUSION

Le calcul du lit de fusion consiste à fixer les proportions des matières à charger dans le fourneau pour obtenir, dans des conditions de marche normales, une fonte de composition déterminée.

Les données du problème sont donc : premièrement les minerais qui doivent être traités, et deuxièmement l'analyse de la fonte à obtenir.

Il est évident qu'une marche normale du haut fourneau ne peut donner que des résultats possibles. On ne peut obtenir de la fonte pauvre en phosphore avec du minerai phosphoreux, et si l'on désire une forte teneur en manganèse, il faut que le minerai chargé contienne une proportion suffisante de manganèse.

A chaque minerai correspond normalement une certaine sorte de fonte, et plus on s'écarte de celle-ci, plus la marche devient anormale, par conséquent coûteuse.

Supposons que nous ayons à traiter les minerais suivants :

	Fe	Mn	Cu	Al ² O ³	SiO ²	CaO	MgO	P	S	CO ²	H ² O	
Minerai I.	43,04	0,08	»	8,47	17,27	4,56	2,43	2,68	0,77	»	»	Tableau 3,2
Minerai II.	63,0	0,17	0,06	1,7	5,3	0,6	0,5	0,01	»	»	»	Tableau 7,5
Minerai III.	50,92	2,76	»	3,52	9,21	5,76	4,62	0,03	0,35	1,26	0,40	Tableau 1,10

et qu'avec ces trois minerais on veuille obtenir une fonte Martin ayant la composition suivante :

	C	Si	Mn	P	S	Cu
Fonte Martin	3,5	0,5	1,5	moins de 0,5	0,1	?

La teneur en cuivre n'est pas indiquée, car nous n'avons aucun moyen de séparer du fer le cuivre introduit dans la charge.

Pour la teneur en phosphore, nous ne pouvons indiquer, pour des raisons analogues, qu'une teneur maxima.

La question à résoudre est la suivante : Dans quelles proportions

devra-t-on mélanger les trois minerais dans la charge pour obtenir la fonte désirée, en cherchant à réaliser les conditions les plus favorables pour la bonne marche du fourneau.

Nous devons d'abord rechercher quelles sont ces conditions.

1. La marche du haut fourneau est d'autant plus favorable que la **consommation de combustible** est plus faible. Nous verrons plus loin de quelles conditions dépend cette consommation. Prenons par exemple comme combustible du coke. Le tableau ci-dessous (tabl. XVI) donne les consommations normales de coke ou de charbon de bois ; il importe de remarquer que les grandes différences qui existent entre les circonstances locales peuvent conduire à des variations importantes :

TABLEAU XVI. — *Consommations de combustible normales.*

	CHIFFRES POUR 100 KG. DE FONTE			CHIFFRES POUR 100 KG. DE FONTE		
	HAUTS FOURNEAUX AU COKE			HAUTS FOURNEAUX AU CHARBON DE BOIS		
	Coke.	Température du vent.	Température au gueulard.	Charbon de bois.	Température du vent.	Température au gueulard.
	kg.			kg.		
Fonte blanche. . .	90-120	300°-600°	150°-250°	75-100	400°	40°-150°
— grise	100-125	450°-700°	150°-300°	85-110	400°-450°	60°-200°
Spiegel	130-150	500°-700°	400°	110-130	450°	100°-250°
Ferromanganèse.	200-250	700°-900°	450°) Ne peuvent être obtenus avec des hauts fourneaux au charb. de bois.		
Ferrosilicium . . .	150-200	700°-900°	450°			

La consommation de combustible dépend en particulier de la teneur en métal de la charge. Plus ce chiffre est élevé, plus la consommation pourra être faible.

Cette consommation est en général d'autant plus petite que la température du vent est plus élevée. Les observations suivantes suffisent à prouver qu'il n'est pas possible d'établir sur ce point des règles absolues :

Nous ne pouvons rien dire de très précis sur la consommation de combustible puisque, pour tenir compte de la teneur en cendres du coke, il faudrait introduire dans le calcul une certaine quantité de combustible. L'importance de l'erreur qu'entraîne cette indétermination est d'ailleurs d'autant moins grave que la teneur en cendres du coke est extrêmement variable.

Par contre nous devons savoir avec quelle température du vent nous devons travailler, et sur quelle température au gueulard nous avons à compter. La température du vent dépendra de la nature de la fonte à obtenir, autrement dit de la question de savoir si nous aurons à réduire, en outre du fer, beaucoup de silicium et de manganèse.

Admettons, pour notre exemple, une température de 450° ($T_g = 450^\circ$). Pour ce qui est de la température des gaz du gueulard, la marche du fourneau sera d'autant plus économique que cette température sera plus basse. Dans les hauts fourneaux au coke, elle est rarement très basse (voir tabl. XVI). Admettons, dans le cas que nous envisageons, où la fonte à obtenir est une fonte blanche, la valeur moyenne entre 150°C et 250°C , donc 200°C ($T_g = 200^\circ\text{C}$).

2. La considération du laitier à former est de toute première importance pour la conduite du fourneau. Celle-ci sera d'autant plus favorable que la quantité de laitier sera plus faible. Les limites entre lesquelles varie la quantité de laitier, pour 100 kilogrammes de fonte, sont très étendues. Pour les fontes ordinaires, cette quantité varie de 30 à 80 kilogrammes, pour les fontes spéciales elle atteint et dépasse le double. On ne peut rien dire de bien général à ce sujet, car la formation du laitier dépend d'autres circonstances, en particulier de sa composition chimique et de sa fusibilité.

Le tableau XII montre combien la composition du laitier est variable. A l'aide de ce tableau nous pourrions discuter les chiffres moyens qu'il faut chercher à obtenir. L'importance du rôle que joue le laitier dans la marche du haut fourneau nous entraîne à étudier ce point avec un peu plus de détails.

On trouve dans le laitier divers éléments de la charge qui n'ont été entraînés ni par le métal ni par les gaz du gueulard. Ces éléments sont tout d'abord : MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 . Ces oxydes passent presque complètement dans le laitier. Seule la silice peut être en partie réduite, mais il faut pour cela la réunion de circonstances favorables qui sont : une haute température dans la partie inférieure du fourneau, et une teneur plus ou moins riche du laitier en Al_2O_3 . Si ces conditions ne sont pas remplies, une faible partie seulement de la silice, 5 p. 100 par exemple, est réduite. On a dans tous les cas à compter avec cette petite quantité de Si dans la fonte, qui ne peut être obtenue absolument sans silice.

D'autres éléments de la charge qui passent en partie dans le laitier sont les protoxydes des métaux, en particulier du manganèse. Dans tout laitier de haut fourneau se trouvent du MnO et du FeO , mais davantage du premier. En marche normale, environ 60 p. 100 du manganèse de la charge est réduit et 40 p. 100 passe dans le laitier. Si l'on veut en réduire une plus grande partie, il faut, comme pour le silicium, se placer dans des conditions favorables qui sont également une température plus élevée et une composition chimique appropriée.

du laitier. Mais, dans le cas le plus favorable, le cinquième au moins du manganèse passe dans le laitier.

Pour ce qui est du fer contenu dans la charge, 90 p. 100 au moins est réduit, et il n'est pas difficile de conduire l'opération de manière à le réduire presque entièrement (99 p. 100).

L'acide phosphorique de la charge est presque complètement réduit, puisque par suite de la présence du silicium, les conditions de la réduction du phosphore et de sa combinaison avec le fer se trouvent remplies. Plus le laitier est acide, moins il contiendra de P^2O^5 .

La question de la quantité de soufre que contient la fonte est une des plus importantes pour la conduite du haut fourneau, et c'est la préoccupation constante du fondeur de ne pas laisser arriver dans la fonte cet ennemi dangereux du fer, dont l'enlèvement est souvent impossible et dans tous les cas très coûteux. La teneur en soufre du minerai peut être abaissée par un grillage préalable. Mais le soufre provient surtout du coke qui en contient rarement moins de 1 p. 100. L'affinité du soufre pour le fer est très grande et n'est surpassée que par celle qu'il a pour le calcium. Par conséquent, plus le laitier sera calcaire, moins la fonte contiendra de soufre.

Tous les éléments de la charge qui sont plus oxydables que le fer, c'est-à-dire Cu, Pb, Zn, etc., sont entraînés par le fer, à moins qu'ils ne se volatilisent ou qu'ils ne soient sans affinité aucune pour le fer. Cette remarque s'applique notamment au cuivre dont la totalité se retrouve dans la fonte.

Nous sommes maintenant en mesure de rechercher quels sont les éléments de la charge qui se retrouvent dans la fonte et ceux qui passent dans le laitier, et nous pouvons donc, connaissant la composition chimique de la charge, calculer celle du laitier.

La composition chimique du laitier est de première importance au point de vue de sa fusibilité, qui est un des facteurs essentiels de la marche du haut fourneau. Nous devons donc aussi élucider complètement cette question.

Si nous recherchons les points de fusion des différents éléments du laitier, nous constatons que ces derniers ne peuvent être fondus par les moyens industriels dont nous disposons. Pour les éléments fondamentaux des laitiers de hauts fourneaux, SiO^2 , Al^2O^3 , CaO , le point de fusion est beaucoup plus élevé que toutes les températures que les appareils employés dans les usines sont capables d'atteindre. Ce n'est que par la réunion de deux au moins de ces éléments que nous obtenons des produits plus ou moins fusibles; il s'agit maintenant de déterminer exactement dans quelles proportions doit se faire le mélange.

Les laitiers, que l'on considérait au début comme des composés chimiques, ne sont que des mélanges et suivent absolument les lois des mélanges physiques. La loi la plus importante pour nous est celle qui dit que le point de fusion d'un mélange est d'autant moins élevé que ce mélange contient un plus grand nombre d'éléments. Naturellement chacun de ces derniers n'a pas une influence égale sur l'abaissement du point de fusion. Cet abaissement est surtout considérable lorsque le mélange contient des éléments chimiquement dissemblables, dans notre cas des éléments basiques et acides.

Avant d'aller plus loin dans l'étude de la fusibilité des laitiers, il nous faut faire connaître leurs dénominations, qui datent de l'époque où ils étaient considérés comme des composés définis, et qui ont été conservées. D'après la nature de l'élément acide prédominant, on distingue des laitiers siliceux, phosphatés ou alumineux. Les laitiers de haut fourneau sont des laitiers siliceux, qui se composent principalement de CaO , Al_2O_3 et SiO_2 . On les appelle silico-aluminates de chaux. Pour exprimer le rapport des bases et des acides on disait, et on dit encore, demi, simples ou doubles silicates, ce qui signifie que le rapport de l'oxygène des acides à celui des bases est $1/2$, 1 , 2 , etc. On considère comme neutres les silicates simples, ou singulo-silicates, comme basiques ceux pour lesquels le rapport est inférieur à 1 , comme acides ceux pour lesquels il est supérieur à 1 . Ce rapport de l'oxygène des acides à celui des bases, qui porte le nom de « degré d'acidité du silicate », peut être un nombre absolument quelconque et il n'est pas nécessaire, comme on le pensait autrefois, que ce soit un multiple de un-demi. On se sert encore aujourd'hui de cette notion de degré d'acidité pour caractériser un laitier, et on parle par exemple d'un silicate de degré $0,86$ ou $1,23$, voulant dire par là que le rapport de l'oxygène des éléments acides à celui des bases est $0,86$ ou $1,23$.

Nous verrons plus loin (p. 19), les éléments qu'il faut considérer comme acides ou comme bases.

Les meilleures recherches pour déterminer la fusibilité des laitiers du haut fourneau sont celles de Boudouard (*Journal of the Iron and Steel Inst.* 1905. I, p. 339). Boudouard mélangea d'abord, en fragments extrêmement petits, et en proportions très variables, deux des trois éléments principaux des laitiers, et rechercha le point de fusion du mélange. Les résultats de ces expériences sont indiqués par le diagramme figure 1.

Le point de fusion le plus élevé correspond toujours à l'élément pur et seul celui de la silice (environ 1825°C) figure parmi les températures indiquées.

Si nous considérons la ligne pointillée qui correspond aux points de fusion des silicates d'alumine, c'est-à-dire des laitiers qui ne se composent que de silice et d'alumine, nous voyons que tous les points de cette ligne correspondent à des températures très élevées. Le minimum correspond à environ 85 p. 100 SiO_2 et 15 p. 100 Al_2O_3 . La ligne du silicate de chaux présente une allure plus favorable. Si on s'éloigne

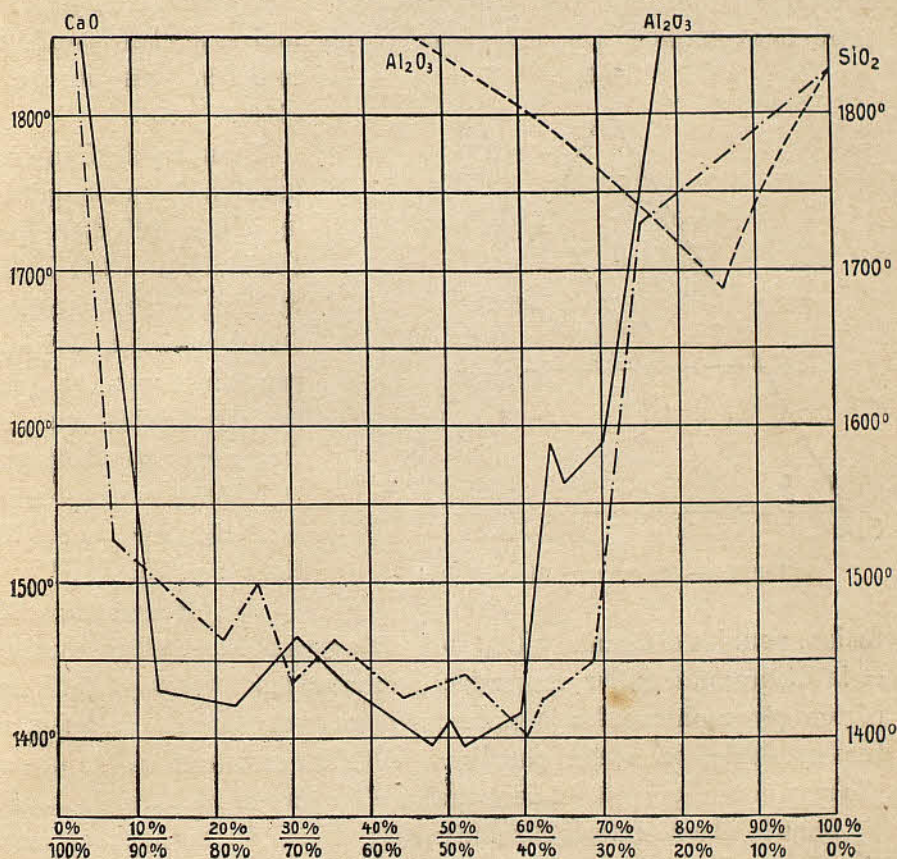


Fig. 1. — Diagramme de Boudouard sur les éléments primaires des laitiers de hauts fourneaux.

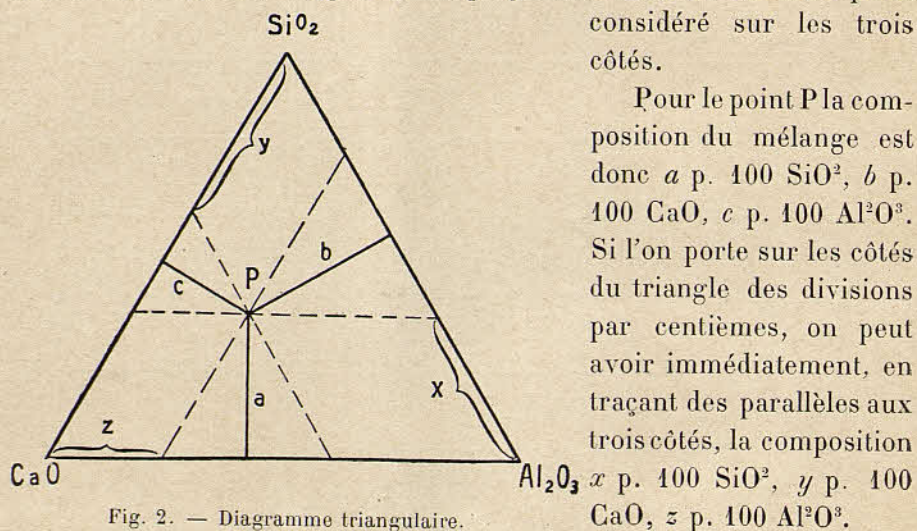
des deux extrémités, on trouve de nombreux points de fusion dans les limites des températures pratiquement réalisables, et plusieurs minima.

Les aluminates de chaux se comportent à peu près de même ; la courbe sort des limites à ses deux extrémités, mais elle atteint en deux points les températures les plus basses du diagramme.

On n'a jamais affaire à de semblables laitiers purs ; Boudouard ne s'est servi de ces recherches que comme de bases pour l'étude des laitiers plus complexes. Si l'on mélange, en proportions variables, SiO_2 ,

Al^2O^3 et CaO , on ne peut représenter les résultats qu'au moyen d'un diagramme triangulaire.

Le diagramme triangulaire (fig. 2) est un triangle équilatéral dont les sommets représentent les éléments purs, donc 100 p. 100 de ceux-ci. Chaque point de la surface triangulaire correspond à un mélange bien défini des trois éléments, que l'on peut facilement déterminer comme le montre la figure 2. Les proportions en poids des trois corps sont entre elles comme les longueurs des perpendiculaires abaissées du point considéré sur les trois côtés.



considéré sur les trois côtés.

Pour le point P la composition du mélange est donc a p. 100 SiO^2 , b p. 100 CaO , c p. 100 Al^2O^3 . Si l'on porte sur les côtés du triangle des divisions par centièmes, on peut avoir immédiatement, en traçant des parallèles aux trois côtés, la composition x p. 100 SiO^2 , y p. 100 CaO , z p. 100 Al^2O^3 .

Les températures de fusion, pour les différents points, sont analogues à des cotes de hauteur, et le diagramme entier ressemble à la représentation du relief d'une région géographique. En joignant les points pour lesquels la température est égale, on a des courbes semblables aux courbes de niveau géographiques, qui sont ici des courbes d'égales températures de fusion.

Dans le diagramme de Boudouard (fig. 3) ces courbes sont représentées de 100°C en 100°C , et nous pouvons déterminer (à moins de 100°C près) la température de fusion d'un silico-aluminate de chaux quelconque.

Nous voyons tout d'abord que les températures de fusion des laitiers le plus facilement fusibles (moins de 1300°) correspondent à une composition de 53-57 p. 100 SiO^2 , 25-30 p. 100 CaO , 17-19 p. 100 Al^2O^3 . C'est là un fait qui concorde absolument avec les données de la pratique.

Nous voyons aussi, et c'est là un des faits les plus instructifs, qu'on peut remplacer la silice SiO^2 par l'alumine Al^2O^3 et que l'on peut même, dans certaines circonstances, abaisser ainsi le point de fusion. Nous n'avons qu'à suivre une ligne partant du milieu du diagramme et se dirigeant vers la ligne $\text{CaO-Al}^2\text{O}^3$, ce qui revient à diminuer la

proportion de SiO_2 . A l'intérieur d'une surface correspondant à des températures de 1400°C - 1500°C , nous rencontrons des îles où cette température est comprise entre 1300°C et 1400°C . C'est là la raison pour laquelle, dans le calcul de la charge et du laitier à former, au moyen du procédé de Platz que nous verrons plus loin, l'alumine est considérée comme un élément acide.

Nous pouvons donc, grâce au diagramme de Boudouard, évaluer la

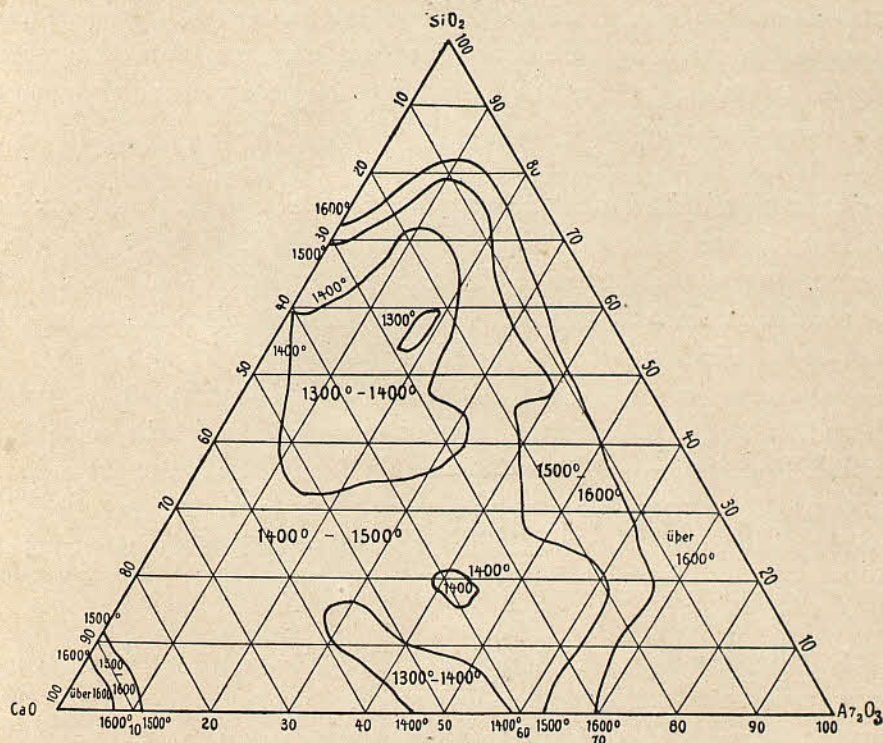


Fig. 3. — Diagramme triangulaire de Boudouard sur les silico-aluminates de chaux.

température de fusion d'un laitier obtenu en pratique ou calculé, et juger si, en produisant un tel laitier, nous nous trouvons dans des conditions économiques, relativement au travail de fusion de ce laitier. Nous nous servirons plus tard de ce moyen. Mais il ne faut pas oublier que la température indiquée par le diagramme de Boudouard est un maximum, puisqu'en outre de ces trois éléments principaux, le laitier en contient encore beaucoup d'autres, qui contribuent à abaisser le point de fusion. Cette remarque s'applique en particulier aux laitiers contenant des bases de métaux lourds, comme MnO et FeO , qui rendent le laitier très fusible. Sans doute, une proportion trop forte de ces métaux constituerait une perte sensible et abaisserait notablement le rendement du lit de fusion. Toutefois, pour la production de ferromanganèse, on a

recours à ces conditions; on rend la teneur en MnO du laitier plus forte qu'elle n'a besoin de l'être, mais on emploie comme addition le laitier riche en manganèse ainsi obtenu.

D'une façon générale on peut considérer comme le meilleur le laitier qui présente le point de fusion le plus bas, tout en offrant les meilleures conditions pour la conduite de l'opération métallurgique, et qui ne perde pas aussitôt cette qualité par suite de variations accidentelles dans sa composition. Pour les laitiers de hauts fourneaux, ceux qui répondent à ces conditions sont ceux dont la composition est figurée par des points qui se trouvent à l'intérieur des courbes correspondant à la température de 1400 degrés (voir aussi p. 26).

3. **Le prix du lit de fusion** joue aussi un rôle important aux yeux du fondeur. S'il se compose de plusieurs minerais, il doit être composé non seulement en cherchant à obtenir le rendement le plus favorable et les conditions de travail les plus avantageuses, mais aussi en tenant compte du prix des différents minerais.

Dans notre exemple, nous avons laissé de côté la question de savoir de quelles quantités de minerais on dispose et combien ils coûtent à l'usine. Nous traiterons le problème au point de vue purement métallurgique. On jugera, d'après les circonstances locales, si la solution, rationnelle au point de vue métallurgique, est aussi la meilleure au point de vue pratique. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce point.

4. **L'état physique des minerais** et leur grosseur sont très importants pour la détermination de la charge. Dans notre exemple, nous avons (minerai II) des déchets de grillage de pyrites, par conséquent un minerai en grains très fins. Il faut faire attention que l'on ne devra guère traiter plus de 15 p. 100 de ce minerai.

Le tableau XII indique brièvement les conditions que doivent remplir les laitiers suivant la fonte que l'on désire obtenir.

Nous pouvons maintenant aborder la résolution du problème que nous nous sommes posé.

1. — CALCUL DE LA CHARGE PAR LE PROCÉDÉ DE MRAZEK

Le calcul du lit de fusion se fait le plus souvent d'après le procédé de Mrázek (*Jahrbuch der Bergakademien*, vol. XVIII, p. 282, vol. XIX, p. 375). Il repose sur l'ancienne idée que les laitiers étaient des composés chimiques définis, mais on peut le modifier facilement pour le

mettre d'accord avec les idées actuelles, et il permet d'obtenir des résultats rapides, notamment dans le cas d'un lit de fusion de composition variable et dans le cas du traitement de minerais nombreux.

Pour l'exécution des calculs qu'exige ce procédé de Mrázek modifié, on se sert du tableau XVII où sont indiquées les proportions en poids des éléments entrant dans l'unité de poids des différents corps. Ces chiffres se calculent au moyen des poids atomiques des divers éléments, et ne nécessitent aucune explication détaillée. Grâce aux valeurs des inverses de ces chiffres, nous pourrons faire rapidement tous les calculs.

Exemple. — On a par exemple dans un minerai 60,2 de Fe^2O^3 , qui contiennent, d'après le tableau XVII :

$$\begin{array}{l} 60,2 \times 0,7 = 42,14 \text{ Fe} \\ \text{et} \quad 60,2 \times 0,3 = 18,06 \text{ O} \end{array}$$

Inversement, si l'on veut calculer à combien de Fe^2O^3 correspondent 42,14 unités de Fe, on aura :

$$42,14 \times 1,428 = 60,2 \text{ unités de } \text{Fe}^2 \text{ O}^3.$$

Le tableau XVIII contient les calculs pour l'exemple que nous avons considéré plus haut.

Les calculs nécessaires pour obtenir les chiffres portés dans les colonnes 1-14 s'expliquent d'eux-mêmes.

D'après les valeurs de A et B (colonnes 13 et 14) on peut voir le caractère chimique des minerais. Si l'oxygène des acides domine, on dit le minerai acide ; si c'est l'oxygène des bases, on dit le minerai basique.

Avant de poursuivre le calcul, nous devons adopter un chiffre pour le degré d'acidité du laitier en présence duquel se fera la réduction. Ce choix se fait d'après ce que nous savons jusqu'à présent sur les laitiers (voir tableau XII). Nous avons choisi un laitier un peu plus basique que le singulosilicate, à cause de la teneur en soufre du coke.

Soit

$$\frac{A}{B} = 0,85$$

le degré d'acidité de notre silicate.

Le calcul des chiffres A_1 et B_1 (colonnes 15 et 16) se fait au moyen des deux équations

$$\frac{A}{B \pm x} = 0,85 \quad \text{ou} \quad \frac{A \pm x}{B} = 0,85.$$

Pour obtenir le degré d'acidité désiré, nous devons ajouter de l'oxygène soit aux acides, soit aux bases.

TABLEAU XVII.

CORPS	1 UNITÉ DU CORPS CONTIENT a ET $b =$					
	a	a	$\frac{1}{a}$	b	b	$\frac{1}{b}$
Fe ² O ³	Fe	0,700	1,428	O	0,300	3,333
Fe ² O ³	FeO	0,900	1,111	»	»	»
FeO	Fe	0,780	1,282	O	0,220	4,545
Fe ³ O ⁴	Fe	0,724	1,381	O	0,270	3,610
Fe ³ O ⁴	FeO	0,931	1,074	»	»	»
Fe ³ O ⁴	Fe ² O ³	1,034	0,967	»	»	»
FeCO ³	Fe	0,483	2,070	CO ⁵	0,517	1,934
FeCO ³	FeO	0,620	1,613	CO ²	0,380	2,631
FeS	Fe	0,636	1,572	S	0,364	2,747
MnO	Mn	0,775	1,290	O	0,225	4,444
Mn ² O ⁴	Mn	0,721	1,387	O	0,279	3,584
Mn ² O ³	Mn	0,696	1,437	O	0,304	3,289
Mn ³ O ⁴	MnO	0,930	1,075	»	»	»
Mn ² O ³	MnO	0,898	1,113	»	»	»
MnO ²	Mn	0,632	1,582	O	0,368	2,717
NiO	Ni	0,785	1,274	O	0,215	4,651
CuO	Cu	0,799	1,251	O	0,201	4,975
ZnO	Zn	0,803	1,245	O	0,197	5,076
As ² O ³	As	0,378	2,645	O	0,622	1,608
Sb ² O ³	Sb	0,416	2,404	O	0,584	1,712
TiO ²	Ti	0,600	1,667	O	0,400	2,500
Cr ² O ³	Cr	0,685	1,460	O	0,315	3,175
WO ²	W	0,852	1,174	O	0,148	6,757
SiO ²	Si	0,470	2,128	O	0,530	1,887
Al ² O ³	Al	0,530	1,887	O	0,470	2,128
P ² O ⁵	P	0,436	2,293	O	0,564	1,773
SO ³	S	0,400	2,500	O	0,600	1,667
CaO	Ca	0,715	1,397	O	0,285	3,509
CaCO ³	CaO	0,561	1,782	CO ²	0,439	2,278
MgO	Mg	0,604	1,656	O	0,396	2,525
MgCO ³	MgO	0,478	2,092	CO ²	0,522	1,916
Air	O	0,230	4,348	Az	0,770	1,299
H ² O	H	0,111	9,009	O	0,889	1,125
CO ²	CO	0,636	1,572	O	0,364	2,747
CO ²	C	0,272	3,676	O	0,728	1,374
CO	C	0,428	2,336	O	0,572	1,748
CH ⁴	C	0,750	1,333	H	0,250	4,000
C ² H ⁴	C	0,856	1,168	H	0,144	6,944
SO ²	S	0,500	2,000	O	0,500	2,000

L'oxygène qui manque, dans chacun des corps, pour arriver au degré $\frac{A}{B}$ est indiqué dans les colonnes 15 et 16.

Si le degré d'acidité est = 1, alors

$$\frac{A}{B \pm x} = 1 \quad A = B \pm x$$

$$x = A - B$$

$$x = B - A.$$

Les valeurs de A_1 et B_1 sont donc les différences de l'oxygène des acides et de celui des bases. Dans notre exemple, deux des minerais (I et II) sont acides, le dernier (III) basique. C'est là un fait très favorable au point de vue métallurgique ; nous pouvons, grâce au caractère chimique différent de ces minerais, calculer un lit de fusion dans lequel les proportions des différents minerais sont fixées de manière à obtenir, sans aucune addition, le degré d'acidité voulu. Nous n'aurons besoin d'addition que pour amener au degré 0,85 le laitier provenant des cendres du coke.

Par contre, si l'on a des minerais présentant le même caractère chimique, il faut adopter des chiffres pour les proportions suivant lesquelles entreront les différents minerais dans la charge, et il faudra faire une addition pour ces minerais eux-mêmes.

Dans notre exemple, le lit de fusion le plus avantageux au point de vue métallurgique se calculera comme suit :

Si l'on traite 0,32 unités du minerai I (tableau XVIII, colonne 18)
 et 0,56 — — — — II (— — — —)
 il manquera 2 unités d'oxygène basique, que l'on obtiendra en traitant
 $2 \times 7,19$ unités du minerai III.

Le mélange de minerais qui donnerait un laitier de degré 0,85 serait donc le suivant :

Minerai I	=	0,32	unités	=	2,10	p. 100
— II	=	0,56	—	=	3,66	—
— III	=	14,38	—	=	94,24	—
					15,26	unités = 100,00 p. 100.

Mais, pratiquement, ce mélange n'est pas à recommander, car le lit de fusion contiendrait une proportion extrêmement forte du minerai III et des quantités infimes des minerais I et II.

Nous n'avons donc qu'à adopter un mélange de minerais, pourvu qu'il soit compatible avec les conditions dans lesquelles se présentent les minerais, et avec la nature de la fonte que l'on veut obtenir.

Par suite de la finesse des grains du minerai II, on ne doit pas traiter plus de 15 p. 100 de celui-ci. D'autre part le minerai I est riche en phosphore.

Puisque nous ne voulons pas avoir plus de 0,5 p. 100 P dans la fonte, nous ne devons pas traiter plus de 8 p. 100 de ce minerai I. Pour tenir compte de la petite quantité de phosphore qui existe dans les autres matériaux, nous adopterons le chiffre de 7,5 p. 100. En effet, aux 42,04 Fe du minerai I correspondent 2,68 de P, c'est-à-dire plus de 6 p. 100 p. 100 Fe; on ne doit donc pas employer plus de $\frac{1}{12}$ c'est-à-dire 8 p. 100 du minerai I.

En résumé, le mélange que nous traiterons sera donc composé de :

			Fe	Mn	P
7,5 p. 100 du minerai I	contenant	=	3,23	0,006	0,201
15,0 — — —	II —	=	9,45	0,025	0,001
77,5 — — —	III —	=	39,36	2,139	0,023
100,0 p. 100			52,04	2,170	0,225

La fonte que nous voulons obtenir contient environ 92 p. 100 Fe. Donc, pour avoir 100 kilogrammes de fonte, à 92 p. 100 Fe, au moyen du mélange ci-dessus, qui contient 52,04 p. 100 Fe, il faut traiter 176 kilogrammes du mélange, qui se compose alors de :

$$\begin{aligned}
 7,5 \times 1,76 &= 13,2 \text{ kg. du minerai I} \\
 15,0 \times 1,76 &= 26,4 \text{ — — — II} \\
 77,5 \times 1,76 &= 136,4 \text{ kg du minerai III} \\
 &176,0 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

La quantité de minerais nécessaire pour 100 kilogrammes de fonte, ainsi calculée est inscrite dans la colonne 19 du tableau XVIII.

Pour pouvoir tenir compte des cendres du coke dans le calcul du laitier, admettons que la quantité de coke nécessaire pour 100 kilogrammes de fonte contienne 10 kilogrammes de cendres.

Admettons que l'analyse du coke employé soit la suivante :

$$C = 80 \text{ p. 100 } H = 1 \text{ p. 100 } O + Az = 2 \text{ p. 100 } S = 1,2 \text{ p. 100 } \text{ cendres } 13 \text{ p. 100 } H^2O = 2,8 \text{ p. 100}$$

et que les cendres aient la composition indiquée au tableau X.

Nous pouvons maintenant remplir les dernières colonnes du tableau XVIII, relatives aux minerais et aux cendres de coke. On constatera que les quantités de Fe, Mn, Si, P, qui existent dans la fonte, sont dans les limites convenables.

Calcul de l'addition. — Le but final du présent calcul, qui est la détermination de la quantité de matières à ajouter pour obtenir le laitier désiré, est maintenant facile à atteindre. En effet, nous voyons, d'après les colonnes 20 et 21 du tableau XVIII, qu'il manque aux minerais et aux cendres de coke, pour donner un laitier de degré 0,85, seulement 0,189 d'oxygène acide et 1,003 d'oxygène basique. Nous devons donc

TABLEAU XVIII. — Calcul du lit de fusion (d'après le procédé de Mrazek modifié).

MATÉRIAUX	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	QUANTITÉ DES DIVERS ÉLÉMENTS QUI PASSENT DANS LE LAITIER, EXISTANT DANS LES MATÉRIAUX CHARGÉS						OXYGÈNE CONTENU DANS LES ÉLÉMENTS QUI PASSENT DANS LE LAITIER						
	SiO ²	Al ² O ³	CaO	MgO	MnO	FeO	O dans SiO ²	O dans A	O dans CaO	O dans MgO	O dans MnO	O dans FeO	
Minerai I	16,30	8,47	4,56	2,43	0,04	0,55	8,60	3,97	1,95	0,96	0,01	0,12	
Minerai II	5,03	1,70	0,60	0,50	0,09	0,81	2,65	0,79	0,17	0,19	0,02	0,18	
Minerai III	8,70	3,52	5,76	4,62	1,41	0,65	4,60	1,65	1,63	1,82	0,31	0,14	
Cendres de coke.	45,0	25,0	5,0	5,0	»	0,08	23,75	11,70	1,42	1,98	»	0,02	
Additions :													
a) basique	0,86	0,20	54,21	1,35	Traces.	Traces.	0,45	0,09	15,40	0,53	»	»	
b) acide	60,0	19,0	2,5	0,5	»	8,0	31,75	8,80	0,72	0,19	»	1,76	
MATÉRIAUX	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	TOTAL DE L'OXYGÈNE		OXYGÈNE MANQUANT POUR FORMER $\frac{A}{B} = 0,85$		A UNE UNITÉ D'OXYGÈNE MANQUANT		POUR 100 kg. FONTE						
	des acides A	des bases B	aux acides A ₁	aux bases B ₁	correspondent, en unités des différentes matières :		sont traités	oxygène manquant : pour $\frac{A}{B} = 0,85$		CONTENANT			
					$\frac{1}{A_1}$	$\frac{1}{B_1}$		aux acides	aux bases	Fe	Mn	Si	P
Minerai I	8,60	7,01	»	3,107	»	0,32	13,2	»	0,410	5,68	0,01	2,28	0,35
Minerai II	2,65	1,35	»	1,767	»	0,56	26,4	»	0,466	16,63	0,04	1,40	Traces.
Minerai III	4,60	5,55	0,139	»	7,19	»	136,4	0,189	»	69,54	2,04	13,46	0,64
Cendres de coke.	23,75	15,12	»	12,70	»	0,078	env. 10	»	0,127				
Additions :													
a) basique	0,45	16,02	15,49	»	0,065	»	5,25	0,189	1,003				
b) Acide	31,75	11,47	»	25,88	»	0,039		0,814	»				
CHARGE POUR 100 KG FONTE :													
Minerai I =	13,50	kg.			Cendres de coke =	10,00	kg.						
Minerai II =	26,50	—			Addition :	5,25	—						
Minerai III =	137,00	—											
										91,85	2,09	17,14	0,39
										100%	60%	5%	100%
										91,85	1,25	0,85	0,39
A ₁ — B ₁ = 0													
Analyse de la fonte.													

compléter l'oxygène des bases qui manque, en faisant une addition basique.

L'excès de l'oxygène des acides est de $1,003 - 0,189 = 0,814$. Comme il manque à l'unité de poids du calcaire dont nous disposons 15,49 unités d'oxygène acide pour former un laitier de degré 0,85 (colonne 15), nous devons employer $100 \times 0,85 = 15,49 = 5,25$ kg. de calcaire, pour égaler l'excès d'oxygène des acides.

Il ne doit, en effet, y avoir aucun excès d'oxygène, ni dans les acides, ni dans les bases, donc $A_1 - B_1 = 0$.

Le calcul de la charge est alors terminé. La colonne 19 du tableau XVIII donne la composition du lit de fusion, abstraction faite du combustible, que nous obtiendrons par la suite des calculs, mais que nous ne pouvons encore fixer. Nous avons seulement considéré, d'une façon approximative, la quantité de cendres de coke.

II. — CALCUL DU LIT DE FUSION PAR LE PROCÉDÉ DE PLATZ

Le calcul du lit de fusion peut aussi se faire par le procédé de Platz (*Stahl und Eisen*, 1892, p. 2). Dans ce procédé, on caractérise les laitiers par le rapport des poids des éléments basiques et acides, en considérant l'alumine comme un corps acide. La nature du laitier est donc déterminée par le rapport

$$\frac{\text{Bases}}{\text{Acides}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{MnO}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2}$$

D'après des expériences faites sur des fourneaux en marche, ce rapport a les valeurs suivantes (tableau XIX), suivant la nature de la fonte produite :

TABLEAU XIX. — Rapport des bases aux acides (d'après Ledebur)

MARCHE EN	$\frac{\text{Bases}}{\text{Acides}} =$	
	Hauts fourneaux au coke.	Hauts fourneaux au bois.
Fonte blanche	environ $\frac{51}{49} \left(\frac{60}{40} - \frac{55}{45} \right)$	environ $\frac{45}{55}$
— grise	— $\frac{50}{50} \left(\frac{50}{50} - \frac{55}{45} \right)$	— $\frac{35}{65} \left(\frac{30}{70} - \frac{45}{55} \right)$
Spiegeleisen	— $\frac{60}{40}$	»
Ferromanganèse	— $\frac{60}{40}$	»
Ferrosilicium	— $\frac{45}{55}$	»

Si nous faisons le calcul, par le procédé de Platz, pour l'exemple que nous avons choisi, calcul dont les chiffres sont indiqués dans le tableau XX, nous aurons, en adoptant pour la valeur du rapport $\frac{\text{Bases}}{\text{Acides}}$ le chiffre $\frac{49}{51}$, une quantité de calcaire à ajouter égale à 18 kilogrammes. Ce chiffre est plus fort que celui qu'indique le procédé Mrázek, ce qui n'a rien d'étonnant puisque nous avons considéré l'alumine comme un élément acide.

TABLEAU XX. — Calcul du lit de fusion par le procédé de Platz.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	POIDS DES DIVERS ÉLÉMENTS PASSANT DANS LE LAITIER						TOTAL DES ÉLÉMENTS	
	SiO ²	Al ² O ³	CaO	MgO	MnO	FeO	basiques.	acides.
Minerai I	16,30	8,47	4,56	2,43	0,04	0,55	7,58	24,77
— II	5,03	1,70	0,60	0,50	0,09	0,81	2,00	6,73
— III	8,70	3,52	5,76	4,62	1,41	0,65	12,44	12,22
Cendres de coke	45,0	25,0	5,0	5,0	»	0,08	10,08	70,00
Addition basique	0,86	0,20	54,21	1,35	traces	traces	55,56	1,06
Addition acide	60,0	19,0	2,5	0,5	»	8,0	11,00	79,00

	9	10	11	12	13	14	15
	POUR FORMER $\frac{B}{A} = \frac{51}{49}$ sont nécessaires.		POUR FORMER $\frac{B}{A} = \frac{51}{49}$ sont à ajouter.		QUANTITÉS nécessaires pour 100 kilo- grammes de fonte.	QUANTITÉS à ajouter par 100 kilogrammes de fonte.	
	bases.	acides.	bases.	acides.		bases	acides.
Minerai I	25,75	»	18,17	»	kg. 13,2	2,4	»
— II	6,95	»	4,95	»	26,4	1,02	»
— III	»	12,3	»	0,08	136,4	»	0,11
Cendres de coke	70,3	»	60,22	»	10	6,02	»
Addition basique	»	53,2	»	52,14	env. 48,0	9,44	0,11
Addition acide	»	»	»	»	»	»	9,33
						9,44	9,44

L'établissement des colonnes 4-8 se comprend de lui-même. Pour pouvoir établir les chiffres des colonnes 9 et 10, il suffit de voir si ce sont les éléments acides ou basiques qui dominent.

Si les bases dominent, comme dans le minerai III, on calcule la quantité d'acides nécessaires par l'égalité $A = \frac{49}{51}B$, et on inscrit dans la colonne 12 la différence entre cette quantité nécessaire et la quantité qui existe.

Si les acides dominant, on calcule $B = \frac{51}{49} A$ et on porte la différence, qui donne les bases à ajouter, dans la colonne 11.

Les chiffres de la colonne 13 se calculent comme dans le procédé de Mrázek. M. L. Blum (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 1 024) propose de laisser complètement de côté l'alumine dans le calcul du degré d'acidité et de caractériser le laitier par le rapport $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$, ce qui simplifie beaucoup le calcul. Il justifie cette proposition en faisant remarquer que la teneur en alumine d'un laitier de haut fourneau n'influe pas sur ses propriétés basiques ou acides, et que le caractère basique d'un laitier ne dépend que de sa teneur en chaux. D'après lui, cette teneur doit être assez élevée, déduction faite de la chaux combinée au soufre, pour former avec la silice un silicate de la forme $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Le rapport $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ doit alors, en marche en fonte blanche de puddlage, avoir la valeur $\frac{48,2}{51,8}$, en marche en fonte Thomas ou fonte de moulage $\frac{58,3}{41,7}$. Pour les hauts fourneaux qui emploient de la minette, en admettant une teneur en soufre de 1 p. 100, on adoptera pour ce rapport la valeur $\frac{45}{31}$.

III. — MÉTHODE GRAPHIQUE DE MATHESIUS POUR LE CALCUL DU LIT DE FUSION (*Stahl und Eisen*, 1908, vol. II).

La méthode graphique pour le calcul du lit de fusion, inventée tout récemment par M. le professeur Mathesius, de Berlin, constitue un progrès considérable, qui sera surtout apprécié dans les usines où l'on traite un grand nombre de minerais.

M. Mathesius est parti des recherches de Boudouard sur les laitiers, dont il a été question plus haut (voir p. 48), et il se sert d'un diagramme triangulaire semblable à celui de Boudouard. Il a analysé un grand nombre de laitiers, qu'il a figurés sur son diagramme d'après leur composition $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Bases} = 100$.

Les résultats qu'il a obtenus sont figurés ci-dessous (fig. 4 et 5). Ces diagrammes indiquent la composition moyenne du laitier qu'il faut adopter suivant la nature de la fonte à obtenir et le type du haut fourneau (au coke ou au charbon de bois). En comparant ces diagrammes à celui de Boudouard, on voit que ces laitiers correspondent à des zones très voisines de celle de la fusibilité maxima (1 300-1 400°) et se confondent même en partie avec cette dernière. Dans le diagramme de Mathesius, ces zones sont plus rapprochées de la base du triangle, mais ceci s'explique naturellement, en observant que dans le diagramme de

Boudouard, le sommet gauche du triangle correspond à la chaux pure (CaO) et dans celui de Mathesius à l'ensemble des différentes bases.

La détermination graphique du lit de fusion se fera en inscrivant sur le diagramme, pour chacune des matières de la charge, le laitier qu'elle donnera. On déduit de chacune de ces matières la partie métallique (c'est-à-dire les oxydes de fer, les $\frac{2}{3}$ de l'oxyde de manganèse,

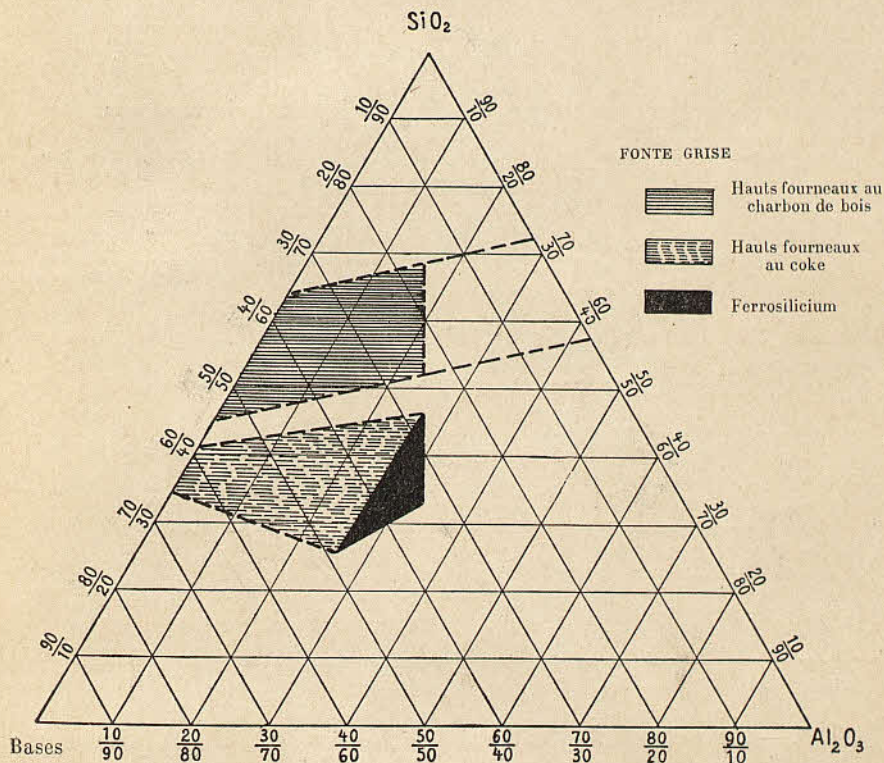


Fig. 4. — Diagramme de Mathesius sur la composition des laitiers de haut fourneau, dans la marche en fonte grise.

les oxydes de Cu et de P) et on établit pour les éléments qui restent l'égalité $\text{SiO}^2 + \text{Al}^2\text{O}^3 + \text{Bases} = 100$. On reporte ensuite le résultat obtenu sur le diagramme, comme le montre la figure 6 pour cinq minerais différents.

Si on n'avait que deux minerais, I et II, il est clair que le laitier obtenu, serait figuré par un point qui se trouverait quelque part sur la ligne I-II, à une place différente suivant les proportions des minerais I et II qui figurent dans la charge. Si on avait trois minerais (I, II, III), les laitiers qu'ils donneraient, suivant les proportions dans lesquelles ils sont mélangés, seraient représentés par des points situés à l'intérieur

du triangle I-II-III. Si l'on choisit comme laitier celui qui est représenté par un certain point de ce triangle, les quantités des trois minerais à traiter sont parfaitement définies. En effet, les proportions du mélange sont données, pour chaque point du triangle, par l'égalité

$$\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} = 1 \text{ (Voir fig. 7)}$$

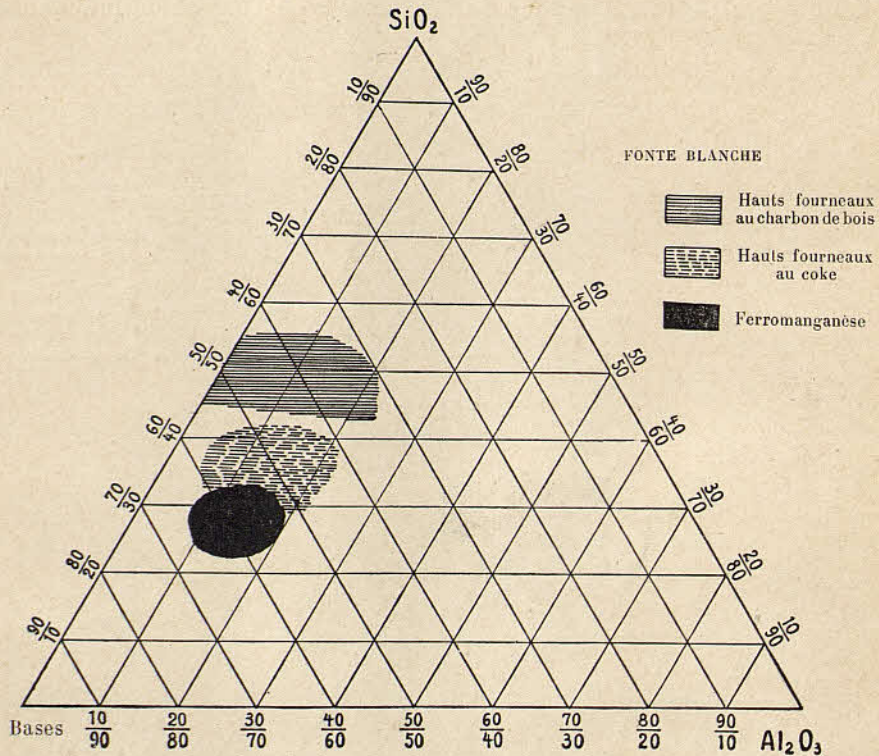


Fig. 5. — Diagramme de Mathesius sur la composition des laitiers de haut fourneau dans la marche en fonte blanche.

$\frac{a}{A}$, $\frac{b}{B}$, $\frac{c}{C}$ sont des rapports. Si on les convertit en nombres décimaux, l'égalité prend la forme

$$\alpha + \beta + \gamma = 1.$$

Si α représente la quantité pour 100 de a par rapport à A , β de b par rapport à B et γ de c par rapport à C on a :

$$\alpha + \beta + \gamma = 100$$

Pour pouvoir transformer immédiatement les longueurs a , b , c en proportions p. 100 de A , B et C , on se sert d'une échelle (fig. 8).

On dessine cette échelle sur un papier calque, et on la promène sur le diagramme jusqu'à ce que la droite A , placée parallèlement à la

graduation se termine sur les deux côtés de l'angle. Par suite de l'égalité des triangles déterminés par la droite A sur l'échelle, on n'a qu'à lire sur la graduation le nombre p . 100 correspondant à la longueur a .

Si l'on a 4 minerais, à chaque point du quadrilatère I, II, III, IV,

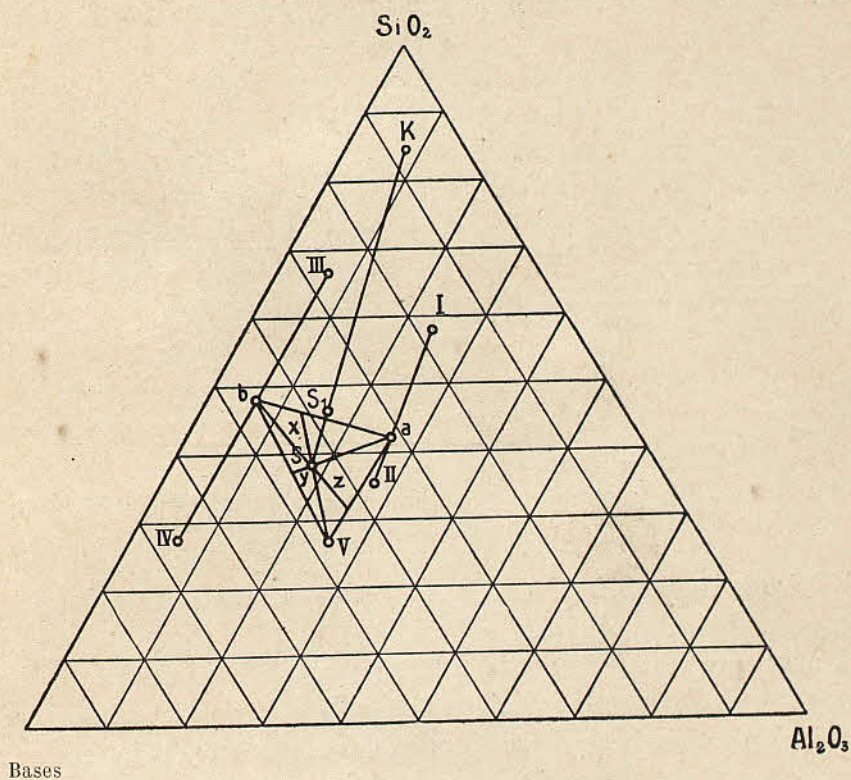


Fig. 6. — Calcul graphique du lit de fusion.

correspondent un nombre infini de combinaisons entre ces minerais. Il est donc nécessaire de se fixer le rapport des poids d'au moins deux d'entre eux. On n'a plus alors qu'à combiner trois minerais.

Si l'on a cinq minerais, comme dans notre exemple (fig. 6), il est nécessaire de déterminer les proportions de quatre d'entre eux, deux à deux.

Pour les minerais I et II, dont les proportions sont ainsi fixées à l'avance, le laitier aura une composition à laquelle correspond le point a ; pour les minerais III et IV on aura de même le point b , et il ne restera plus qu'à combiner le minerai V avec les deux minerais composés a et b . On obtiendra finalement un point S, qui doit naturellement se trouver dans le triangle a, b, V . Le lit de fusion sera donc

composé de x p. 100 du minerai V, y p. 100 du minerai a , z p. 100 de b ; nombres que l'on trouvera facilement au moyen de l'échelle (fig. 8).

Si l'on veut tenir compte des cendres de coke, il faut calculer combien il y a de cendres de coke dans 100 parties du laitier. On obtiendra ainsi un point K, que l'on combinera avec S, en déterminant le point S

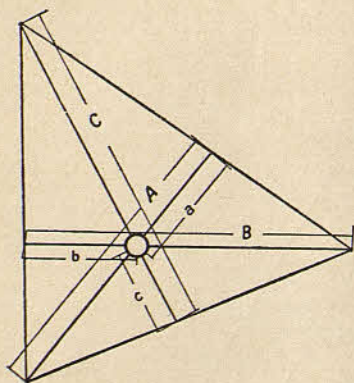


Fig. 7.

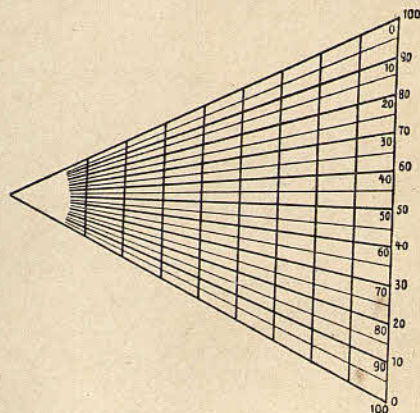


Fig. 8. — Echelle pour le calcul graphique du lit de fusion.

qui divise la droite SK suivant le rapport de la masse totale de laitier (100) et de celle des cendres.

Nous renvoyons d'ailleurs le lecteur au travail du professeur Mathésius, qui donne une solution simple et facile à saisir du problème que nous traitons, solution qui constitue un des essais les plus intéressants de calcul appliqué à la conduite du haut fourneau.

IV. — MODIFICATIONS DU LIT DE FUSION NORMAL

Lorsqu'on a déterminé le lit de fusion normal, il est bon de dresser un tableau analogue au modèle ci-dessous :

On a par exemple calculé dans le tableau XXI la quantité d'addition nécessaire, avec une charge de minerais de 70 quintaux et de coke de 40 quintaux. Si l'on doit apporter des modifications à ce lit de fusion, qui consistent en général en faibles variations dans le mélange de minerais, le calcul est facile à faire, et il n'est pas nécessaire de l'expliquer.

Le calcul de la fonte que l'on obtiendra se fait comme le montre le tableau XXII :

TABLEAU XXI. — Calcul du lit de fusion

1	2	3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13
		Fe		Mn *		P		Cu		SiO ²		Al ² O ³		CaO		MgO		OXYGÈNE DE SiO ²		OXYGÈNE DES BASES		
MATIÈRES TRAITÉES	QUANTITÉS	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	PRIX	
Coke	q 40	0,71	28,40	0,02	0,80	0,1	4,00	0,01	0,40	5,83	233,20	3,81	152,4	1,23	49,20	0,46	18,40	3,09	31,2	2,31		
Fer spathique brut . .	35	39,78	1392,30	2,08		0,021		0,09		8,36		2,01		1,72		1,02		4,43		2,07		
Minerai magnétique I.	9	65,35		0,09		0,59		»		3,57		1,34		2,40		1,25		1,88	0,63	1,81		
Minerai magnétique II.	9	65,40		0,16		0,026		0,014		4,83		2,01		0,83		1,20		2,56		1,57		
Résidu du grillage des pyrites . .	6	50,24		0,10		0,005		0,10		4,82		2,04		0,26		0,14		2,56		1,40		
Fer spathique grillé .	8	47,79		2,78		0,0475		0,007		8,32		4,17		5,60		3,10		4,41		5,09		
Scories de réchauffage	2	49,20		1,08		0,06		0,07		31,45		2,73		0,14		0,10		16,67		1,48		
Minerai de manganèse.	1	9,90		38,76		0,32		0,017		7,42		1,60		0,50		0,24		15,19		5,48		
Total des minerais . .	70		3389,51		139,61		11,129		4,489		768,25		297,56		185,61		102,29		127,48		6,99	
Castine	q 9,18									3,0	27,54	1,10	9,18	50,0	459,00	7,0	64,26			17,49	145,96	
Schistes argileux . . .																						
Lit de fusion.			3389,51		139,61		11,13		4,49		795,79		306,74		644,61		166,53		127,48		152,95	
																			10	:	12	

* 40 p. 100 du manganèse passe dans le laitier. Pour le silicium on n'a pas tenu compte de la petite quantité (environ 5 p. 100 qui passe dans le fer).

Calcul de l'addition (15,90 x + 6,99) : 127,48 = 12 : 10.

Castine = x = $\frac{12 \cdot 127,48 - 69,9}{159} = 9,18 \text{ q.}$

TABLEAU XXII. — *Calcul de l'analyse de la fonte produite.*

		POIDS		
		kg.	p. 100.	
Fe	99 p. 100 du Fe de la charge. . .	3356,51	92,20	Fe
Mn	60 p. 100 du Mn de la charge . .	83,76	2,30	Mn
P	En totalité	11,13	0,30	P
Cu	En totalité	4,49	0,11	Cu
S				S
Si	5 p. 100 du Si de la charge. . . .	39,79	1,08	Si
C	4,3 p. 100 de la teneur en Fe. . .	146,20	4,01	C
Total .		3641,88	100,00	

V. — INFLUENCE DE LA TENEUR EN SOUFRE DE LA CHARGE

Le coke employé comme combustible contient rarement moins de 1 p. 100 de soufre et introduit par conséquent dans le fourneau des quantités de soufre plus fortes qu'il n'est admissible pour obtenir une bonne fonte.

Par l'emploi d'un laitier basique calcaire on peut empêcher le passage de ce soufre dans le fer. Comme une unité de S nécessite 1,25 unité de Ca, c'est-à-dire 1,75 CaO pour donner Ca S, il faut ajouter cette quantité de castine à celle qui a été calculée ci-dessus. Le plus simple sera, si la teneur en soufre est forte, d'abaisser de quelques centièmes le degré d'acidité du laitier, et de prendre, comme nous l'avons fait, 0,85 au lieu de 1,0.

Lorsqu'on a calculé le lit de fusion, il est absolument nécessaire de rapporter les poids des matières traitées, à une certaine quantité de fonte (en général 100 kg. ou 1 000 kg.), et de calculer quelles quantités de ces matières passent dans la fonte, dans le laitier ou dans les gaz du gueulard. C'est ce qui est indiqué dans le tableau XXIII.

Comme contrôle du calcul, on peut vérifier que l'analyse de la fonte ferme bien à 100 p. 100.

Dans les analyses des minerais il faut répartir le métal entre les différents oxydes, et équilibrer les petites différences qui peuvent exister par CO^2 ou H^2O .

On obtient ainsi la composition définitive du laitier dont on peut déterminer le point de fusion au moyen du diagramme de Boudouard.

Le laitier produit, dans l'exemple que nous avons choisi, a la composition suivante :

SiO^2	Al^2O^3	CaO	MgO	CaS	FeO	MnO
38,0	16,9	20,55	14,00	6,3	0,42	3,83

TABLEAU XXIII. — Matières nécessaires pour 100 kilogrammes de fonte.

	ANALYSE DES MATIÈRES					QUANTITÉS NÉCESSAIRES POUR 100 KG. DE FONTE						RÉPARTITION DES MATIÈRES				
	Minerai	Minerai	Minerai	Addition.	Cendres de coke (soufre).	Minerai	Minerai	Minerai	Chaux.	Cendres de coke.	total.	Fonte.	Laitier.		Gaz du gueulard.	Oxygène de réduction.
	I	II	III			I	II	III					kg.	p. 100.		
						13,5	26,5	137,0	5,25	10,0	192,25					
Fe ² O ³		65,0	60,0				17,20	82,30			99,50					
FeO	55,0	22,3	10,90	0,64	8,0	7,44	5,95	14,98	0,03	0,8	29,20	92,72	0,22	0,42		35,76
Fe	43,04	63,0	50,92	0,50	6,25	5,80	16,65	69,80	0,02	0,62	92,89					
MnO	0,10	0,22	3,55	»	1,00	0,01	0,05	4,85		0,1	5,01	2,320	2,00	3,83		0,69
Mn	0,08	0,17	2,76								3,87					
CuO	»	0,07	»								0,02					
Cu							0,02				0,016	0,016				0,004
Al ² O ³	8,47	1,7	3,52	0,20	25,0	1,15	0,45	4,80	0,01	2,5	8,91		8,91	16,90		
SiO ²	17,27	5,3	9,21	0,86	45,0	2,33	1,40	12,60	0,05	4,5	20,88	0,492	19,90	38,00		0,486
Si											9,85					
CaO	4,56	0,6	5,76	54,21	5,0	0,62	0,16	7,80	2,84	0,5	11,92		10,92	20,55		0,302
MgO	2,43	0,5	4,62	1,35	5,0	0,32	0,13	6,32	0,07	0,5	7,34		7,34	14,00		
P ² O ⁵	6,15	0,02	0,06			0,83	0,005	0,08			0,915					
P											0,397	0,397				
S	0,77	»	0,35		1,0	0,10		0,48		0,1	0,68	0,400	CaS 1,28	6,30		
CaS	»	4,00	»		10,0		1,06			1,0	2,06		2,06			
CO ²	2,25		1,26	42,74		0,30		1,73	2,25		4,28	[C = 3,955]			4,28	
H ² O	3,00	0,29	0,77			0,40	0,075	1,06			1,535				1,535	
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	13,50	26,500	137,00	5,25	10,0	192,250	100,00	52,63	100,00	5,815	37,76
								192,25						Total	192,25	

C. Buisson — Haut fourneau.

3

CALCUL DU LIT DE FUSION

33

Son point de fusion, d'après le diagramme de Boudouard est compris entre 1300° et 1400° et il est voisin de celui des laitiers les plus fusibles.

Les trois éléments SiO_2 , Al_2O_3 , CaO sont entre eux dans le rapport 50,25 : 22,50 : 27,25 si l'on pose $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} = 100$, pour pouvoir reporter le laitier sur le diagramme.

De même si l'on veut se reporter au diagramme de Mathesius, on voit que l'on a 38 p. 100 SiO_2 , 16,09 p. 100 Al_2O_3 et 45,4 p. 100 bases.

Le poids de laitier pour 100 kilogrammes fonte est de 52,6 kg. ; il est donc compris dans des limites convenables.

III

CALCUL DE LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE

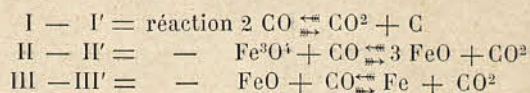
I. — LES RÉACTIONS RÉDUCTRICES DANS LE HAUT FOURNEAU

Les calculs faits jusqu'à présent ne sont que préparatoires et leur seule importance est de fixer la meilleure composition du laitier.

Les calculs qui vont suivre, et en première ligne celui de la consommation de combustible, supposent connues les réactions qui se passent à l'intérieur du haut fourneau, que nous devons donc étudier maintenant.

Grâce aux recherches de Boudouard¹ et à celles de Baur et Glässner², nous pouvons représenter graphiquement ces réactions (voir le travail de l'auteur : *Le diagramme du haut fourneau*, Stahl und Eisen 1908, n° 12).

Ces résultats sont figurés sur le diagramme ci-dessous (fig. 9) où sont portées en abscisses les températures, et en ordonnées les volumes p. 100 de CO² et de CO, en posant CO² + CO = 100. On obtient ainsi trois courbes représentant chacune l'état d'équilibre d'une des trois réactions suivantes :



Tandis que la courbe I, établie par Boudouard, représente l'état d'équilibre d'une atmosphère d'acide carbonique et d'oxyde de carbone en présence de carbone, les courbes II et III, dressées par Baur et Glässner, représentent les états d'équilibre de la réduction ou de l'oxydation des oxydes Fe³O⁴ et FeO par CO et CO². La réunion de ces courbes donne donc une image de la façon dont se comportent ces oxydes de fer dans une atmosphère de CO² et CO, en présence du car-

¹ Octave Boudouard. Thèses-Paris 1902.

² E. Baur et A. Glässner. Influence de C, CO et CO² sur le fer et ses oxydes (*Zeitschr. f. phys. Chemie*, 43 p. 354, *Stahl u. Eisen* 1903, p. 556). Voir aussi de Hermann Mehner : *Etats d'équilibre dans la réduction des oxydes de fer*. Berlin, 1905.

bone, par conséquent une image des réactions qui se passent à l'intérieur du haut fourneau.

La courbe I doit se lire de droite à gauche, les courbes II et III de gauche à droite. En effet la première représente les réactions qui ont lieu dans le courant gazeux qui passe des hautes aux basses températures, les dernières, au contraire, celles qui se passent pendant la descente des chargés de la zone froide à la zone chaude du fourneau.

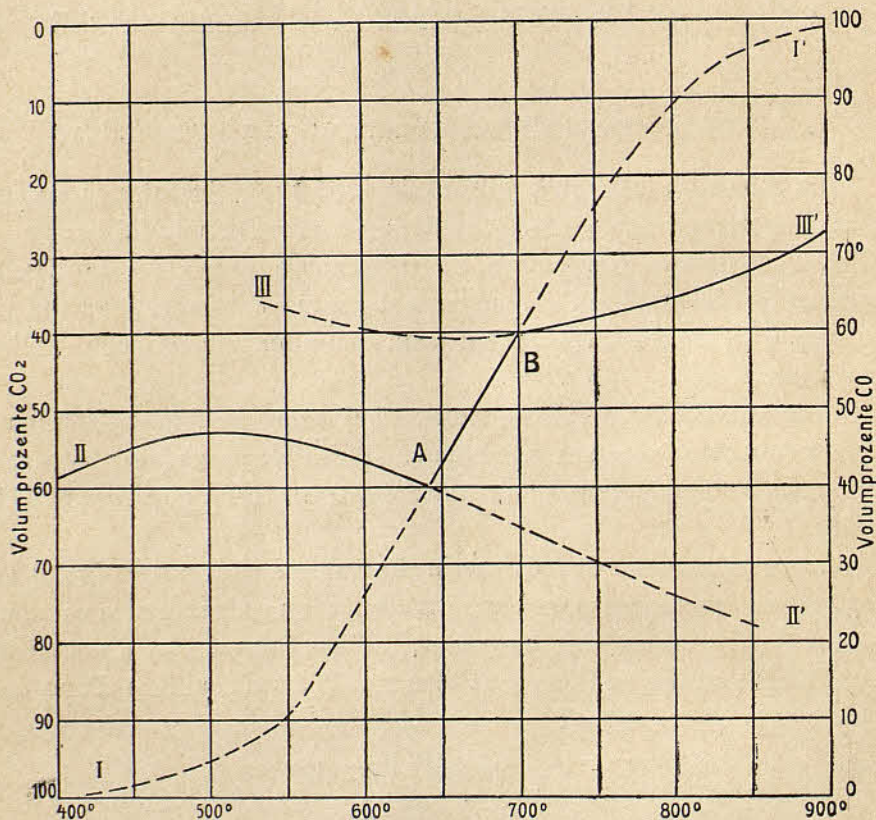


Fig. 9. — Diagramme de l'état d'équilibre des oxydes de fer dans une atmosphère de CO et CO₂.

Volumprocente = volumes p. 100.

L'examen de la courbe I, prise isolément, montre nettement la tendance énergique de l'oxyde de carbone à se transformer en acide carbonique, entre les températures de 800° et 500°, soit qu'il y ait dissociation comme l'indique la réaction $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$, soit qu'il y ait oxydation $\text{CO} + \text{O} = \text{CO}_2$. Tandis qu'à 800° l'état d'équilibre correspond à environ 90 p. 100 CO et 10 p. 100 CO₂, cette proportion est inverse à 500°. Quant à la question de savoir si l'acide carbonique se forme, à mesure que le refroidissement se poursuit, par dissociation ou par oxydation, elle dépend des réactions susceptibles de fournir l'oxy-

gène nécessaire pour que la réaction $\text{CO} + \text{O} = \text{CO}^2$ soit possible, et par conséquent des minerais. Si l'oxygène des minerais est mis facilement en liberté, il y a oxydation du CO, ou, ce qui revient au même, réduction du minerai par CO.

La tendance à former CO^2 commence vers $1\ 000^\circ$, mais n'est sensible qu'à partir de 800° . Au-dessus de $1\ 000^\circ$ CO^2 ne peut exister en présence du carbone : l'acide carbonique formé est aussitôt transformé en CO par le carbone.

Dans les parties du fourneau où règne une température supérieure à $1\ 000^\circ$ on ne peut donc parler de réduction par l'oxyde de carbone qu'en considérant le CO^2 formé comme immédiatement transformé par le carbone en CO. C'est là un résultat qui, au point de vue thermique comme au point de vue pratique, est équivalent à une réduction directe par le carbone solide, avec formation de CO aux températures inférieures à 500° , où l'oxyde de carbone ne peut exister en présence de carbone et d'acide carbonique; la transformation de CO en CO^2 d'après la réaction $2\text{CO} = \text{CO}^2 + \text{C}$ sera d'autant plus complète que les minerais ont moins de tendance à abandonner leur oxygène, nécessaire pour former CO^2 par combustion. A ces températures il se produit donc une séparation du carbone du gaz.

La courbe II représente l'équilibre de l'oxyde Fe^3O^4 dans une atmosphère de CO^2 et CO. Si le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ correspond, pour une certaine température, à la valeur indiquée par la courbe, il y a équilibre, c'est-à-dire que la réaction $\text{Fe}^3\text{O}^4 + \text{CO} \rightleftharpoons 3\text{FeO} + \text{CO}^2$ ne se fait ni dans un sens ni dans l'autre. Si ce rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ est plus grand que ne l'indique la courbe, la tendance qui domine est celle qui aboutit à diminuer ce rapport, par conséquent à former CO^2 . La réaction se fait de gauche à droite; il y a réduction si le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ est plus petit, il se forme du CO, la réaction se fait de droite à gauche; il y a oxydation.

La courbe III, qui représente la réaction $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}^2$ appelle des observations semblables. Il y a tendance à la réduction si le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ est plus grand que ne l'indique la courbe, tendance à l'oxydation, s'il est plus petit.

En examinant l'ensemble des trois courbes, on voit tout d'abord quelle devrait être la valeur théorique du rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ pour qu'il y ait toujours, aux différentes températures, action réductrice sur les oxydes de fer. Si le minerai ne se composait par exemple que de Fe^3O^4 , on devrait avoir une valeur de $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ toujours un peu plus grande que ne l'indiquent les branches de la courbe.

On voit en outre que c'est seulement aux points A et B, c'est-à-dire à des températures d'environ 650 et 750° qu'il peut y avoir équilibre stable des trois systèmes; à toute autre température il y a rupture de cet état d'équilibre. Examinons maintenant comment cet état de rupture d'équilibre agit sur l'allure des réactions représentées par les courbes. Le principe général est que la tendance pour chacun des systèmes à reprendre son état d'équilibre est d'autant plus forte qu'il en est plus éloigné.

Supposons par exemple qu'on ait trouvé, à la température de 625°, pour le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$ la valeur $\frac{70}{30}$, alors que d'après la courbe FeO on devrait avoir $\frac{60}{40}$, d'après la courbe Fe³O⁴ : $\frac{40}{60}$ et d'après la courbe d'équilibre de Boudouard $\frac{30}{70}$; dans les trois cas, le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$ est plus élevé que ne l'indiquent les courbes, on aura donc, théoriquement, tendance réductrice sur les oxydes de fer. Mais c'est le système $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{O}$ qui est le plus éloigné de son état d'équilibre; c'est donc dans ce système la tendance à la dissociation du CO qui sera la plus forte. La tendance de l'oxyde de carbone à se décomposer en CO₂ et C sera plus grande que la tendance, nécessaire pour qu'il y ait réduction, que devrait avoir FeO à se diviser en Fe et O.

Dans la réaction $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2$ la molécule de CO qui agit n'est plus sous cette forme, mais le premier membre de l'égalité doit s'écrire $2\text{FeO} + (\text{CO}_2 + \text{O})$.

Dans ce cas on ne peut donc imaginer aucune réaction réductrice; et il en est de même, *a fortiori*, pour les oxydes de fer supérieurs.

Donc, pour mesurer la tendance à la réduction, il ne suffit pas de considérer le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$; il faut encore que la tendance à la dissociation soit plus forte pour les oxydes de fer que pour l'oxyde de carbone.

Aux basses températures, jusqu'à 500°, c'est la tendance à la dissociation de l'oxyde de fer Fe²O³ qui est la plus forte; celle de l'oxyde Fe³O⁴ est minima vers 500° et croît ensuite rapidement avec la température. Celle du protoxyde FeO est minima vers 700°, mais l'action réductrice jusqu'à cette température est influencée par la grande valeur du rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$ nécessaire, et par la présence des autres oxydes. Au-dessus de 700°, la tendance à la dissociation est un peu moins favorable, mais l'action réductrice du CO beaucoup plus forte.

Enfin la réduction directe par le carbone solide, commence vers 650° et est seule possible au-dessus de 1000°.

On peut résumer ainsi les réductions qui se font dans le haut fourneau :

1° Jusqu'à la température de 500°, l'action réductrice de l'oxyde de carbone ne peut s'exercer que sur le sesquioxyde de fer (Fe^2O^3), même si le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ est élevé, car l'oxyde de carbone a une très forte tendance à se dissocier.

2° La réduction de l'oxyde Fe^3O^4 commence à devenir sensible au-dessus de 500°, et s'accroît avec la température au-dessus de 650°, l'oxyde Fe^3O^4 a une forte tendance à dissocier, aussi est-il probable que l'action réductrice du C solide commence à se manifester. En tous les cas, jamais cet oxyde ne donne directement du fer, mais toujours du protoxyde, d'après la formule de dissociation : $\text{Fe}^3\text{O}^4 = 3\text{FeO} + \text{O}$.

3° La réduction du protoxyde (FeO) par l'oxyde de carbone ne commence pas avant 650°; elle est favorisée vers 700° par la faible valeur du rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$, mais elle se fait surtout entre 700° et 1000°, et se termine au-dessus de cette température par le carbone solide.

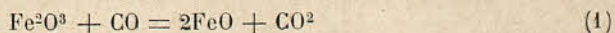
Il est donc désirable d'étendre à la plus grande partie possible du fourneau la zone des températures comprises entre 700° et 1000°.

4° Pour que le courant gazeux qui monte dans le fourneau puisse exercer une action réductrice, il faut que le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ soit toujours plus grand que ne l'indiquent les courbes en traits pleins du diagramme I.

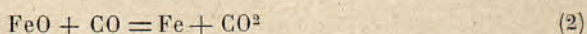
5° Comme les branches de ces courbes ne donnent que le minimum de ce mélange gazeux, l'action réductrice du courant gazeux sera d'autant plus intense que le rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ sera plus grand. La teneur en CO des gaz dépendant de la consommation de combustible, il n'est pas indifférent de rechercher comment se place dans le diagramme la courbe du rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ pratiquement le plus favorable. Nous reviendrons plus loin sur cette question.

Si nous examinons comment se fait la réduction des différents oxydes de fer, nous établirons les **équations de réduction** suivantes :

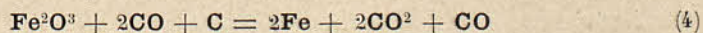
1° Fe^2O^3 . La réduction du sesquioxyde de fer ne donne jamais directement du fer; elle se fait toujours par l'intermédiaire du protoxyde FeO :



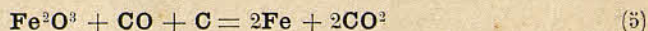
Le FeO est réduit, en partie par l'oxyde de carbone, en partie par le carbone :



En additionnant les 3 équations, on obtient :



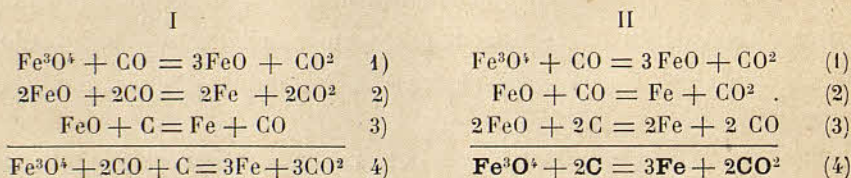
L'ensemble des réactions exige donc 2 molécules de CO, mais en produit une; en résumé on peut donc écrire simplement :



Les réactions se passent bien comme l'indiquent les équations (1) à (3), mais pour le calcul des quantités de C et de CO nécessaires pour la réduction, et des quantités de chaleur mises en jeu, on emploiera l'équation (5). Le résultat du calcul est en effet le même, que l'on calcule successivement les équations (1), (2) et (3), ou immédiatement l'équation (5).

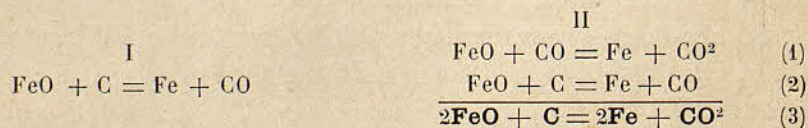
Dans toute réaction on doit tenir compte des pertes et des gains de chaleur. La décomposition de l'oxyde exige la chaleur, la combustion de CO ou C avec l'oxygène de l'oxyde en produit. Pour que la réaction puisse avoir lieu, il faut que la chaleur qui manque soit apportée de l'extérieur.

2. Fe^3O^3 . La réduction de Fe^3O^3 pourrait se faire de deux façons différentes :



Le deuxième mode est le plus vraisemblable, car il exige plus de chaleur prise à l'extérieur que le premier, et l'on sait que la réduction de Fe^3O^3 est très difficile.

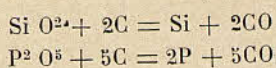
3. FeO . La réduction du protoxyde peut aussi être imaginée de deux façons différentes :



Dans des conditions peu favorables, il est possible que la réduction se fasse seulement par le moyen du C solide (réaction I). Mais l'on sait, d'après le diagramme de Boudouard-Baur-Glässner qu'une partie du protoxyde de fer peut aussi être réduit par l'oxyde de carbone. On doit donc, dans les conditions normales, admettre la série de réactions II, lorsqu'à mi-hauteur du fourneau les conditions sont favorables à la réduction.

La réduction des oxydes de manganèse se fait d'une façon complètement analogue à celle des oxydes de fer.

Les oxydes P^2O^5 , SiO^2 , difficilement réductibles, ne sont décomposés qu'à haute température; l'agent réducteur est le carbone solide, et il se forme de l'oxyde de carbone. Les réactions peuvent être figurées de la façon suivante :



Quant aux oxydes facilement réductibles : CuO , PbO , ZnO , les deux premiers sont presque entièrement réduits par l'oxyde de carbone, et le dernier se comporte comme le protoxyde de fer FeO .

Les tableaux XXIV et XXV résument les réactions réductrices, en se plaçant au point de vue des quantités de C et de CO nécessaires, et des gaz produits. Dans le tableau XXIV ces chiffres sont rapportés à 1 kilogramme de métal, dans le tableau XXV à 1 kilogramme de minerai.

Au moyen de ces tableaux on peut donc calculer immédiatement toutes les quantités importantes d'une réaction quelconque.

Parmi les réactions à considérer figure aussi la décomposition de la vapeur d'eau entraînée par le vent, décomposition qui se fait dans le foyer du fourneau, d'après la formule :



Pour chaque kilogramme d'eau introduit dans le fourneau, il faut ainsi dépenser 1549 calories. Cette chaleur est enlevée au fourneau justement à l'endroit où elle est le plus nécessaire. Il est difficile de savoir ce que devient l'hydrogène mis en liberté dans cette réaction. S'il participe aux phénomènes de réduction, ce qui s'expliquerait aisément, l'hydrogène étant un agent réducteur tout aussi énergique que l'oxyde de carbone, on récupère les quantités de chaleur dépensées pour le mettre en liberté. Dans l'établissement du bilan thermique, ces quantités ne figureront pas, mais si l'hydrogène se retrouve dans les gaz du gueulard, la dépense de chaleur doit au contraire être inscrite au bilan.

Le soufflage à l'air humide entraîne une dépense de combustible plus forte qu'avec l'air sec; les hauts fourneaux marchent mieux en hiver qu'en été; en effet la dissociation de la vapeur d'eau enlève de la chaleur au point où elle est le plus nécessaire¹. Mais si l'on considère que cette soustraction est compensée par la participation de l'hydrogène à la réduction, il n'est plus possible de donner aucune explication plausible de cette augmentation de consommation de combustible. D'ailleurs celle-ci est faible et la dessiccation du vent, dont il a été tellement ques-

¹ Le fait que les hauts fourneaux marchent mieux en hiver qu'en été peut aussi s'expliquer en remarquant que le rendement des machines soufflantes est meilleur en hiver lorsqu'elles aspirent de l'air froid, qu'en été, où elles chassent dans le fourneau, à chaque coup de piston, moins d'oxygène.

TABLEAU XXIV. — Réactions réductrices.

OXYDE RÉDUIT	ÉQUATION DE RÉDUCTION	POUR LA RÉDUCTION DE 1 KILOGRAMME DE MÉTAL						
		IL FAUT		GAZ PRODUITS		GAINS ET PERTES DE CHALEUR		
		C	CO	CO	CO ²	Gains.	Pertes.	Différence.
		kg.	kg.	kg.	kg.	cal.	cal.	cal.
Fe ² O ³	Fe ² O ³ + CO + C = 2Fe + 2CO ²	0,107	0,250	»	0,785	1 464	1 800	— 336
Fe ³ O ⁴	Fe ³ O ⁴ + 2CO + C = 3Fe + 3 CO ²	0,071	0,333	»	0,786	1 376	1 650	— 274
—	Fe ³ O ⁴ + 2C = 3Fe + 2CO ²	0,142	»	»	0,423	1 147	1 650	— 503
FeO	FeO + C = Fe + CO	0,214	»	0,500	»	528	1 350	— 822
—	2FeO + C = 2Fe + CO ²	0,107	»	»	0,391	864	1 350	— 486
Mn ² O ³	Mn ² O ³ + CO + C = 2Mn + CO ²	0,109	0,255	»	0,801	1 493	2 060	— 567
Mn ³ O ⁴	Mn ³ O ⁴ + 2CO + C = 3Mn + 3CO ²	0,072	0,339	»	0,802	1 403	1 970	— 567
—	Mn ³ O ⁴ + 2C = 3Mn + 2 CO ²	0,145	»	»	0,431	1 169	1 970	— 801
MnO	MnO + C = Mn + CO	0,218	»	0,510	»	538	1 730	— 1 192
—	2MnO + C = 2Mn + CO ²	0,109	»	»	0,399	881	1 730	— 849
SiO ²	SiO ² + 2C = Si + 2CO	0,845	»	1,936	»	2 087	7 830	— 5 743
P ² O ⁵	P ² O ⁵ + 5C = 2P + 5CO	0,966	»	2,256	»	2 386	5 900	— 3 514
CuO	CuO + CO = Cu + CO ²	»	0,440	»	0,691	1 056	320	+ 736
PbO	Pb + CO = Pb + CO ²	»	0,135	»	0,212	324	243	+ 81
ZnO	2ZnO + C = 2Zn + CO ²	»	»	»	»	»	1 314	»
H ² O	H ² O + C = 2H + CO	6,00	»	14,00	»	14 820	28 780	— 13 960

TABLEAU XXV. — Réactions réductrices.

MINÉRAI	ÉQUATION DE RÉDUCTION	POUR LA RÉDUCTION DE 1 KILOGRAMME DE MINÉRAI						
		IL FAUT		GAZ PRODUITS		GAINS ET PERTES DE CHALEUR		
		C	CO	CO	CO ²	Gains.	Pertes.	Différence.
		kg.	kg.	kg.	kg.	cal.	cal.	cal.
Fe ² O ³	Fe ² O ³ + CO + C = 2Fe + 2CO ²	0,075	0,175	»	0,550	1 026	1 260	— 234
Fe ³ O ⁴	Fe ³ O ⁴ + 2CO + C = 3Fe + 3CO ²	0,052	0,241	»	0,569	995	1 193	— 198
—	Fe ³ O ⁴ + 2C = 3Fe + 2CO ²	0,103	»	»	0,379	832	1 193	— 361
FeO	FeO + C = Fe + CO	0,166	»	0,389	»	411	1 053	— 624
—	2FeO + C = 2Fe + CO ²	0,083	»	»	0,305	673	1 053	— 380
Mn ² O ³	Mn ² O ³ + CO + C = 2Mn + 2CO ²	0,076	0,178	»	0,561	1 041	1 434	— 393
Mn ³ O ⁴	Mn ³ O ⁴ + 2CO + C = 3Mn + 3CO ²	0,053	0,246	»	0,580	1 004	1 420	— 416
—	Mn ³ O ⁴ + 2C = 3Mn + 2CO ²	0,105	»	»	0,386	848	1 420	— 572
MnO	MnO + C = Mn + CO	0,169	»	0,397	»	417	1 340	— 923
—	2MnO + C = 2Mn + CO ²	0,085	»	»	0,311	686	1 340	— 654
SiO ²	SiO ² + 2C = Si + 2CO	0,397	»	0,927	»	980	3 680	— 2 700
P ² O ⁵	P ² O ⁵ + 5C = 2P + 5CO	0,422	»	0,988	»	1 042	2 732	— 1 690
CuO	CuO + CO = Cu + CO ²	»	0,352	»	0,554	814	256	+ 588
PbO	PbO + CO = Pb + CO ²	»	0,130	»	0,197	312	223	+ 89
ZnO	2ZnO + C = 2Zn + CO ²	»	»	»	»	»	1 055	»
H ² O	H ² O + C = 2H + CO	0,666	»	1,555	»	1 645	3 194	— 1 519

CALCUL DE LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLES

tion à la suite des essais de Gayley, est superflue. Les espérances exagérées que ces essais avaient provoquées ont été ramenées à leur juste valeur par les calculs théoriques et n'auraient jamais pris naissance si l'étude théorique du haut fourneau avait répandu dans tous les milieux des connaissances plus exactes.

Le tableau XXVI indique les réactions réductrices pour l'exemple choisi :

TABLEAU XXVI. — Tableau de réduction de l'exemple.

QUANTITÉS à réduire pour obtenir 100 kilogrammes de fonte.		POUR OBTENIR 100 KILOGRAMMES DE FONTE						
		SONT NÉCESSAIRES		GAZ PRODUITS		GAINS ET PERTES DE CHALEUR		
Matières.		C	CO	CO	CO ²	Gains.	Pertes.	Différence.
	kg.					cal.	cal.	
Fe ² O ³	99,5	0,075 7,46	0,175 17,41		0,550 54,725	1026 102 087	1260 125 370	
FeO	28,98	0,0833 2,41			0,305 8,84	673 19 503	1053 30 516	
MnO	3,01	0,085 0,25			0,311 0,94	686 2 065	1340 4 033	
CuO	0,02		0,352 0,01		0,554 0,01	844 17	256 5	
SiO ²	0,98	0,397 0,39		0,927 0,91		980 960	3680 3 606	
P ² O ⁵	0,915	0,422 0,38		0,988 0,90		1042 953	2732 2 499	
H ² O	2,6	0,666 1,73		1,555 4,04		1645 4 277	3194 8 304	
		12,62	17,42	5,85	64,51	129 862	174 333	-44 471

Pour pouvoir faire figurer dans ce tableau l'humidité à détruire, il faut faire une hypothèse, puisque la quantité d'air soufflé n'est pas encore connue. L'exemple considéré envisageant un cas tout à fait normal, nous choisirons une valeur moyenne pour la quantité d'air. Le choix arbitraire de cette masse d'air est d'autant plus admissible qu'il ne s'agit que de quantités d'eau faibles, et que les variations de la température entraînent sur ces dernières, des différences plus fortes que celles qui correspondraient à une erreur de 100 kilogrammes sur la quantité d'air.

Normalement, pour 100 kilogrammes de fonte, on admet une consommation d'air de 350 kilogrammes qui contiennent (voir tabl. XXXIII) à 10°C, 7,5 gr. d'eau par kilogramme. Au total la quantité d'eau est donc d'environ 2,6 kg.

Le tableau XXVI indique exactement les quantités de chaleur mises en jeu pour la réduction des matières de la charge. On voit en outre qu'il

faut 12,62 kg. de C et 17,42 kg. de CO. Ces derniers sont produits par la combustion du C du coke sous l'action de l'oxygène du vent. Cette quantité totale de carbone donne 5,85 kg. de CO et 64,51 kg. de CO². La balance des quantités de chaleur se traduit par un déficit de 44 471 calories, qu'il faudra fournir en brûlant une quantité de combustible plus forte.

Outre ces dépenses de chaleur pour les réductions, il y en a d'autres à considérer. Mais avant d'en parler, nous allons d'abord établir un bilan thermique provisoire comprenant les quantités de chaleur connues jusqu'à présent.

II. — LE BILAN THERMIQUE PROVISOIRE

Nous établissons ce bilan thermique provisoire dans le but de pouvoir étudier les pertes de chaleur qui rendent nécessaire la combustion d'une certaine quantité de carbone par le vent insufflé.

Le tableau XXVII indique les valeurs des différentes quantités de chaleur.

TABLEAU XXVII. — *Bilan thermique provisoire.*

CHALEURS REÇUES	CALORIES par 100 kilo- grammes de fonte.	CHALEURS DÉPENSÉES	CALORIES pour 100 kilo- grammes de fonte.
Chaleur reçue pendant la réduction	129 862	I. Chaleur dépensée pour la réduction	174 333
		II. Chaleur emportée par les produits fondus :	
		a) Fonte	26 500
		b) Laitier	23 680
		III. Chaleur emportée par les gaz du gueulard formés jusqu'à présent :	
		a) Mise en liberté du CO ² des charges	1 268
		b) Vaporisation de l'eau .	1 029
		c) Gaz du gueulard formés jusqu'à présent	3 308
		Chaleurs dépensées jus- qu'à présent	230 118
		IV. Pertes par l'eau de refroi- dissement et par rayon- nement (15 p. 100 de 230 118)	34 520
Chaleur manquante K =	134 776		
Total	264 638	Total	264 638

Les différents articles de ce bilan sont calculés de la façon suivante :

a) *Les chaleurs reçues et dépensées pour la réduction* ont été calculées ci-dessus (tableau XXVI).

b) *Chaleur emportée par les produits fondus.* — Les produits obtenus, fonte et laitier, quittent le fourneau à une température en général bien plus élevée que leur point de fusion.

D'après les recherches de Gruner, 1 kilogramme de fonte, à la sortie du fourneau, entraîne 265 calories. Dans les fours modernes, qui travaillent avec une température du vent plus élevée, ce chiffre est peut-être un peu plus fort. Il dépend de la nature de la fonte produite; il est plus fort pour la fonte grise que pour la fonte blanche. On peut d'ailleurs le calculer à l'aide de considérations théoriques. En admettant que la chaleur spécifique moyenne de la fonte soit 0,15, et que la température de la fonte, à la coulée, soit de 1600°C, la chaleur emportée sera donc de $1600 \times 0,15 = 240$ calories en plus de la chaleur de fusion, qui est de 30 calories environ. Au total, on aura donc, pour 1 kilogramme de fonte, 270 calories, chiffre presque égal à celui donné par Gruner.

La chaleur emportée par 100 kilogrammes de fonte est donc d'environ 26 500 calories.

La chaleur emportée par le laitier peut se calculer de même. Gruner évalue la quantité de chaleur contenue dans 1 kilogramme de laitier à 450 calories dans la marche en fonte blanche et 500 calories en fonte grise.

Si l'on veut les calculer, on obtient, en admettant pour la chaleur spécifique de la fonte le chiffre de 0,22¹ : $0,22 \times 1600 = 350$ calories plus la chaleur de fusion 50 calories : 400 calories. La quantité de laitier produit par 100 kilogrammes de fonte étant de 52,63 kg. (voir tabl. XXIII) la chaleur emportée par le laitier est donc, en admettant les chiffres de Gruner, de $52,62 \times 450 = 23\,680$ calories.

c) *Perte par les gaz de gueulard formés jusqu'à présent.* — On a admis (page 12) que la température des gaz était de 200°C. Une série de produits gazeux quittent le fourneau à cette température, entraînant des quantités de chaleur qui se calculent comme suit :

1° L'acide carbonique introduit dans la charge (d'après le tableau XXIII, il y a 4,28 kg. de CO² par 100 kilogrammes de fonte) se trouve surtout dans la castine, mais aussi dans le minerai de fer, combiné à FeO. La séparation du CO² de la chaux (dans CaCO³) ou du protoxyde de fer (dans FeCO³) exige de la chaleur. D'après Jordan (*Revue des*

¹ D'après Wedding. (*Eisenhüttenkunde*, III p. 590), cette chaleur spécifique varie de 0,27 à 0,36.

Mines 1895, p. 6) la décomposition de 1 kilogramme FeCO^3 exige 130 calories; celle de 1 kilogramme CaCO^3 , 447 calories. (D'après Wedding, *Eisenhüttenkunde*, 2^e édit., I, p. 912-915: pour FeCO^3 , 259 calories; pour CaCO^3 , 425 calories).

On peut désormais calculer la chaleur dépensée pour la mise en liberté de CO^2 :

2,03 kg. de CO^2 sont combinés au fer et 2,25 kg. à CaO . On a donc :

$$2,03 \times 130 + 2,25 \times 447 = 1268 \text{ calories.}$$

2^o Dans la charge se trouve également de l'eau. Abstraction faite de l'eau contenue dans le combustible, qui nous est encore inconnue, cette quantité d'eau est de 1,53 kg. (tabl. XXIII). Pour vaporiser cette eau il faut, en admettant que les matériaux sont chargés à 10°C :

$$(90 + 536 = 626 \text{ calories.})$$

$$626 \times 1,53 = 956 \text{ calories.}$$

536 est la chaleur de vaporisation de l'eau. La vapeur formée doit de plus être portée à 200°C.

Il faut donc encore $1,53 \times 0,48 \times 100 = 73$ calories.

Soit au total $956 + 73 = 1029$ calories.

3^o Les gaz formés jusqu'à présent, que les calculs que nous avons faits nous ont appris à connaître, se composent :

1^o des gaz de la charge : c'est-à-dire 4,28 kg. de CO^2 .

2^o des gaz formés pendant la réduction (voir tableau XXVI), c'est-à-dire 5,85 kg. CO et 64,51 kg. CO^2 .

Ces gaz entraînent, à 200°, les quantités de chaleur suivantes :

$$\text{CO}^2 (64,51 + 4,28) \times 0,22 \times 200 = 3027 \text{ calories.}$$

$$\text{CO} \quad 5,85 \times 0,24 \times 200 = \underline{281} \quad -$$

$$3308 \text{ calories.}$$

Le bilan thermique nous donne donc une somme de chaleurs dépensées, connues jusqu'à présent, de 230102 calories.

d) *Pertes par l'eau de refroidissement et par rayonnement.* — Tandis que les articles précédents du bilan thermique provisoire ont pu être déterminés exactement (et dans l'établissement d'un bilan provisoire, une exactitude rigoureuse n'est pas bien nécessaire), les pertes par l'eau de refroidissement et par rayonnement ne peuvent être connues que très approximativement. Lorsqu'il s'agira d'établir le bilan définitif, on pourra les évaluer exactement, par différence. Mais pour le moment, tant que la consommation de combustible n'est pas connue, il faut se contenter de chiffres approchés.

D'après Ledebur (*Métallurgie du fer*, 2^e vol. p. 69), la consommation d'eau pour le refroidissement d'un haut fourneau moderne est comprise entre 2 et 4 mètres cubes par minute. Pour un haut fourneau produisant 300 tonnes par jour, il faut donc 1 000 à 2 000 kilogrammes d'eau par 100 tonnes de fonte. Si l'on admet que l'eau n'est échauffée que de 15°, la perte de chaleur qu'entraîne le refroidissement est donc de 15 000 à 30 000 calories, c'est-à-dire 6,5 à 13 p. 100 de la dépense de chaleur calculée jusqu'à présent.

La perte par l'eau de refroidissement dépend naturellement de la construction du fourneau, notamment du nombre des tuyères, des bâches de circulation d'eau autour des étalages et surtout de la construction du creuset. Dans les hauts fourneaux au charbon de bois, qui n'admettent pas un refroidissement aussi intense que les hauts fourneaux au coke, la perte par l'eau de refroidissement sera plus faible et atteindra à peine 1 p. 100 de la dépense de chaleur calculée précédemment. On peut dire avec assez de certitude que plus la perte par l'eau de refroidissement est grande, plus la perte par rayonnement est réduite.

Cette dernière est encore plus difficile à évaluer. D'après divers bilans établis pour des hauts fourneaux de différents types, on peut conclure qu'elle est comprise entre 5 p. 100, pour les petits hauts fourneaux au charbon de bois protégés et plus de 15 p. 100 pour les grands hauts fourneaux au coke. On voit qu'elle varie entre des limites très étendues.

La perte totale par l'eau de refroidissement et par rayonnement sera donc, d'après ces considérations :

Pour de petits hauts fourneaux au charbon de bois	environ 6 p. 100.
Pour des hauts fourneaux au coke avec peu de refroidissement	environ 10 p. 100-15 p. 100.
Pour des hauts fourneaux au coke avec fort refroidissement	— 15 p. 100-20 p. 100.
Pour des marches spéciales (ferromanganèse, ferrosilicium)	— 25 p. 100 et plus.

Si l'on admet, pour l'exemple proposé plus haut une perte totale égale à 15 p. 100 de la dépense de chaleur calculée jusqu'ici, on doit donc ajouter au bilan :

$$\frac{230\,000}{100} \times 15 = 34\,520 \text{ calories.}$$

ce qui donne, pour le bilan thermique provisoire un déficit K = 134 800 calories environ.

III. — CALCUL DE LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLES

Nous pouvons maintenant aborder l'étude de la consommation de combustible. Le combustible que consomme le haut fourneau se compose de trois éléments :

1° Le carbone qui entre dans la composition de la fonte (C_F). Dans notre exemple $C_F = 3955$ (tableau XXIII).

2° Le carbone nécessaire pour la réduction (C_R). Dans notre exemple $C_R = 12,62$ (tableau XXVI).

3° Le carbone qui doit être brûlé et transformé en CO par l'oxygène du vent pour couvrir le déficit K (C_K). Jusqu'à présent nous ne connaissons pas encore la quantité de coke correspondant à cet usage.

Pour calculer ce nombre C_K (qui comprend en outre du carbone nécessaire pour couvrir le déficit K, celui qu'il faut pour égaler la chaleur emportée par les gaz formés dans la combustion de ce carbone lui-même) nous partirons des observations suivantes :

Si les gaz du gueulard étaient à 0°C, le déficit ne serait que de 134776 calories. Pour compenser ce déficit par la combustion de carbone (C_{K1}) sous l'action du vent à la température T_v , il faudrait :

$$C_{K1} = \frac{K}{2470 + 5,79 \times 0,24 T_v} \text{ Cg carbone}$$

Cette quantité de carbone donne une quantité de gaz égale à :

$$C_{K1} \times 6,79 = \frac{K}{2470 + 5,79 \times 0,24 T_v} \times 6,79 \text{ kg}$$

En effet 1 kilogramme C exige 5,79 kg. d'air pour brûler en CO et donne donc $1 + 5,79 = 6,79$ kg. de gaz.

(Tableau I des annexes.)

Ces gaz quittent le fourneau à la température T_g , causant donc une perte de chaleur de :

$$\frac{K}{2470 + 5,79 \times 0,24 T_v} \times 6,79 \times 0,24 T_g \text{ calories.}$$

Posons :

$$\begin{aligned} 2470 + 5,79 \times 0,24 T_v &= a \\ 6,79 \times 0,24 T_g &= b \end{aligned}$$

La quantité de chaleur entraînée par les gaz est donc $\frac{K}{a} \cdot b$

Pour la compenser il faut, d'après le calcul ci-dessus une nouvelle quantité de carbone (C_{K2})

$$C_{K2} = \frac{\frac{K}{a} \cdot b}{2470 + 5,79 \times 0,24 T_v} = \frac{Kb}{a^2}$$

Les gaz du gueulard s'augmentent donc de $\frac{K \cdot b}{a^2} \times 6,79$ kg. et la perte de chaleur de $\frac{Kb}{a^2} \times 6,79 \times 0,24 T_g = \frac{Kb^2}{a^2}$ calories. Cette nouvelle perte exige la consommation d'une nouvelle quantité de carbone C_{k3} , et ainsi de suite.

La somme de toutes ces quantités de carbone est donc :

$$C_k = C_{k1} + C_{k2} + C_{k3} + \dots = \frac{K}{a} + \frac{Kb}{a^2} + \frac{Kb^2}{a^3} + \dots = \frac{K}{a} (1 + \frac{b}{a} + \frac{b^2}{a^2} + \frac{b^3}{a^3} + \dots)$$

La parenthèse $(1 + \frac{b}{a} + \frac{b^2}{a^2} + \frac{b^3}{a^3} + \dots)$ est une série géométrique dont la somme est :

$$\frac{1}{1 - \frac{b}{a}} = \frac{a}{a - b}$$

On a donc enfin :

$$C_k = \frac{K}{a} \cdot \frac{a}{a - b} = \frac{K}{a - b}$$

TABLEAU XXVIII. — $C = \frac{K}{a - b}$

t_v	$t_g =$	0°	20°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
		0	32,6	65,2	81,5	97,8	114,1	130,4	146,7	163	179,3	195,6	211,9	228,2	244,5
0°	0	4,048	4,105	4,169	4,184	4,219	4,246	4,273	4,310	4,329	4,366	4,405	4,424	4,464	4,483
25°	34,7	3,992	048	098	132	166	201	219	237	255	310	347	366	405	444
50°	69,5	937	3,984	032	065	098	132	149	184	219	237	273	291	329	367
100°	139	3,831	3,891	3,937	3,952	3,984	4,016	4,032	4,065	4,098	4,115	4,149	4,166	4,201	4,218
125°	173,5	787	831	875	3,906	3,937	3,968	3,984	016	048	065	098	115	149	166
150°	208	731	787	831	861	891	921	937	3,968	3,984	016	048	065	098	115
200°	278	636	690	731	759	787	816	831	861	876	3,906	3,937	3,952	3,984	4,016
225°	313	597	636	676	703	731	759	773	802	816	846	875	891	921	937
250°	347	546	597	636	663	690	717	731	759	773	802	831	846	875	891
275°	382	508	546	584	610	636	663	676	703	717	745	773	787	816	831
300°	416	3,460	3,509	3,546	3,571	3,584	3,610	3,630	3,649	3,676	3,690	3,717	3,738	3,759	3,779
325°	451	424	460	496	521	546	571	584	610	623	649	676	690	717	737
350°	486	389	424	460	484	508	533	546	571	584	610	636	649	676	696
375°	521	344	378	412	436	460	484	496	521	533	558	584	597	623	643
400°	556	311	344	378	401	424	448	460	484	496	521	558	584	610	630
450°	624	236	257	289	311	333	355	367	389	424	436	448	460	484	504
500°	695	3,164	3,194	3,225	3,246	3,267	3,289	3,300	3,322	3,344	3,355	3,378	3,389	3,412	3,423
550°	764	096	125	154	174	194	215	225	246	268	278	300	311	333	343
600°	834	030	058	086	105	125	144	154	174	195	205	225	236	257	267
650°	903	2,967	2,994	021	039	058	076	086	105	125	134	154	164	184	194
700°	972	906	932	2,958	2,976	2,994	012	021	039	058	067	086	095	115	125
800°	1 112	793	816	840	857	873	2,890	2,898	2,915	2,932	2,941	2,958	2,967	2,985	2,994
900°	1 248	688	710	732	747	762	777	785	801	817	824	840	849	865	874

expression dans laquelle :

$$a = 2470 + 5,79 \times 0,24 T_v$$

$$b = 6,79 \times 0,24 T_g$$

K = Déficit du bilan thermique provisoire.

Cette égalité, très simple, donne la quantité de combustible nécessaire pour combler le déficit K (augmenté de la chaleur emportée par les gaz provenant de la combustion de ce combustible) en supposant la température du vent égale à T_v .

Dans notre exemple, en supposant $T_g = 200^\circ\text{C}$ et $T_v = 450^\circ\text{C}$ on a

$$C_k = 13,48 \times 3,61 = 48,66 \text{ (d'après le tableau 28)}$$

$$C_v = \dots \dots \dots 3,95$$

$$C_n = \dots \dots \dots 12,62$$

Soit au total **C = \dots \dots \dots 65,23**

Admettons que le coke employé ait la composition suivante :

C	H	O + Az	S	Cendres	H ₂ O
81 p. 100	1 p. 100	2 p. 100	1 p. 100	12 p. 100	3 p. 100

Le poids de coke correspondant à $C = 65,23$ est de 80,5 kg.

Valeurs pour $\frac{10000}{a - b}$

160°	170°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	280°	300°	350°	400°	450°	t_v
260,8	277,1	293,4	309,7	326,0	342	358,6	375	391,2	409	423,8	456,4	489,0	570,5	652,0	773,5	
4,524	4,566	4,587	4,629	4,673	4,694	4,739	4,784	4,807	4,854	4,878	4,950	5,050	5,263	5,494	5,882	0°
464	504	524	566	587	629	672	716	739	784	807	878	975	181	405	780	25°
385	424	444	484	524	545	587	629	651	694	716	784	854	076	291	649	50°
4,255	4,291	4,310	4,347	4,386	4,405	4,444	4,484	4,504	4,545	4,566	4,629	4,716	4,901	5,102	5,435	100°
201	237	255	291	310	347	385	424	444	484	504	566	651	830	025	347	125°
149	184	201	237	255	291	329	366	385	405	444	504	587	761	4,950	263	150°
032	065	081	115	132	166	201	237	255	273	310	366	444	608	784	076	200°
3,968	4,000	016	048	065	098	132	166	184	219	237	291	366	524	694	4,975	225°
921	3,952	3,968	4,000	016	048	081	115	132	149	184	237	310	464	629	901	250°
861	891	906	3,937	3,952	4,000	016	048	065	098	115	166	237	385	545	807	275°
3,802	3,831	3,861	3,885	3,906	3,921	3,952	3,984	4,000	4,048	4,065	4,098	4,166	4,310	4,464	4,717	300°
759	787	802	831	861	3,875	3,906	3,937	3,952	3,984	4,000	048	115	255	405	651	325°
717	745	759	787	802	831	861	891	906	921	3,925	4,000	065	201	347	587	350°
663	690	703	731	759	773	802	831	846	875	891	3,937	4,000	132	273	504	375°
623	649	663	690	703	731	759	787	802	816	846	891	3,952	081	219	444	400°
521	546	558	584	610	623	649	676	690	731	731	773	831	3,952	081	291	450°
3,448	3,472	3,484	3,508	3,521	3,546	3,571	3,597	3,610	3,636	3,649	3,690	3,745	3,861	3,984	4,166	500°
367	389	401	424	436	460	484	508	521	546	558	597	649	759	3,875	065	550°
289	311	322	344	367	378	401	424	436	460	472	508	558	663	773	3,925	600°
215	236	246	267	289	300	322	344	355	378	389	424	472	571	676	846	650°
144	164	174	194	215	225	246	267	278	300	311	344	389	484	584	745	700°
012	030	039	058	077	086	105	125	134	154	164	194	236	322	412	558	800°
2,890	2,906	2,915	2,932	2,949	2,958	2,976	2,994	003	021	030	058	095	174	257	389	900°

Le tableau XXVIII donne les valeurs de $C_K = \frac{10\,000}{a - t}$, ce qui facilitera beaucoup les calculs numériques.

L'exemple suivant montrera jusqu'à quel point ce calcul peut servir de contrôle.

Le professeur Osann a établi dans *Sthal und Eisen*, 1901, p. 907, le bilan thermique d'un fourneau dont la consommation de combustible était connue. A l'aide du tableau XXIV on obtient facilement le bilan thermique provisoire :

<i>Chaleurs reçues :</i>		Calories
Fe réduit de Fe_2O_3 — 92 × 1464		134 688
Mn — Mn_2O_3 — 0,3 × 1169		350
Si — SiO_2 — 2,0 × 2087		4 174
P — P_2O_5 — 1,7 × 2386		4 056
	Déficit K.	<u>249 162</u>
	Total	392 378

<i>Chaleurs dépensées :</i>		Calories
1 Pour la réduction		194 366
2 — fusion		83 000
3 — mise en liberté de CO_2		68 823
4 Pertes par eau de refroidissement et par rayonnement ¹⁾		<u>49 189</u>
	Total	392 378

Le déficit est donc en gros de 249 000 calories. Osann donne comme température du vent 670°C ; il n'indique malheureusement pas celle du gueulard, pour laquelle nous admettrons le chiffre de 200°C. D'après le tableau XXVIII, pour 10 000 calories, $T_v = 670^\circ C$, $T_g = 200^\circ C$ on a $C = 3,25$. Pour $24,9 \times 10\,000$ calories, on aura donc $C_K = 80,9$ kg.

Il faut, pour la réduction, d'après le tableau XXIV, les quantités de carbone suivantes :

Fe	92 × 0,107 = 9,84	
Mn	0,3 × 0,142 = 0,04	
Si	2,0 × 0,845 = 1,69	
P	<u>1,7 × 0,966 = 1,64</u>	
		$C_n = 13,21$
		$C_k = 80,9$
	Dans la fonte.	<u>$C_f = 4,0$</u>
	Soit au total.	98,41 kg. de carbone.

Or le professeur Osann part d'une consommation de 98,4 kg. de carbone. Il y a donc concordance absolue entre la quantité calculée et la quantité réelle, et l'on voit combien le contrôle est simple à faire.

¹ Après déduction de la perte par les gaz du gueulard, que nous ne pouvons pas encore considérer, et en supposant une température au gueulard de 200° C.

La formule $C_K = \frac{K}{a-b}$, grâce à sa grande simplicité, permet de discuter la consommation de combustible d'un haut fourneau.

Le déficit K provient surtout de la réduction des minerais, donc de quantités constantes pour une certaine composition du lit de fusion. La grandeur de ce déficit ne dépend que des pertes par l'eau de refroidissement et par rayonnement, mais on peut aussi évaluer ces pertes dans des conditions déterminées et faire les corrections nécessaires suivant les variations de ces conditions. Naturellement c'est là le point faible de tous les calculs de quantité de chaleur. a et b sont fonctions des températures du vent et des gaz.

La discussion de la formule nous permet donc de voir quand la consommation de combustible passera par un maximum ou un minimum.

C_K est maximum, lorsque dans la formule

$$C_k = \frac{K}{2470 + 5,79 \times 0,24 T_v - 6,79 \times 0,24 T_g}$$

on a

$$5,79 \times 0,24 \left(T_v - \frac{6,79}{5,79} T_g \right) = 0$$

Par conséquent lorsque $T_v = 1,17 T_g$.

La consommation de combustible est maxima quand la température du vent n'est que 1,17 fois plus élevée que celle des gaz du gueulard.

C_K est minimum lorsque $T_v - 1,17 T_g$ est très grand.

C'est là une conclusion évidemment peu satisfaisante. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce point.

Il résulte des observations précédentes que le rapport entre la température du vent et celle des gaz est de même forme que l'équation d'une droite. On peut l'écrire :

$$T_v - 1,17 T_g = A \quad A = \frac{K - 2470 C_k}{1,39 C_k}$$

Si nous prenons un système de coordonnées rectangulaires, en portant les températures du vent sur l'axe des y et celles des gaz sur l'axe des x , la droite en question fait avec l'angle des x un angle tel que $\operatorname{tg} \alpha = 1,17$ ($\alpha = 49^\circ 30'$), et découpe sur l'axe des y une longueur égale à A .

Dans l'exemple que nous traitons $A = 216$ (436 pour l'exemple d'Osann).

Dans l'égalité précédente on a $A = 0$, c'est-à-dire que l'égalité prend la forme

$$T_v = 1,17 T_g$$

lorsque

$$T_v = 430^\circ T_g = 200^\circ$$

ou (Exemple d'Osann.)

$$T_v = 670^\circ T_g = 200^\circ$$

Pour les températures « normales » du fourneau, la droite passe donc par l'origine des coordonnées.

Ce résultat intéressant nous permet de figurer graphiquement, pour chaque haut fourneau, le rapport entre les températures du vent et des gaz, si l'on admet que la consommation de combustible doit rester

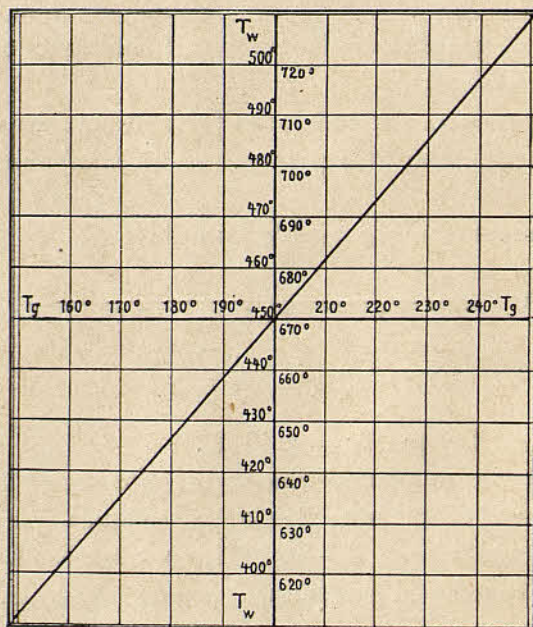


Fig. 10. — Diagramme du rapport des températures du vent et des gaz.

constanté. On n'a, pour cela, qu'à dessiner un système de coordonnées rectangulaires, dont l'origine corresponde aux températures normales du vent et des gaz. En portant les températures du vent sur l'axe des y , celles des gaz sur l'axe des x , une droite inclinée de $49^\circ 30'$ sur l'axe des x indiquera de combien la température du vent devra être élevée ou abaissée, lorsque celle des gaz variera, pour que la consommation de combustible reste la même. La figure 10 représente ce diagramme dans notre exemple.

On voit que si la température des gaz s'élève de 30°C , il faudra élever de 35°C celle du vent, et inversement que si la température des gaz s'abaisse de 30°C , il faudra réduire de 35°C celle du vent.

Le devoir de celui qui conduit le haut fourneau n'est pas seulement d'économiser du combustible, mais d'obtenir une fonte de composition donnée. Cette obligation rendra souvent impossible de régler ainsi la

température du vent d'après celle des gaz, car la composition de la fonte dépend souvent d'une variation de quelques degrés dans la température du vent.

Le résultat que nous venons d'obtenir graphiquement, peut aussi se déduire de l'examen du tableau XXVIII, mais moins exactement, à cause de l'absence des chiffres intermédiaires. Nous n'avons qu'à suivre une certaine valeur de C_k , dans les différentes colonnes, pour voir quelle température du vent correspond à chaque température des gaz.

Le tableau XXVIII montre aussi, et c'est là son plus grand intérêt, comment on doit faire varier ces températures pour obtenir, avec le même lit de fusion, une économie de combustible.

Dans les deux exemples que nous avons examinés, il fallait, par 400 kilogrammes de fonte :

I	II (Osann)
C 65,23 kg.	C 98,1 kg.
Coke à 81 p. 100 C) 80,5 kg.	Coke (à 78 p. 100 C) 126,0 kg.

Si nous voulons abaisser la consommation de coke, de 1 kilogramme dans le premier cas¹, de 6 kilogrammes dans le second, ces consommations se réduiront à :

I	II
C 64,23 kg.	93,6 kg.

Il faut soustraire de ces chiffres les quantités nécessaires pour la réduction, et celles qui passent dans la fonte (toutes deux invariables).

I	II
$C_r + C_f$. . . 46,57 kg.	47,21 kg.
Il reste :	
C_k 47,66 kg.	76,39 kg.

Le déficit dans les quantités de chaleur est de :

I	II
134 800 calories	249 162 calories.
C_k . . . 3,535	3,066

Le tableau XXVIII donne, pour ces valeurs :

T_v	T_g	T_v	T_g
450°	165°	700°	110°
500°	205°	750°	155°
550°	245°	800°	195°
		850°	240°

¹ A titre d'exemple, car la consommation du coke est déjà exceptionnellement réduite.

Si nous voulions réaliser les économies de combustibles indiquées, il faudrait donc se tenir, pour les températures du vent et des gaz, dans ces limites. La fonte que nous devons obtenir dépendant surtout de l'élévation de la température du vent, il faudra s'assurer, d'après les chiffres ainsi calculés, si les économies désirées sont possibles ou non.

Le but de tous ces calculs serait de déterminer la température des gaz qui serait, théoriquement, la meilleure. La question de la consommation de combustible minima serait par suite résolue, puisqu'elle est obtenue, ainsi que nous l'avons vu, lorsque la différence $T_v - 1,17 T_g$ est très grande. Il n'est pas toujours possible d'arriver à une valeur considérable de cette différence au moyen d'une élévation de la température du vent, car certaines sortes de fonte ne le permettent pas. D'ailleurs le vent chaud coûte aussi du combustible car les gaz de gueulard ne sont pas sans valeur.

La détermination par le calcul de la plus petite valeur de la température des gaz du gueulard est impossible.

Maintenant que nous avons calculé la consommation de combustible probable du haut fourneau, et que nous connaissons tous les chiffres nécessaires pour la conduite du fourneau, nous pouvons considérer celui-ci d'une façon générale.

Les calculs et les recherches qui nous restent à faire sont tout à fait indépendants de la question de savoir si le fourneau est en marche ou s'il est à construire.

IV

CALCUL DES QUANTITÉS DE VENT ET CALCUL DES GAZ DU GUEULARD

I. — QUANTITÉ DE VENT ET PERTES DE VENT

Lorsqu'on a déterminé, comme dans les calculs précédents, toutes les quantités de combustible qui sont brûlées et transformées en oxyde de carbone par l'oxygène du vent, pour combler le déficit du bilan thermique du haut fourneau, on connaît la quantité de vent nécessaire.

Étant donné qu'une partie de C exige 5,79 parties d'air pour brûler en CO, on calculera la quantité de vent nécessaire par la formule simple :

$$\text{Quantité de vent, en kg.} = 5,79 \times C_k$$

Dans l'exemple étudié plus haut on a : $5,79 \times 48,66 = 281,74 \text{ kg.} = 218,35 \text{ m}^3$ (à 0°C et 760 mm).

Si l'on n'a pas fait tous les calculs précédents, on peut obtenir d'une autre façon la quantité de vent.

C'est ce que le professeur Osann a montré (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 905 : « Calcul de la composition des gaz du haut fourneau, des quantités de vent à souffler dans le fourneau et des pertes de vent »).

Si un poids de carbone a brûle dans le fourneau, on peut calculer quelles proportions de ce combustible sont transformées en CO et en CO².

Soit a le poids de carbone par 100 kilogrammes de fonte, déduction faite du poids qui passe dans la fonte.

x la partie de ce carbone qui est transformée en CO².

et y celle qui est transformée en CO.

On a :

$$a = x + y \tag{1}$$

et

$$x \cdot 8080 + y \cdot 2470 = w \tag{2}$$

en désignant par w la quantité de chaleur totale obtenue par la combustion du carbone.

Les quantités d'oxygène nécessaires pour ces combustions, et les quantités de CO^2 et de CO formées se calculent de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Pour } \text{CO}^2 \text{ il faut } x \cdot \frac{8}{3} \text{ kg O. Il se produit } x \cdot \frac{11}{3} \text{ kg } \text{CO}^2 \\ \text{— CO — } y \cdot \frac{4}{3} \text{ kg O. — } y \cdot \frac{7}{3} \text{ kg CO} \end{array}$$

Connaissant la valeur du rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ dans les gaz du gueulard¹ ($\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = m$) on peut facilement calculer x , y et w .

$$m = \frac{x \cdot \frac{11}{3}}{y \cdot \frac{7}{3}} = \frac{1,57 x}{y} \quad (3)$$

Comme

$$\begin{aligned} a &= x + y \text{ et } y = a - x \\ m &= \frac{1,57 x}{a - x} \\ x &= \frac{m \cdot a}{1,57 \times m} \end{aligned} \quad (4)$$

Soit e le poids d'oxygène nécessaire pour la combustion :

$$e = x \cdot \frac{8}{3} + y \cdot \frac{4}{3} \quad (5)$$

une partie de cet oxygène provient de la réduction, une partie du vent.

Soit b l'oxygène provenant de la réduction ; l'oxygène provenant du vent est $(e - b)$. L'air contenant 23 p. 100 d'oxygène, on a :

$$\text{Quantité de vent en kg} = (e - b) \frac{100}{23} \quad (6)$$

ou, en mètres cubes :

$$\text{Quantité de vent en mc} : (e - b) \frac{100}{23} \times 0,77 = 3,35 (e - b) \dots \quad (7)$$

La valeur de b s'obtient rapidement, à l'aide du tableau XVII.

Quant au rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ (exprimé en poids p. 100), on l'obtient, pour un fourneau en marche, au moyen d'une analyse des gaz du gueulard, et pour un fourneau à calculer par hypothèse.

Le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ donne une mesure du rendement du haut fourneau. Plus il est petit, plus grande est la quantité de C consommée pour la marche du fourneau. Le diagramme de Boudouard-Baur-Glässner (fig. 9) et les observations faites sur les réactions réductrices montrent, (comme

¹ CO^2 déduction faite de l'acide carbonique provenant des matériaux chargés.

le feront les études indiquées à la fin de ce livre sur le diagramme du haut fourneau) que le rapport $\frac{CO^2}{CO}$ (en volume) ne devrait pas descendre au-dessous de $\frac{50}{50}$. Dans ce cas le fourneau travaille presque avec la quantité de carbone théorique.

Avec la marche forcée de nos hauts fourneaux modernes, qui emploient le CO en excès contenu dans les gaz du gueulard, ce rapport $\frac{CO^2}{CO}$ est assez petit.

Le tableau ci-dessous (tableau XXIX) donne les valeurs, en poids, de $m = \frac{CO^2}{CO}$, lorsque les volumes de CO² et CO sont calculés de façon que CO² + CO = 100.

TABLEAU XXIX. — Valeurs de $m = \frac{CO^2}{CO}$ en poids.

$\frac{CO^2}{CO}$	$\frac{50}{50}$	$\frac{45}{55}$	$\frac{40}{60}$	$\frac{35}{65}$	$\frac{30}{70}$	$\frac{25}{75}$	$\frac{20}{80}$	$\frac{15}{85}$	$\frac{10}{90}$
m	1,57	1,28	1,05	0,84	0,67	0,52	0,39	0,28	0,17

Si nous appliquons ce calcul à notre exemple, en admettant pour $\frac{CO^2}{CO}$ la valeur $m = 0,45$, qu'on peut considérer comme normale pour un haut fourneau moderne au coke, on obtient les résultats suivants :

$b = 37,76$ (d'après le tableau XXIII)
 $a = 61,28$
 $m = 0,45$

$$x = \frac{61,28 \times 0,45}{1,57 + 0,45} = 13,65$$

$$y = \dots \dots \dots \frac{47,63}{\dots}$$

$$x + y = a = 61,28$$

$$e = \frac{8}{3} \cdot 1365 + \frac{4}{3} \cdot 4793 = 99,91$$

Quantité de vent en kg = $(e - b) \cdot \frac{100}{23} = 270$ kg. c'est-à-dire 11,7 kg. de moins que ne l'indique le calcul exact établi en partant du poids C_K de carbone à brûler par le vent.

La cause de cette différence réside dans le choix de la valeur de m .

La véritable valeur de $\frac{CO^2}{CO}$ n'est pas exactement 0,45, mais doit être un peu plus grande.

La quantité de vent obtenue par ce procédé est celle qui est réelle-

ment utile dans le fourneau. Si l'on se servait de ce chiffre pour calculer la pression du vent ou la puissance des machines soufflantes, on arriverait à des chiffres trop faibles, car les pertes de vent sont assez importantes.

D'après l'ouvrage d'Osann, déjà cité plusieurs fois, la quantité de vent que nécessitent les hauts fourneaux modernes est de 350 à 960 mètres cubes par 100 kilogrammes de fonte. Il serait plus rationnel de rapporter ce chiffre à celui du combustible, car la quantité de combustible consommé pendant un temps donné est plus facile à évaluer que celle de la fonte produite en vingt-quatre heures.

La détermination des pertes de vent se fait (d'après Osann) en comparant le volume d'air aspiré en vingt-quatre heures par les machines soufflantes et la quantité de carbone utilisé pendant le même laps de temps.

Si la quantité de vent nécessaire pour brûler dans le fourneau une partie de carbone est Q (on a vu plus haut comment obtenir ce chiffre), et que le volume d'air aspiré par les machines soufflantes est Q_1 , l'effet utile du soufflage est $\frac{Q}{Q_1}$ (environ 0,75).

Cet effet utile diminue rapidement lorsque la pression du vent s'élève. Plus celle-ci est haute, plus les pertes par manque d'étanchéité des conduites se font sentir (notamment dans les conduites de vent chaud), plus aussi l'inconvénient de l'espace nuisible dans le cylindre de la machine soufflante devient grave. Si l'on ne tient pas un compte suffisant de ces phénomènes en choisissant des machines assez puissantes, la marche du fourneau peut devenir tout à fait défavorable.

II. — CALCUL DE LA PRESSION DU VENT ET DE LA PUISSANCE INDIQUÉE DE LA MACHINE SOUFFLANTE

Nous reproduirons sur ce point les calculs intéressants de M. le professeur Osann (*Stahl und Eisen*, 1906, p. 447); et nous plaçons ici ces recherches, bien que plusieurs des facteurs qui y figurent ne puissent être traités que plus loin. Nous nous bornerons donc à exposer comment se font les calculs.

Soit Q la quantité d'air soufflée par seconde dans le fourneau, en mètres cubes (à 0°C et 760 mm.). Elle est d'environ $4a$, en désignant par a la quantité de C brûlé par seconde.

V le volume utile du fourneau, en mètres cubes.

S la durée du passage dans le fourneau, en heures.

H la hauteur du fourneau au-dessus des tuyères, en mètres.

C une quantité à ajouter pour les températures du vent supérieures à 700°C égale à :

8 p. 100 pour 800°
 16 p. 100 — 900°
 24 p. 100 pour 1 000°

La pression du vent nécessaire (h) en kilogrammes par centimètre carré est :

$$h = \frac{Q^2}{V^2} \cdot 1000 \cdot \frac{S}{16} \cdot \frac{H}{16} + C$$

ou environ

$$h = \frac{Q^2}{V^2} \cdot 1000$$

La puissance indiquée de la machine soufflante est :

$$N_i = \frac{100}{75} \cdot \frac{100}{65} \cdot Q \frac{36\,000}{75} \cdot A = 744 Q \cdot A$$

$\frac{100}{75}$ est le rendement volumétrique.

$\frac{100}{65}$ le rendement mécanique.

Les valeurs de A sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU XXX. — Valeurs de A.

PRESSION		$A = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1$
Atmosphère.	gr. par cm ² .	
0,2	207	0,054
0,4	414	0,102
0,6	620	0,146
0,8	816	0,186
1,0	1 033	0,223
1,2	1 240	0,257

k = Quotient des deux chaleurs spécifiques.
 p = Pression initiale p_2 = pression finale en kilogrammes par m².

Le tableau XXXI montre la concordance des chiffres de la pression du vent calculés et employés en pratique.

TABLEAU XXXI. — *Calcul de la pression du vent.*
(D'après le professeur Osann, *St. u. E.*, 1906, p. 447).

	PRODUCTION journalière.	Q QUANTITÉ de vent par seconde.	V VOLUME du fourneau.	S TEMPS de passage.	H HAUTEUR du fourneau.	t TEMPÉ- RATURE du vent.	PRESSION CALCULÉE <i>h</i>		<i>h</i> ₁ PRESSION réellement employée.	
							1	2		
							d'après la formule $\frac{Q^2}{V^2} \cdot 1000$	d'après la formule $\frac{Q^2}{V^2} \cdot 1000 \cdot \frac{S}{16} \cdot \frac{H}{16} + C$		
	t.	m ²	m ³	h.	m.	°C	kg./cm ²	kg./cm ²		
1	Hauts fourneaux alimentés avec des minettes.	223	10,2	590	22	22	700	0,299	0,568	0,582
2		117	5,0	313	20	15,3	700	0,235	0,298	0,250
3		150	6,33	350	24	14,6	?	0,328	0,459	?
4		170	6,97	500	26	22,5	800	0,494	0,475	0,507
5	Hauts fourneaux de la région rhé- nane	180	6,82	319	16	14,0	700	0,456	0,396	0,450
6		52	2,38	166	24	13,3	600	0,240	0,256	0,237
7		150	5,90	402	22	19,3	1 050	0,245	0,456	0,500
8	Haut fourneau de l'Allemagne centrale.	250	9,30	425	16	20,0	700	0,477	0,596	0,580
9		98	3,80	277	24	14,2	550	0,187	0,245	0,262
10	Hauts fourneaux de Haute-Silésie.	40	2,60	223	26	13,4	300	0,135	0,180	0,230
11		140	5,37	333	20	17,9	700	0,230	0,324	0,350
12		90	3,93	268	24	16,0	800	0,244	0,347	0,320
13		90	3,83	299	24	15,1	500	0,165	0,233	0,298
14		Haut fourneau américain	550	20	515	10	21,2	550	1,510	1,238
15	Haut fourneau de Siegen	120	4,12	347	24	18	750	0,141	0,248	0,280

III. — CALCUL DES GAZ DU GUEULARD

La détermination de la quantité et de la composition des gaz du gueulard est immédiate, une fois la quantité d'air connue.

On sait que 48,66 kg. C brûlent, avec 281,74 kg. d'air. Les gaz du gueulard contiennent l'oxyde de carbone provenant de cette combustion et l'azote de l'air.

La quantité de CO est : $48,66 \times 2,33 = 113,38$ kg. (tabl. I de l'annexe).

La quantité d'Az : $48,66 \times 4,46 = 217,02$ kg.

Il ne reste plus, pour avoir la composition des gaz du gueulard, qu'à réunir les divers chiffres obtenus précédemment :

TABEAU XXXII. — Calcul des gaz du gueulard.

PROVENANCE DES GAZ produits par 100 kilogrammes de fonte.	CO	CO ²	H	CH ⁴	Az	H ² O	TOTAL
	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
1. De la charge (tabl. XXIII)	»	4,28	»	»	»	1,54	
2. Du combustible (80,5 kg. coke)	»	»	0,8	»	1,6	2,40	
3. De la réduction (ta- bleau XXVI)	5,85	64,51	»	»	»	»	
4. De la combustion par le vent	95,96	»	»	»	217,02	2,41	
Gaz du gueu- (kg. lard . . . (m ³	101,81 81,45	68,79 34,39	0,8 8,88	» »	218,62 174,89	6,05 9,98	396,07 kg. 309,59 m ³
Poids p. 100 { gaz secs. { gaz humides.	26,1 25,8	17,6 17,3	0,2 0,2	» »	56,1 55,2	» 1,5	100,00 ‰ 100,00 ‰
Volume p. 100 { gaz secs. { gaz humides.	27,2 26,3	11,5 11,2	2,9 2,8	» »	58,4 56,5	» 3,2	100,00 ‰ 100,00 ‰

REMARQUES :

Sur 2. — La quantité totale de combustible étant connue, il est possible d'indiquer sa teneur en gaz et en eau.

Sur 3. La quantité de CO nécessaire pour la réduction est fournie par le CO formé par la combustion du coke. C'est pourquoi il faut déduire de ce dernier le CO employé pour la réduction (dans notre exemple 17,42 kg., comme le montre le tableau XXVI) : $113,38 - 17,42 = 95,96$. Les 17,42 kg. d'oxyde de carbone donnent en brûlant de l'acide carbonique, comme l'indique le tableau XVI.

Sur 4. Puisque la quantité d'air exacte est connue, on peut aussi déterminer la quantité d'eau qu'il contient au juste, à l'aide du tableau XV des annexes.

La composition des gaz ainsi établie dans le tableau XXXII donne pour le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ la valeur $m = 0,633$, plus grande que celle que nous avons admise. En volume, en posant $\text{CO}^2 + \text{CO} = 100$, on a $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = \text{environ } \frac{30}{70}$; la marche du fourneau est donc excellente. En calculant de nouveau la quantité de vent, en partant de $m = 0,633$, on a (voir page 58) :

$$\begin{aligned} \text{C brûlé en CO}^2 &= x = 17,56 \\ \text{C} \quad - \quad \text{CO} &= y = 43,72 \\ \text{C} &= \frac{8}{3} \cdot 17,56 + \frac{4}{3} \cdot 43,72 = 105,12 \end{aligned}$$

Quantité de vent en kilogrammes : **292** kilogrammes.

Ce chiffre un peu plus fort que celui auquel nous étions arrivés montre d'une façon évidente que le choix absolument exact de m n'est pas possible en général; la formule d'Osann est donc très indiquée pour le calcul rapide de la quantité de vent.

Le calcul rapide du **pouvoir calorifique** des gaz du gueulard donne pour 1 kilogramme de gaz sec (déduction faite de la vapeur d'eau) :

$$0,261 \times 2400 + 0,002 \times 29000 = 684 \text{ calories pour 1 kg} = 875 \text{ pour 1 mc.}$$

et pour le gaz humide :

$$0,258 \times 2400 + 0,002 \times 29000 = 677 \text{ calories} \quad - \quad = 865 \quad -$$

Un mètre cube de gaz pèse 1,279 kg.

M. F. W. Lürmann a donné (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 1154) un tableau très intéressant relatif aux gaz de différents fourneaux. Il est reproduit ci-dessous (tabl. XXXIII).

Pour déterminer rapidement le poids des gaz d'après leur analyse, on se servira de préférence des formules de M. le Professeur v. Ehrenwerth (*Stahl und Eisen*, 1907, p. 1292). Ce calcul est basé sur le fait que le poids de chaque gaz par 100 kilogrammes de fonte et son volume p. 100 dans l'analyse des gaz sont dans le même rapport que les mêmes chiffres pour le carbone.

Désignons par C_g la quantité de carbone, par 100 kilogrammes de fonte, qui passe dans les gaz; on a :

$$C_g = \Sigma C - (C_1 + C_2)$$

TABLEAU XXXIII. — Gaz de différents hauts fourneaux
(d'après Lürmann).

	MÉTALLURGIE DU FER DE LEDEBUR 1893, p. 100.		USINE EN WESTPHALIE		USINE EN HAUTE SILÉSIE	USINE EN HAUTE SILÉSIE	USINE DANS LA RÉGION DES MINETTES	MOYENNE
	Secs.	Avec 10 p.100 H ² O	Secs.	Avec 10 p.100 H ² O				
	I.	II	III	IV				
Oxyde de carbone CO, volume p. 100	24,0	21,6	29,0	26,1	29,7	23,0	27,5	25,84
Hydrogène H, volume p. 100	2,0	1,8	4,0	3,6	6,3	»	3,0	2,96
Méthane CH ⁴ , volume p. 100	2,0	1,8	»	»	»	»	»	0,54
Acide carbonique CO ² , volume p. 100	12,0	10,8	10,0	9,0	7,8	6,0	10,0	9,37
Azote Az, volume p. 100	60,0	54,0	57,0	51,3	56,2	59,0	54,5	56,00
Eau H ² O, volume p. 100	»	10,0	»	10,0	»	12,0	5,0	5,29
1. 1 mètre cube de gaz pèse. kg.	1,3055	1,2555	1,2786	1,2312	1,2811	1,2429	1,2678	1,2661
2. Oxygène nécessaire pour la combustion de 1 mètre cube de gaz kg.	0,2433	0,2188	0,2359	0,2122	0,2127	0,1644	0,2194	0,2152
3. Air nécessaire pour 1 mètre cube de gaz kg.	1,0578	0,9512	1,0257	0,9234	0,9247	0,7144	0,9539	0,9359
4. Air nécessaire pour 1 mètre cube de gaz m ³ .	0,817	0,735	0,794	0,714	0,716	0,552	0,737	0,724
5. Chaleur théoriquement produite, par la combustion de 1 mètre cube de gaz. cal.	944,4	849,8	978,1	879,6	893,0	691,9	906,5	877,6
6. Poids des produits de la combustion kg.	2,3633	2,2067	2,3042	2,1546	2,2058	1,9573	2,2216	2,2019
7. Produits de la combustion multipliés par leur cha- leur spécifique	0,5678	0,5298	0,5439	0,5330	0,5302	0,4852	0,5373	0,5332
8. Chaleur de combustion théo- rique	1660	1604	1880	1650	1684	1425	1687	1656
9. Chaleur spécifique des produits de la combus- tion	0,240	0,240	0,238	0,247	0,240	0,248	0,242	0,242
10. Chaleur enlevée par les gaz à 100°. cal.	56,78	52,98	54,89	53,30	53,02	48,52	53,72	53,32
11. Volume des produits de la combustion à température ordinaire m ³ .	1,688	1,619	1,628	1,556	1,510	1,438	1,566	1,576
12. Volume des produits de la combustion à la tempé- rature de combustion. m ³ .	13,08	9,53	12,86	9,49	10,84	8,96	11,40	10,88
13. C contenu dans 1 mètre cube de gaz kg.	0,2038	0,1834	0,2092	0,1882	0,2011	0,1555	0,2011	0,1918
14. Gaz produits pour 1 kilo- gramme de C dans le coke m ³ .	4,907	5,451	4,781	5,312	4,973	6,430	4,972	5,261
15. Gaz produits pour 1 kilo- gramme de coke à 85 p. 100 C. m ³ .	4,171	4,634	4,064	4,516	4,227	5,466	4,226	4,472

ΣC = carbone total de tous les matériaux chargés dans le fourneau.

C_1 = carbone contenu dans la fonte.

C_2 = carbone contenu dans les poussières du gueulard.

Supposons que l'on veuille déterminer les volumes :

CO ²	a p. 100
CO	b —
CH ⁴	c —
C ² H ²	d —
H ²	e —
Az.	f —
	100 p. 100

Dans 100 mètres cubes de gaz il y a :

$$\frac{3}{11} \cdot 1,978 a + \frac{3}{7} \cdot 1,252 b + \frac{3}{4} \cdot 0,559 c + \frac{6}{7} \cdot 1,16 d \text{ kg de carbone}$$

ou, en chiffres ronds :

$$0,538 (a + b) + 0,42 c + 1,00 d = c_g$$

Les poids des différents gaz, en mètres cubes par 100 kilogrammes de fonte sont donc :

$$\begin{aligned} \text{CO}^2 \quad C_g : c_g = x_{\text{co}^2} : a \quad x_{\text{co}^2} &= \frac{C_g}{c_g} \cdot a \\ \text{CO} \quad C_g : c_g = x_{\text{co}} : b \quad x_{\text{co}} &= \frac{C_g}{c_g} \cdot b \text{ etc.} \end{aligned}$$

D'une façon générale :

Mètres cubes du gaz par 100 kilogrammes fonte = $\frac{C_g}{c_g} \times$ proportion
p. 100 du gaz dans l'analyse des gaz du gueulard.

De même on a le poids total :

$$\Sigma G = \frac{C_g}{c_g} \cdot 100$$

Le pouvoir calorifique des gaz du gueulard, par mètre cube à 0°C et 760 millimètres est égal à :

$$30,63 b + 86,00 c + 142 d + 26,2 e \text{ calories}$$

IV. — CALCUL DE L'ÉNERGIE UTILISABLE DANS LES GAZ DU GUEULARD¹

Il reste encore à déterminer l'énergie disponible dans les gaz du gueulard, par tonne de fonte.

D'après le tableau XXXII, le volume des gaz, pour 1 tonne de fonte, est d'environ 3 000 mètres cubes.

¹ Cf. : Fr.-W. Lürmann. *Stahl und Eisen*, 1899, p. 843.

Il faut en déduire environ 8 p. 100 (soit 240 mètres cubes) pour les pertes dans les conduites, pertes qui sont inévitables, puis la quantité de gaz employée pour le chauffage du vent.

Pour réchauffer le vent il faut (par tonne de fonte), en admettant qu'on ait à chauffer 2800 kilogrammes d'air à 450°C :

$$2800 \times 0,24 \times 450 \text{ calories.}$$

Si le rendement des appareils de chauffage du vent est de 75 p. 100 il faut :

$$\frac{100}{75} \times 2800 \times 0,24 \times 450 = 403\,200 \text{ calories.}$$

Les gaz donnant 870 calories par mètre carré, la quantité de gaz à brûler pour le chauffage du vent est donc de 460 mètres cubes (15,4 p. 100). (Ce chiffre est un peu faible; la quantité d'air et sa température sont en effet peu élevées. Il vaudra mieux admettre au moins le double, soit de 30 p. 100.)

Il reste donc pour le chauffage des chaudières ou la conduite des moteurs à gaz :

$$3\,000 - (460 + 240) = 2\,300 \text{ mc.}$$

1° Si l'on veut employer toute la masse de gaz pour chauffer des chaudières, l'énergie utilisable est de $2\,300 \times 870 = 2\,001\,000$ calories.

La production de 1 kilogramme de vapeur, à la pression de 8,5 atm. exige 659 calories. Si la batterie de chaudières a un rendement de 75 p. 100, on peut donc produire, par tonne de fonte :

$$\frac{75 \times 2\,001\,000}{100 \times 659} = 2\,276 \text{ kg de vapeur.}$$

On voit donc qu'il faut 1,01 mc. de gaz (à 870 calories) pour 1 mètre cube de vapeur. La conduite du haut fourneau exige 1 440 kilogrammes par tonne de fonte (ce qui correspond, d'après Lürmann, à une consommation de 60 kilogrammes par tonne de fonte et par 24 heures). Il reste donc 836 kilogrammes de vapeur non utilisée.

Comme il faut 10 kilogrammes de vapeur pour produire 1 cheval-heure, on peut donc disposer, pour d'autres usages, de 83,6 chevaux-heures.

En résumé, si les gaz en excès sont uniquement employés à produire de la vapeur, on aura la répartition ci-dessous (I) :

	gaz du gueulard	quantité de vapeur	chev-heures		
1. Pertes dans les conduites. . .	240 m ³	8 p. 100			
2. Chauffage du vent	462 —	15,4 —	I	II	III
3. Conduite du haut fourneau. . .	1 454 m ³	48,5 p. 100	1 440 kg.	144,0	144,0
4. Disponibles.	844 —	28,1 —	836 —	83,6	241,0
	3 000 m ³	100 p. 100	2 276 kg.	227,6	385,0
				637,0	

2° Si les 843 mètres-cubes de gaz disponibles sont employés à faire marcher un moteur à gaz, on obtiendra (en admettant qu'il faille 3,5 mc. de gaz par cheval-heure) 241 chevaux-heures au lieu de 83,6, c'est-à-dire le triple (II).

3° Si tous les gaz, sauf ceux qui se perdent ou servent à chauffer le vent, c'est-à-dire 2300 mètres cubes, sont employés dans des moteurs à gaz, on obtient $2300 : 3,5 = 657$ chevaux-heures. En retranchant les 144 chevaux-heures nécessaires pour la conduite du fourneau, il reste 513 chevaux-heures disponibles par tonne de fonte (III).

V

LE BILAN THERMIQUE DU HAUT FOURNEAU

Le bilan thermique permet d'évaluer exactement les quantités de chaleur qui entrent en jeu dans la marche du haut fourneau. Lorsqu'il s'agit d'un fourneau en service, pour lequel on peut mesurer tous les éléments de ce bilan, on peut établir ce dernier sans autres calculs. Au contraire, s'il s'agit d'un fourneau à construire, ou de l'emploi d'un lit de fusion de composition nouvelle, il faut faire les calculs tels qu'ils sont exposés dans les précédents chapitres. Comme on l'a vu, on peut obtenir ainsi par le calcul les résultats que donne l'expérience.

Si l'on dresse le bilan thermique dans le cas de l'exemple donné plus haut, on obtient le tableau ci-dessous (tabl. XXXIV).

TABLEAU XXXIV. — Bilan thermique.

CHALEUR REÇUE	CALORIES par 100 kg. de fonte.	P. 100	CHALEUR DÉPENSÉE	CALORIES par 100 kg. de fonte.	P. 100
1. De la combustion :			1. Pour la réduction . . .	174 333	62,2
De C en CO ² (tabl. XXVI)			2. Chaleur emportée par les produits fondus :		
10,12 × 8 080	81 770	29,2	a) Fonte	26 500	9,5
De CO en CO ² (tabl. XXVI)			b) Laitier	23 680	8,5
17,42 × 2 400	41 810	14,9	3. Chaleur employée :		
De C en CO (reste du C)			a) A mettre en liberté le CO ²	1 268	0,5
51,16 × 2 470	126 365	45,1	b) A vaporiser le HO ²	1 029	0,3
2. De l'air chaud, à 450°,			c) Chaleur enlevée par les gaz du gueulard (200°)	"	"
281,74 × 0,24 × 450°	30 420	10,8			
Total	280 365	100			
			kg. × chal. spécif.		
			CO 101,81.0,24=24,43		
			CO ² 68,79.0,22=15,13		
			H 0,80.3,41= 2,73		
			CH ⁴ 0,33		
			Az 218,62.0,24=52,47		
			H ² O 6,05.0,48= 2,90	97,66.200°	19 532 6,9
			4. Pertes par l'eau de circulation et par rayonnement. (Par différence =)	34 023	12,1
			Total	280 365	100

REMARQUES :

1. **Chaleur reçue :** Parmi les chaleurs reçues figure en première ligne celle qui provient de la combustion du carbone. Nous avons vu (tabl. XXVI) que 10,12 kg. C brûlent à l'état d'acide carbonique et que 17,42 kg. d'oxyde de carbone sont transformés en CO^2 par l'oxygène réduit. Cet oxyde de carbone provient de la combustion du coke par le vent et correspond à une quantité de C, que nous avons désignée par C_k et qui est égale à 48,66 kg. Sur cette quantité totale de C, 17,42 kg. passent finalement à l'état de CO^2 , le reste à l'état de CO. A 17,42 kg. de CO correspondent $17,42 \times 0,428 = 7,455$ kg. de C. Le calcul des quantités de chaleur donnera donc les mêmes résultats, qu'on le fasse par l'une ou l'autre des deux manières ci-dessous :

$$\begin{array}{r}
 \text{C en } \text{CO}^2 (10,12 + 7,455) \times 8080 = 144\ 956 \\
 \text{C en } \text{CO}^2 (61,28 - 17,575) \times 2476 = 107\ 951 \\
 \hline
 249\ 917 \text{ calories} \\
 \\
 \text{C en } \text{CO}^2 10,12 \times 8080 = 81\ 770 \\
 \text{CO en } \text{CO}^2 17,42 \times 2\ 400 = 41\ 810 \\
 \text{C en CO } (61,28 - 10,12) \times 2\ 470 = 126\ 365 \\
 \hline
 249\ 945 \text{ calories.}
 \end{array}$$

Le calcul de la chaleur apportée par le vent chaud se fait de la façon connue.

On pourrait encore tenir compte de la chaleur contenue dans les matières de la charge, mais elle est si faible qu'on peut la laisser de côté. Elle n'aurait une valeur suffisante pour être prise en considération que dans le cas de minerais grillés chargés aussitôt après leur sortie des fours de grillage.

2. **Chaleur dépensée.** Les chiffres portés au bilan sous les n^{os} 1 et 2 sont ceux qui ont déjà figuré au bilan provisoire (tabl. XXVII) et dont on a vu plus haut le calcul (page 45). Il en est de même pour les lignes *a* et *b* de la chaleur emportée par les produits fondus. Par contre le chiffre définitif de la perte par les gaz du gueulard est nouveau; il est calculé d'après la quantité et la composition de ces gaz. Les pertes par l'eau de refroidissement et par rayonnement sont obtenues par différence. Il est à remarquer, à ce propos, que pour un fourneau en marche, on peut mesurer la perte par l'eau de circulation; il ne reste plus alors comme solde que la perte par rayonnement.

Le bilan indique le pourcentage de ces différents éléments dans la répartition des quantités de chaleur; on constate que la chaleur dépensée pour la réduction forme la partie principale des chaleurs dépensées.

Dans l'exemple ci-dessus la chaleur dépensée pour la décomposition des carbonates et la vaporisation de l'eau contenue dans la charge est relativement faible. Ces deux articles peuvent atteindre parfois 16 p. 100 de la dépense totale.

Le tableau XXXV montre entre quelles limites varient les éléments qui composent le bilan :

TABLEAU XXXV. — Résultats de la marche de quelques hauts fourneaux.

DÉPENSES DE CHALEUR pour 1 kilogramme de fonte.	1		2		3		4		5	
	HAUT FOURNEAU au charbon de bois (alimenté avec du fer spathique de Styrie) Ledebur II, 258.		HAUT FOURNEAU au coke à Ormesby (en fonte de moulage) Ledebur I, 259.		HAUT FOURNEAU au coke à Hörde Dürre II, 64.		HAUT FOURNEAU au coke (alimenté avec des minettes) Osann St. u. E. 1901, p. 907.		HAUT FOURNEAU au coke (fer spathique de Styrie).	
	cal.	p. 100	cal.	p. 100	cal.	p. 100	cal.	p. 100	cal.	p. 100
I. Pour la réduction.	1 702	62,6	1 864	41,8	2 014	42,0	1 914	44,6	1 710	58,9
II. a) Fonte	265	9,7	280	6,4	300	6,0	280	6,6	265	9,0
b) Laitier.	260	9,7	740	16,6	310	6,0	550	12,8	256	8,8
III. a) Mise en liberté de Co ²	170	6,0	274	6,4			285	6,6	165	5,6
b) Vaporisation de l'eau	160	3,6	96	2,0	488	10,0	402	9,4	34	1,1
c) Gaz du gueu- lard	188	7,0	647	14,5	487	10,0	350	8,1	207	7,0
IV. Eau de refroidis- sement et rayon- nement	40	1,4	546	12,3	1 253	26,0	508	11,9	283	9,6
Chaleur dépensée au total	2 725	100,0	4 447	100,0	4 852	100,0	4 289	100,0	2 920	100,0
Quantité de C employ- ée.	0,59 kg.		0,98 kg.		1,176 kg.		0,94 kg.		0,70 kg.	
Rendement sans les gaz du gueulard. . .	56 p. 100		49 p. 100		38 p. 100		49 p. 100		46 p. 100	
Rendement, avec les gaz du gueulard. . .	93 p. 100		64 p. 100		»		79 p. 100		82 p. 100	
$\frac{A}{B}$	0,817		0,648		0,540		0,640		0,764	

Le bilan thermique permet de juger de la marche d'un fourneau. Un premier point à considérer est le rapport des deux lignes 1 et 2 (A) au total des quantités de chaleur dépensées (B).

1. La réduction du minerai exige 174 333 calories (Voir le bilan tableau XXXIV)
2. La façon des produits. 50 180 —

A = 224 523 calories.

Ce nombre A exprime le minimum de la chaleur théoriquement nécessaire pour la production du fer. Plus le rapport $\frac{A}{B}$ est grand, plus la marche du fourneau est favorable. Sa valeur maxima, qui ne peut naturellement pas être atteinte, serait 1.

Dans notre exemple :

$$\frac{A}{B} = \frac{224\,523}{280\,365} = 0,8.$$

Grâce au bilan thermique on peut très facilement évaluer le rendement du haut fourneau.

Au total, pour produire 100 kilogrammes de fonte, il faut 61,28 kg. de carbone, qui contiennent $61,28 \times 8080 = 495\,100$ calories.

Le rendement du haut fourneau est donc, d'après les réactions chimiques, qui exigent $280\,365 - 34\,023$ (perte par rayonnement) = 246 342 calories :

$$\frac{246\,342}{495\,100} = 0,497 = 49,7 \text{ p. } 100.$$

Si l'on tient compte du pouvoir calorifique des gaz (déduction faite des gaz employés pour le chauffage du vent et des gaz perdus), ce rendement est plus élevé.

D'après les calculs exposés page 67, il faut, par 100 kilogrammes de fonte, 46,2 mc. de gaz pour le chauffage du vent, et les pertes sont de 24 mètres cubes. L'excès de gaz disponible, par 100 kilogrammes de fonte, est donc $300 - 70,2 = 229,8 \text{ m}^3$, dont le pouvoir calorifique est de 870 calories. L'énergie utilisable est donc de 199 926 calories. Le rendement du haut fourneau est donc de :

$$\frac{246\,342 + 199\,926}{495\,100} = 0,9 = 90 \text{ p. } 100.$$

Ce rendement élevé s'explique en partie par la bonne utilisation de la chaleur, particulièrement bien réalisée dans notre exemple, en partie par la faible quantité de gaz consacrée au chauffage du vent.

Le rendement d'une installation complète de hauts fourneaux, déduction faite des gaz nécessaires pour les machines soufflantes, les monte-charges, la circulation d'eau, etc., s'élève, en admettant que l'excès de gaz, par 100 kilogrammes de fonte, soit de $84,4 \text{ m}^3$ contenant 73 428 calories, à :

$$\frac{246\,342 + 73\,428}{495\,100} = 0,645 = 64,5 \text{ p. } 100.$$

VI

CALCUL DU PROFIL DU HAUT FOURNEAU

L'établissement du profil le plus favorable pour un haut fourneau dépend essentiellement du travail qu'il aura à accomplir et de sa capacité. Les particularités dans la détermination du profil disparaissent de plus en plus, par suite de la tendance actuelle à rechercher une production aussi forte que possible et les profils autrefois très différents les uns des autres se rapprochent de plus en plus d'un même profil normal. Malgré tout, il est important de savoir évaluer les causes principales qui influent sur la marche du fourneau, car l'expérience prouve souvent qu'on ne peut employer un profil quelconque, et qu'il n'est pas possible d'obtenir une marche rationnelle du fourneau, dans les conditions qu'exige la composition du lit de fusion, si le profil ne s'y prête pas.

La grandeur du haut fourneau dépend en première ligne de la production qu'il doit fournir. Celle-ci est exprimée par le nombre de tonnes de fonte produites en vingt-quatre heures. Ce nombre est très variable, et varie de 15-60 tonnes avec les petits hauts fourneaux au charbon de bois à 100-500 tonnes avec les hauts fourneaux au coke, sans parler des productions exceptionnellement fortes qui sont parfois atteintes.

Le volume intérieur du haut fourneau est étroitement lié au chiffre de la production et varie également entre des limites très éloignées : 25-180 mètres cubes pour les hauts fourneaux au charbon de bois, 200-700 mètres cubes pour les hauts fourneaux au coke.

Pour pouvoir déterminer le volume intérieur du haut fourneau, il faut connaître :

1. Le volume occupé par l'unité de poids des matières brutes. Ce chiffre important n'est d'ailleurs pas la somme des volumes des divers éléments : minerais, addition et combustible, mais le volume du mélange après l'introduction de toutes les matières dans le haut fourneau.

La façon dont le minerai, la castine et le combustible se comportent pour remplir un mètre cube dépend absolument des conditions locales, d'abord de la grosseur des morceaux qui composent la charge, mais aussi des réductions et oxydations qui se produisent dans les parties inférieures du haut fourneau, et de la fusion des produits dans le creuset.

M. Osann, qui seul s'est efforcé de calculer le profil du haut fourneau en partant de considérations théoriques et pratiques¹, exprime cette diminution de volume des matériaux au moyen d'un « coefficient de tassement de la charge » (*Schwindungskoeffizient*) qui varie d'après lui de 15 à 35 p. 100 (31-35 p. 100 pour les fourneaux de la région des minettes, 15 p. 100 en Haute Silésie, 33 p. 100 à Ilsède, 17-20 p. 100 pour deux fourneaux de la région rhénane).

Le volume occupé par les matières brutes dans le haut fourneau est égal à la somme des volumes de chacune de ces matières multipliée par le coefficient de tassement. M. Osann rapproche ce coefficient du rendement en fonte du lit de fusion : le coefficient diminue lorsque ce rendement augmente. Il a dressé le tableau suivant :

Hauts fourneaux alimentés avec des minettes = 30-35 p. 100.

Pour un lit de fusion de 35 p. 100 = 33 p. 100.

Pour un lit de fusion de 40 p. 100 et plus = 15-20 p. 100.

En tous les cas, il est nécessaire de s'assurer par une expérience pratique de la diminution de volume produite par le mélange des matériaux de la charge. Il est vraisemblable qu'en employant du coke en très gros morceaux et du minerai en morceaux de la dimension d'une noix, ces derniers se logeront complètement dans les intervalles entre les morceaux de coke, de sorte qu'on n'aura à tenir compte que du volume du coke (voir page 81).

La détermination exacte du coefficient de tassement est donc la première difficulté que l'on rencontre pour le calcul du volume du fourneau.

2. Il faut ensuite connaître exactement la durée de la descente des matières dans le fourneau. Elle dépend de la réductibilité des minerais : les minerais les plus réductibles arrivent plus vite au bas du fourneau que ceux qui le sont moins. Elle dépend aussi des combustibles : meilleurs sont ces derniers, plus rapide est la descente. La nature de la

¹ Osann : Calcul du profil du haut fourneau et ses chiffres fondamentaux. *Stahl und Eisen*, 1906, p. 441.

fonte produite joue un rôle non moins important : plus les minerais doivent subir de réactions avant la fusion, plus la durée de la descente devra être longue. Elle est plus grande pour la fabrication de la fonte grise que pour celle de la fonte blanche.

Enfin, cette durée, d'après Osann, est fonction de la pression du vent, et elle peut être d'autant plus faible que la pression est plus forte.

Il est impossible de déterminer théoriquement la durée exacte de la descente dans le fourneau. Seule l'expérience peut l'indiquer. On peut la mesurer, soit en chargeant des briques de magnésie et en observant au bout de combien de temps elles arrivent devant les tuyères, soit en provoquant une modification du laitier ; aucun de ces moyens ne s'impose. En général on calcule cette durée sur des fourneaux dont la marche est satisfaisante. Si on désigne par V le volume utile du fourneau (des tuyères au gueulard) en mètres cubes, par P la production par vingt-quatre heures, par v le volume des charges (en tenant compte du coefficient de tassement) on a :

Durée de la descente :

$$x = \frac{24}{P} \times \frac{V}{v}.$$

Cette durée, pour une marche normale du fourneau, ne doit pas être modifiée sous peine de troubler l'allure du fourneau.

Si l'on veut se faire une idée approximative de cette durée de la descente, on peut noter les chiffres suivants :

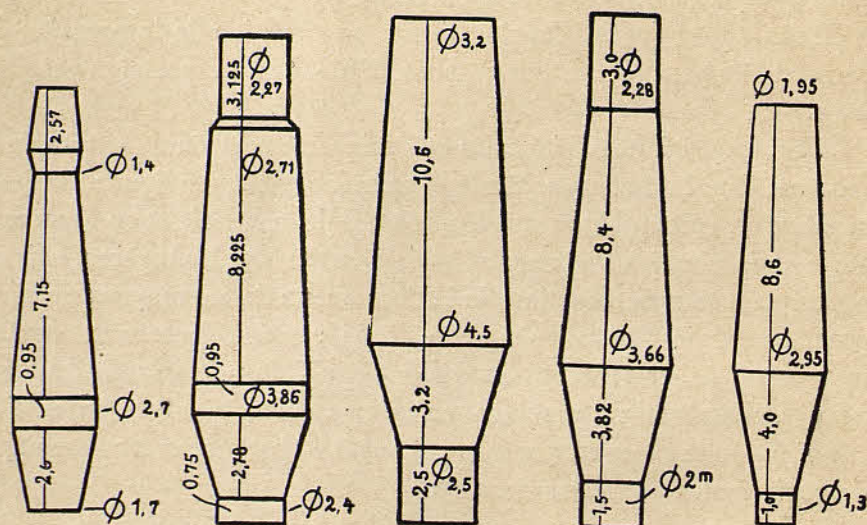
Avec de petits hauts fourneaux au charbon de bois, traitant des minerais spathiques de l'Erzberg de Styrie, facilement réductible, elle peut descendre au-dessous de 10 heures. En général elle est voisine de 20 heures pour les hauts fourneaux au coke, et peut être réduite jusqu'à 12 heures avec de bons minerais, de très bon coke et un soufflage énergique.

Soit v le volume de la charge par tonne de fonte, et z la durée de descente, P la production par vingt-quatre heures, le volume utile du fourneau est :

$$V = P \cdot v \cdot \frac{z}{24}.$$

La détermination du profil ne peut donc se faire qu'en se basant sur la connaissance de fourneaux dont la marche est satisfaisante, en notant avec soin, pour chacun d'eux, avec quelle sorte de minerais il est alimenté. C'est pourquoi nous donnons ci-dessous quelques profils de hauts fourneaux.

HAUTS FOURNEAUX AU CHARBON DE BOIS



Profil 1.

Profil 2.

Profil 3.

Profil 4.

Profil 5.

Vordernberg XIV. Vordernberg III. Vares (Bosnie). Ashland (E.-U.). Portovecchio.

PROFILS DES HAUTS FOURNEAUX

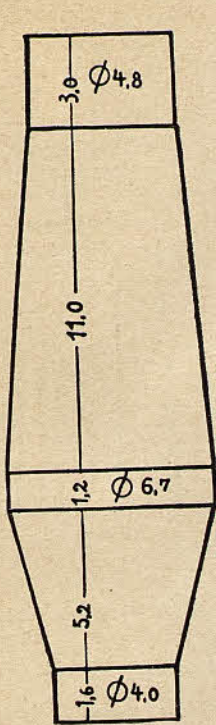
1° Haut fourneau au bois à Vordernberg (n° XIV). Fer spathique de Styrie. Production journalière 24-30 tonnes. Volume intérieur total 40 mètres cubes. 4 tuyères de 80 millimètres de diamètre.

2° Haut fourneau au bois à Vordernberg (n° III). Fer spathique de Styrie. Production journalière 50-60 tonnes. Volume 114,7 m³. 7 tuyères de 110 millimètres de diamètre.

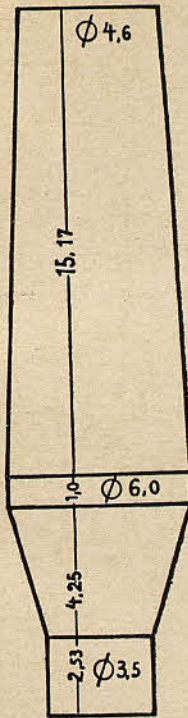
3° Haut fourneau au bois à Vares (Bosnie). Le plus grand haut fourneau au bois actuellement existant. Production journalière 200 tonnes. Traite des hématites de Bosnie et du fer spathique (*Stahl und Eisen*, 1902, p. 492).

4° Haut fourneau au bois de l'Ashland Iron and Steel C°. Production journalière 120 tonnes (*Stahl und Eisen*, 1895, p. 351).

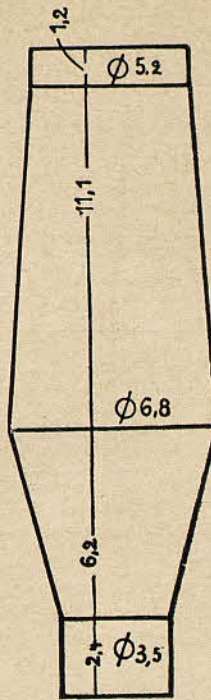
5° Haut fourneau au bois à Portovecchio (Piombino, Italie). Traite des minerais de l'île d'Elbe. Production journalière : 22 tonnes de fonte de moulage (*Stahl und Eisen*, 1902, p. 69).



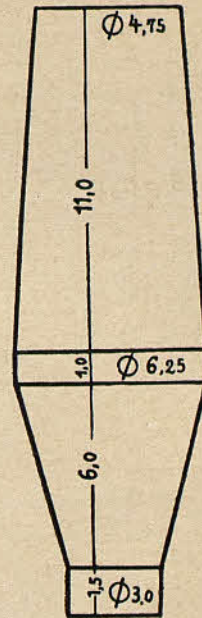
Profil 6.
Hörde.



Profil 7.
Ilsède.



Profil 8.
Differdange.



Profil 9.
Burbach.

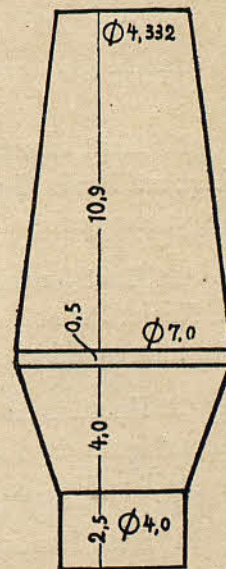
6° Haut fourneau au coke à Hörde. Production journalière 250 tonnes. Teneur du lit de fusion 42 p. 100 (O. Simmersbach, *Stahl und Eisen*, 1906, p. 389).

7° Haut fourneau au coke à Ilsède. Production journalière 240 tonnes. Teneur du lit de fusion 34 p. 100 (O. Simmersbach, *loc. cit.*).

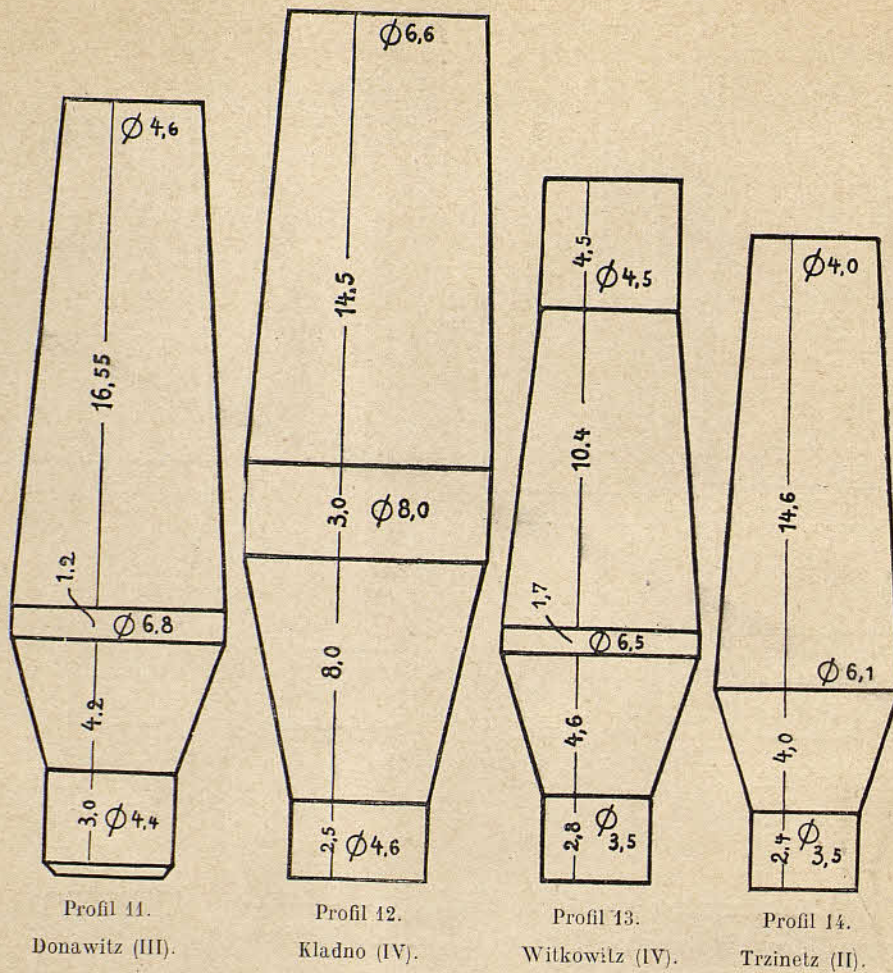
8° Haut fourneau au coke à Differdange. Minette. Production journalière 175 tonnes. Teneur du lit de fusion 30-29, 5 p. 100 (O. Simmersbach, *loc. cit.*).

9° Haut fourneau au coke à Burbach. Production journalière 160 tonnes. Teneur du lit de fusion 31 p. 100 (O. Simmersbach, *loc. cit.*).

10° Haut fourneau au coke à Creuzthal. Production journalière 200 tonnes. Teneur du lit de fusion 36,5 p. 100 (O. Simmersbach, *loc. cit.*).



Profil 10.
Creuzthal.

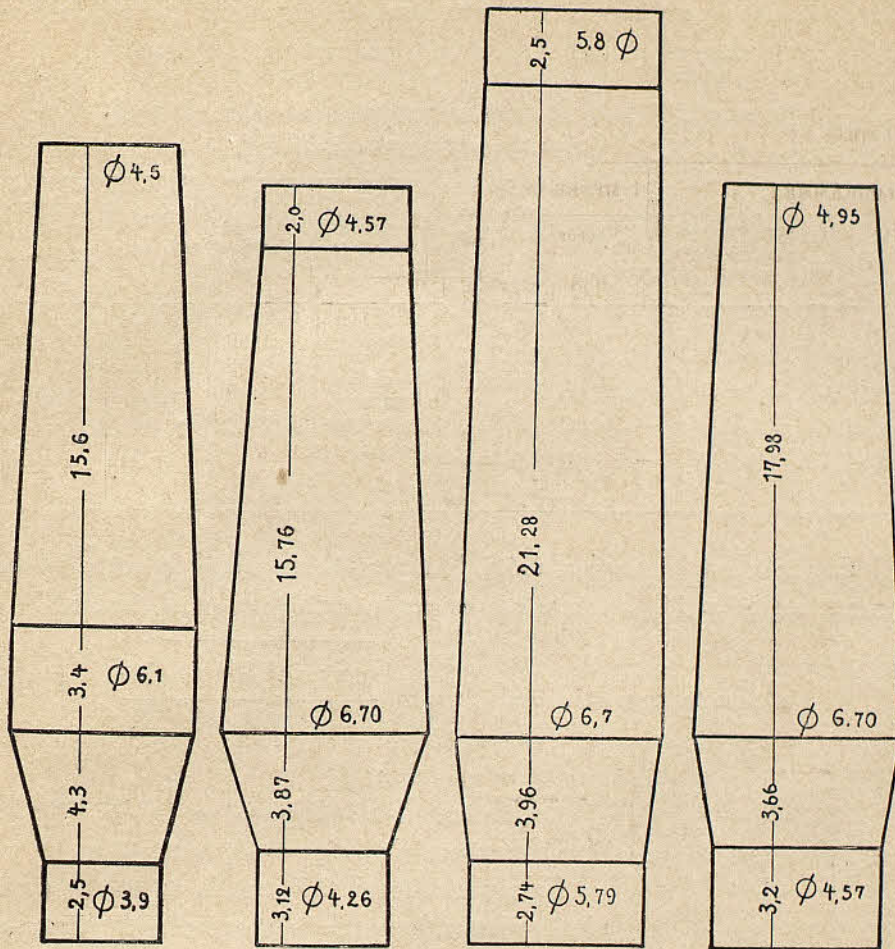


11° Haut fourneau au coke à Donawitz (n° III). Traite des fers spathiques. Production journalière 400 tonnes de fonte Martin. Volume 600 mètres cubes. 16 tuyères de 180 millimètres de diamètre.

12° Haut fourneau au coke à Kladno (n° IV). Traite des minerais de Nucic. Production journalière 150 tonnes de fonte Thomas. Volume 778 mètres cubes.

13° Haut fourneau au coke à Witkowitz (n° IV). Traite des minerais magnétiques de Suède et des fers spathiques de Hongrie. Production journalière 350 tonnes. 12 tuyères de 150 millimètres de diamètre.

14° Haut fourneau au coke à Trzinetz (Silésie autrichienne) (n° II). Traite des fers spathiques de Hongrie, des déchets de grillage des pyrites, etc. Production journalière 175 tonnes. 8 tuyères de 180 millimètres de diamètre.



Profil 15. Kramatorskaïa. Profil 16. Edgar Thomson (E.-U.). Profil 17. Elisa (E.-U.). Profil 18. Lackawanna (E.-U.).

15° Haut fourneau au coke à Kramatorskaïa (Russie méridionale).
 Traité des minerais russes de Krivoï-Rog. Production journalière
 230 tonnes. 8 tuyères (*Stahl und Eisen*, 1906, p. 601).

16° Haut fourneau des usines Edgar Thomson à Pittsburg (E. U.).
 Production journalière 630 tonnes. 9 tuyères de 178 millimètres de
 diamètre, 1 tuyère de 76 millimètres de diamètre.

17° Haut fourneau au coke, des hauts fourneaux d'Elisa à Pittsburg.
 Production journalière environ 800 tonnes. 20 tuyères de 152 milli-
 mètres de diamètre (*Stahl und Eisen*, 1902, p. 70).

18 Haut fourneau au coke de la Lackawanna Steel Co. Production
 journalière 500 tonnes. 16 tuyères de 178 millimètres de diamètre
Stahl und Eisen, 1907, p. 487).

Le professeur Osann dans l'ouvrage cité plus haut calcule le diamètre au ventre en partant des dimensions normales suivantes :

TABLEAU XXXVI. — Dimensions normales pour le calcul du profil.
D'après le professeur Osann.

PRODUCTION par vingt-quatre heures.	DIAMÈTRE du creuset.	HAUTEUR du creuset.	HAUTEUR des tuyères au-dessus du sol.	HAUTEUR des tuyères à laitier.	DIAMÈTRE du gueulard.	ANGLE de la cuve. α	ANGLE des étalages. β
t.	m.	m.	m.		m.		
40-60	2,0-2,5	1,5	1,2-1,3	2/3 de la hauteur des tuyères à vent.	3,5-3,8	86°	76°
61-150	2,5-3,5	jusqu'à 2,0	1,3-1,8		3,8-4,9		
151-350	3,5-4,0	— 2,5	1,8-2,6				
351-600	4,0-4,7	— 3,1					

Connaissant les angles α et β , le rayon du gueulard (r_2) et celui du creuset (r_1) (fig. 11), le diamètre au ventre est donné par la formule

$$\text{Diamètre au ventre} = 2r = 2 \sqrt{\frac{\frac{3V}{\pi} + r_1^3 \operatorname{tg} \beta - r_2^3 \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}}$$

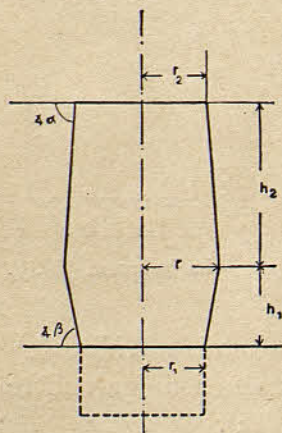


Fig. 11.

On en déduit :

La hauteur des étalages $h_1 = (r - r_1) \operatorname{tg} \beta$.

La hauteur de la cuve $h_2 = (r - r_2) \operatorname{tg} \alpha$.

On peut objecter à ce mode de calcul qu'il n'est guère admissible de calculer la hauteur du haut fourneau, puisque celle-ci dépend en première ligne de nombreux facteurs dont la détermination mathématique n'est pas possible.

A mon avis c'est au contraire de la hauteur du haut fourneau qu'il faut partir; connaissant le volume nécessaire, on pourra calculer le diamètre au ventre; il faut naturellement que les angles de la cuve et des étalages restent dans

des limites acceptables; la hauteur du fourneau détermine donc un volume maximum qu'on ne pourra dépasser.

L'expérience prouve d'ailleurs qu'avec de mauvais minerais, dont la grosseur des morceaux et la solidité ne permettent pas d'avoir des fourneaux trop hauts, ou au contraire avec du coke de mauvaise qualité, on ne peut pas dépasser une certaine hauteur pour le fourneau, ni par conséquent une certaine production journalière.

Si l'on tient compte de ces faits dans le calcul par la formule

d'Osann, on obtient en général des fourneaux trop bas, ce qui est aussi un inconvénient car il faut donner au fourneau la plus grande hauteur possible, pour que le courant gazeux qui monte soit parfaitement utilisé.

La hauteur du haut fourneau est donc une constante déterminée par les conditions locales, comme la durée de descente et le coefficient de tassement.

D'après M. O. Simmersbach (*Stahl und Eisen*, 1906, p. 389), les Américains considèrent que le rapport $\frac{\text{Hauteur totale.}}{\text{Diamètre au ventre.}}$ ne doit pas être inférieur à 4,5. Plus les minerais traités sont difficiles à réduire, plus la durée de descente doit être longue et plus le diamètre doit être grand. Toutefois, pour les minerais du Mesabi, ce rapport n'est que de 3,7. De même, pour les hauts fourneaux allemands ce rapport est petit, et varie de 2,6 à 3,8.

M. le professeur J. v. Ehrenwerth¹ désigne le volume occupé par les matières chargées sous le nom de « volume d'éboulement » (*Sturzvolumen*) et demande qu'il soit déterminé par l'expérience, en chargeant les matières dans un cubilot ou un réservoir cylindrique de grandes dimensions, et en retirant une partie à la base de l'appareil. De tels moyens ne reproduisent pas les conditions du haut fourneau, mais ce sont les seuls qui puissent donner des résultats à peu près utilisables, et c'est pourquoi ils sont encore employés actuellement. Mais l'essai fait par M. v. Ehrenwerth de déterminer le volume d'éboulement n'a qu'une valeur problématique, d'autant plus que les bases sur lesquelles il repose sont en partie choisies arbitrairement, et en partie déterminées par les conditions locales. En admettant que le combustible soit celle des matières qui présente les morceaux les plus gros, et que les autres matières se logent en partie dans les vides, que laissent ces derniers entre eux, M. v. Ehrenwerth donne pour le volume d'éboulement la formule suivante :

$$v = \left(1 - \frac{p}{q}\right) \frac{C}{c} + \frac{M}{m} + \frac{A}{a},$$

où C, M, A représentent les quantités de combustible de minerai et d'addition, en kilogrammes par tonne de fonte, et c , m , a les poids en kilogrammes, correspondant à 1 mètre cube de chacune de ces matières.

Le facteur $\frac{p}{q}$, analogue au coefficient de tassement d'Osann, mais qui ne s'applique ici qu'au combustible, est de 1/4 pour le coke et le charbon de bois tendre, de 1/4-1/5 pour le charbon de bois dur. En

¹ *Osterr Zeitschrift für Berg-und Hütten-Wesen* 1908, mai. Cahier 49 : « Calcul et profils des hauts fourneaux ».

résumé, dit M. v. Ehrenwerth « on pourra prendre, avec de tels minerais (fer spathique de Styrie) et du charbon de bois tendre en volume d'éboulement égal à celui du combustible, avec ces minerais et du charbon de bois dur égal à 1,1 environ, avec du coke de 1,4 à 1,6 de celui du coke ». Cette formule, qui n'est pas applicable d'une façon sûre, même aux hauts fourneaux de Styrie, montre une fois de plus qu'il n'est pas possible de calculer exactement le profil d'un haut fourneau, et que cette détermination doit se faire d'après les conditions locales, et en se basant sur des exemples judicieusement choisis.

VII

LE DIAGRAMME DU HAUT FOURNEAU

La recherche des réactions qui se passent à l'intérieur du haut fourneau, que nous avons poursuivie par le calcul aussi loin qu'il est possible de le faire, sera toujours la question la plus intéressante de la

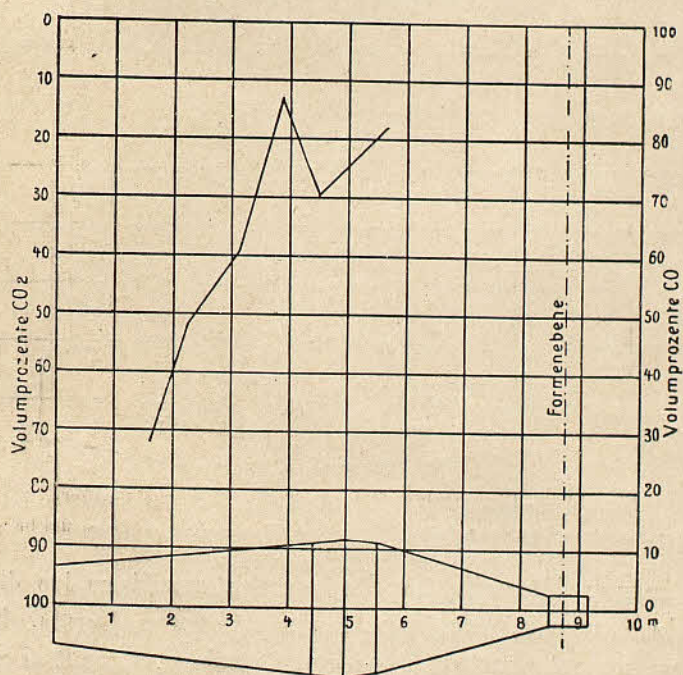


Fig. 12. — Diagramme du haut fourneau de Bärum.

Volumprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

théorie et de la pratique de cet appareil métallurgique, le plus important de nos usines¹.

Au commencement du chapitre III nous avons exposé les recherches de Boudouard et celles de Baur et Glässner; nous allons examiner leur valeur au point de vue de la pratique du haut fourneau. Malheureusement il y a plus de trente-cinq ans qu'il n'a été fait aucune expérience

¹ Voir le travail de l'auteur. *Stahl und Eisen*, 1908, n° 12.

directe sur la marche du haut fourneau. Le dernier ouvrage sur ce sujet est de Schöffel et Kupelwieser¹ et date de 1873. Les recherches minutieuses de ces expérimentateurs sont encore à l'heure actuelle la source la plus importante de nos connaissances sur les réactions intérieures du haut fourneau. Les moyens d'investigation perfectionnés et les instruments de mesures si précis dont nous disposons maintenant n'ont pas été appliqués au haut fourneau; nous ne possédons par

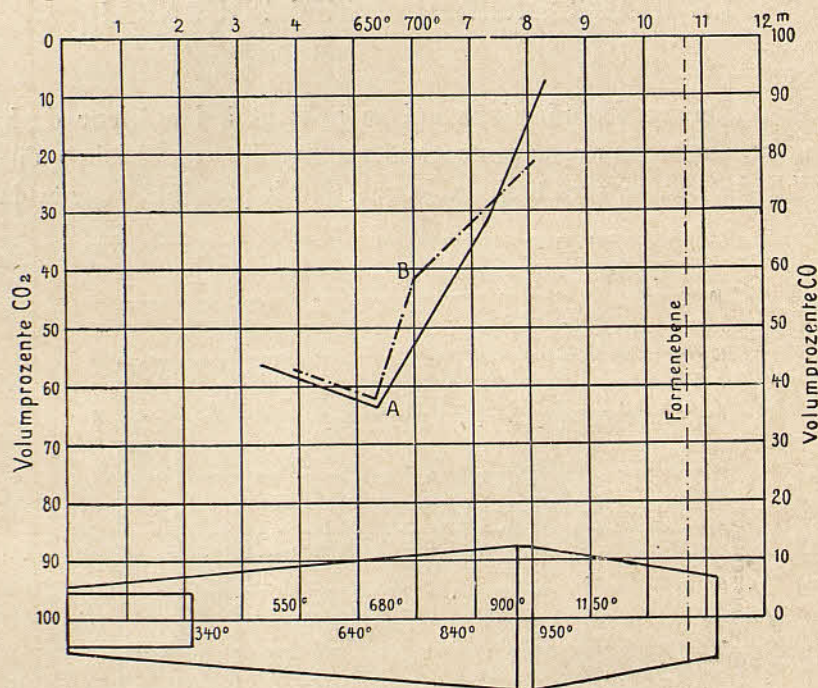


Fig. 13. — Diagramme du fourneau de Wrba à Eisenerz.

Volumprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

exemple aucune détermination des températures dans les différentes régions du fourneau, faite avec les appareils modernes. De telles recherches seraient pourtant d'une grande valeur, surtout si elles mettaient en regard les résultats de la marche normale du fourneau avec ceux observés dans des conditions anormales.

Il ne s'agira donc dans les lignes ci-dessous, que de recherches faites avec des appareils anciens, parfois peu appropriés à leur emploi.

Ces recherches directes, dont les résultats numériques sont donnés dans l'ouvrage de Wedding (*Ausführliche Handbuch der Eisenhüttenkunde*, vol. III, p. 200 et suiv.) sont représentées graphiquement dans les figures 12 à 19.

La figure 12 représente les recherches de Scheerer et Langberg sur

¹ *Jahrbuch der Bergakademie* 21, 494.

le haut fourneau de Bärum (Norvège) en 1843; la figure 13, celles de Tunner et Richter sur le fourneau de Wrzna à Eisenerz en 1860; la figure 14, celles de Rinman et Fernqvist sur le haut fourneau de Hammerby (Suède) en 1862; la figure 15, celles des mêmes auteurs sur le fourneau de Forssjö (Suède) en 1863; la figure 16, celles des mêmes auteurs sur le fourneau de Hasselfors (Suède) en 1864; la figure 17, celles de Kupelwieser et Schöffel sur un fourneau d'Eisenerz en 1873;

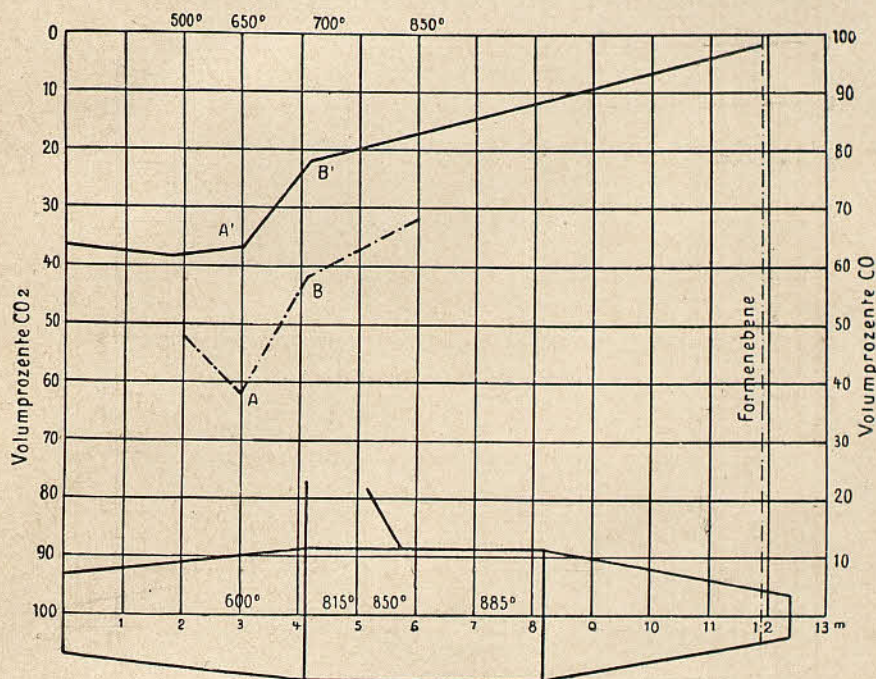


Fig. 14. — Diagramme du haut fourneau de Hammerby.

Volumprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

la figure 18, celles d'Ebelen sur le fourneau d'Audincourt (France) en 1841; la figure 19, celles de Bunsen et Playfair sur le fourneau d'Alfreton (Angleterre) en 1845.

Ces diagrammes sont établis de la façon suivante : le système de coordonnées est le même que pour les diagrammes de Boudouard ou de Baur et Glässner. En ordonnées sont portés les volumes de CO^2 et de CO ($\text{CO}^2 + \text{CO} = 100$; les analyses des gaz doivent être calculées de façon à satisfaire à cette égalité). En abscisses sont les degrés de température qui ne sont pas répartis régulièrement, mais suivant leurs positions dans le fourneau. Pour rendre ce fait visible, le profil du haut fourneau a été tracé au bas du diagramme et les températures sont inscrites en face du point où elles ont été mesurées.

Les degrés de température inscrits à la partie supérieure du dia-

gramme sont des interpolations, dont l'explication sera donnée plus loin. La composition des gaz en chaque point du haut fourneau est représentée par la ligne en trait plein de la figure.

Si l'on examine cette ligne sur les différents diagrammes, on constate (et souvent d'une façon excessivement claire, comme dans les figures 14, 15, 16, 18, 19) que la teneur en CO du gaz croît brusquement entre les points A et B, et si nous notons les températures corres-

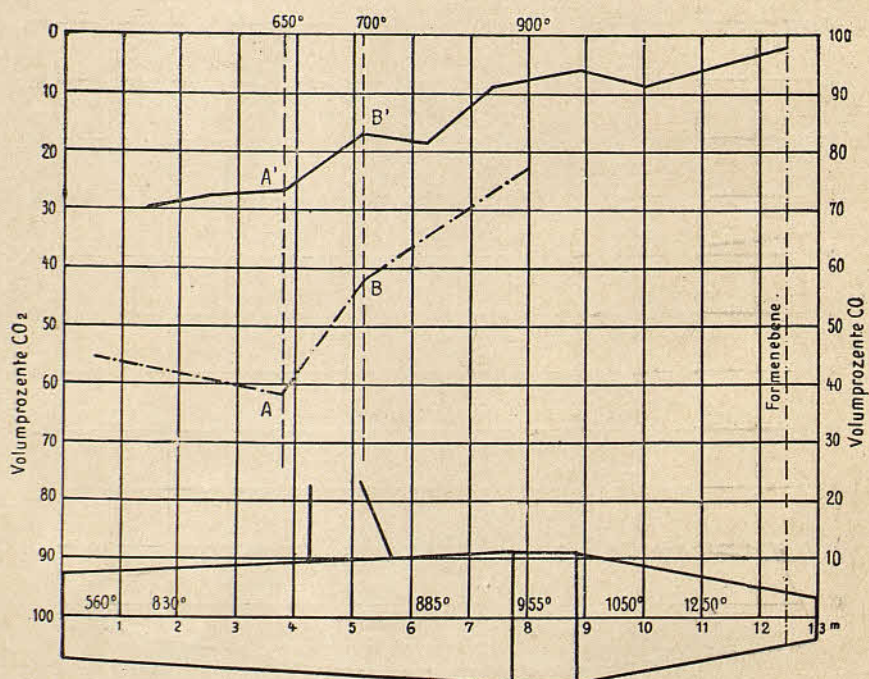


Fig. 15. — Diagramme du haut fourneau de Forssjö.

Volumprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

pondantes, qui n'ont d'ailleurs été mesurées dans ces régions du fourneau que dans les figures 14, 16 et 17, nous voyons que ces points doivent correspondre aux points A et B de la figure 9 (p. 36).

Si l'on tient compte de ce que le courant ascendant, qui emporte la chaleur, est toujours plus chaud que le courant descendant, et si on réfléchit aux difficultés que rencontre la mesure des températures, on est plus certain encore de l'identité des points A' et B' avec les points A et B du diagramme théorique.

C'est là un fait très important, car nous savons que ces points sont environ à 650° C et 700° C; nous pouvons donc vérifier l'exactitude des mesures des températures faites dans le fourneau, ou, ce qui est plus important encore, si on n'a pas fait de telles mesures, reporter les températures après coup sur le diagramme. C'est ce qu'on a fait, en por-

tant sur le bord supérieur du diagramme les températures correspondant aux points A et B ; les différences de températures s'expliquent comme on l'a vu par la différence de chaleur des courants ascendant et descendant.

Ainsi la figure 13 qui, comme on le verra plus loin, représente presque la marche théorique du fourneau, n'indique qu'une différence de 30° C. Malheureusement le nombre des analyses de gaz est un peu faible. La figure 14 indique une différence de 50° C. La figure 15 montre qu'il a dû se produire des erreurs dans la mesure des températures : les chiffres interpolés s'accordent bien avec les températures mesurées au ventre, mais non avec la température de 830° C mesurée à 1,70 m. environ au-dessous du gueulard. La figure 16 indique une différence de 65° C, la figure 17 de 70° C. Les figures 18 et 19 ne portent aucune indication de températures. On ne peut donc pas les interpoler. Il est incontestable qu'en reportant les résultats des mesures sur le dessin du haut fourneau, on les rend beaucoup plus nets.

Avant d'aller plus loin, il faut représenter sur le diagramme la composition théorique des gaz, nécessaire pour que la réduction se fasse ; c'est cette composition qu'indique la ligne pointillée.

Si l'on compare la composition réelle et la composition théorique des gaz, on constate qu'en général la teneur réelle en oxyde de carbone est de 15 à 20 p. 100 supérieure à la teneur théorique, mais que d'une façon générale l'allure des deux courbes est tout à fait semblable (voir les figures 14, 15, 16, 18, 19) ; par conséquent les courbes de Baur et Glässner sont exactes et les phénomènes qu'indique le diagramme théorique sont bien ceux qui se passent en réalité.

Les recherches de Scheerer et Langberg sur le haut fourneau de Bärum (fig. 12) ne permettent pas de retrouver les points A et B ; par suite du manque de mesures de températures, on ne peut noter aucun point qui leur corresponde. La teneur élevée des gaz en CO² au gueulard s'explique par une action réductrice très énergique sur les minerais magnétiques traités et Scheerer arrive à la conclusion que les minerais, avant d'atteindre la partie inférieure du fourneau, devaient être presque complètement réduits.

Sur la figure 13, qui représente les recherches de Tunner et Richter sur le fourneau de Wrzna à Eisenerz, on observe un rapport $\frac{\text{CO}}{\text{CO}^2}$ qui, pour une consommation de charbon de bois de 78 kilogrammes par 100 kilogrammes de fonte, est un peu plus faible que la valeur correspondant théoriquement à l'état d'équilibre. Cette différence, d'ailleurs peu importante, peut s'expliquer, soit par des erreurs de mesure, soit par le grillage insuffisant des minerais spathiques. Comme aucune

analyse n'a été faite de 5,40 m. à 7,30 m. au-dessous du gueulard, l'importance plus grande de la différence, qui semble résulter, dans cette région, du tracé de la ligne qui joint les points connus, n'est pas prouvée. En tous les cas l'allure de ce haut fourneau se rapproche beaucoup de l'état d'équilibre; c'est pourquoi aucune action réductrice intense ne peut se produire, et c'est ce qui explique que Tunner n'en ait observé que dans les régions inférieures du fourneau.

Les figures 14 à 16 qui représentent les recherches de Rinman et

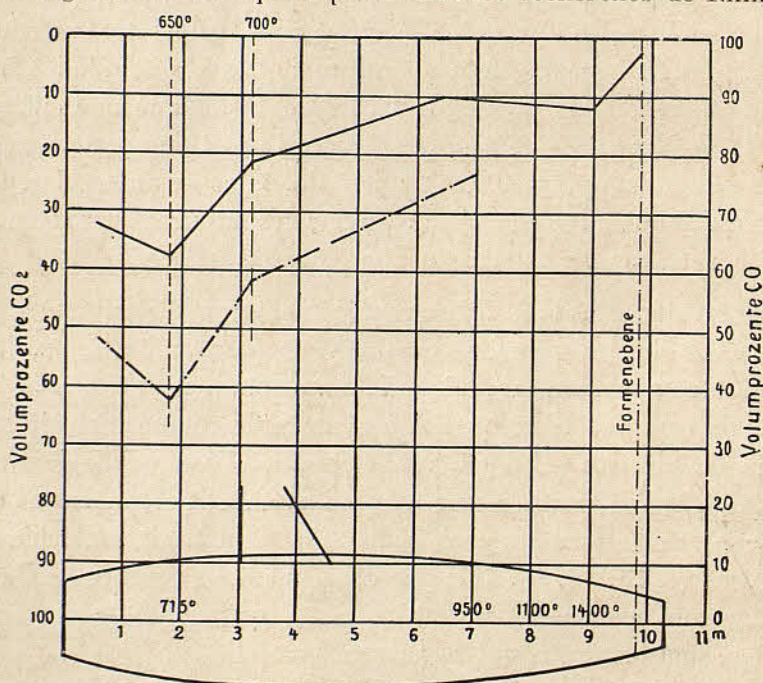


Fig. 16. — Diagramme du haut fourneau de Hasselfors.

Volumentprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

Fernqvist sur les hauts fourneaux de Hammerby, Forssjö et Hasselfors, indiquent des allures qui concordent bien avec l'allure théorique. Les conditions de ces trois fourneaux sont analogues; on voit clairement l'influence de la teneur en CO² de la castine. La branche de la courbe à gauche de A' est plus basse sur les figures 14 et 15 que sur la figure 16; or, dans les deux premiers cas l'addition de castine était considérable tandis qu'à Hasselfors elle était faible. La marche de ces trois fourneaux paraît avoir été excellente; les consommations de charbon de bois étaient de 106, 123 et 84 kilogrammes par 100 kilogrammes de fonte, différences qui influent aussi sur l'allure des courbes.

L'influence de la teneur en CO² des minerais est très visible sur la figure 17 qui représente les recherches de Kupelwieser et Schöffel sur un haut fourneau d'Eisenerz.

Le minerai spathique n'avait été qu'incomplètement grillé et contenait encore environ 12,1 p. 100 de CO_2 . La température des gaz du gueulard est élevée, à cause de l'emploi de minerais chauds, venant directement des fours de grillage. La marche est d'ailleurs normale et la faible consommation de combustible (75 kilogrammes de charbon de bois par 100 tonnes de fonte) est digne de remarque. L'allure de la courbe montre qu'au début la seule réduction possible est celle, par le

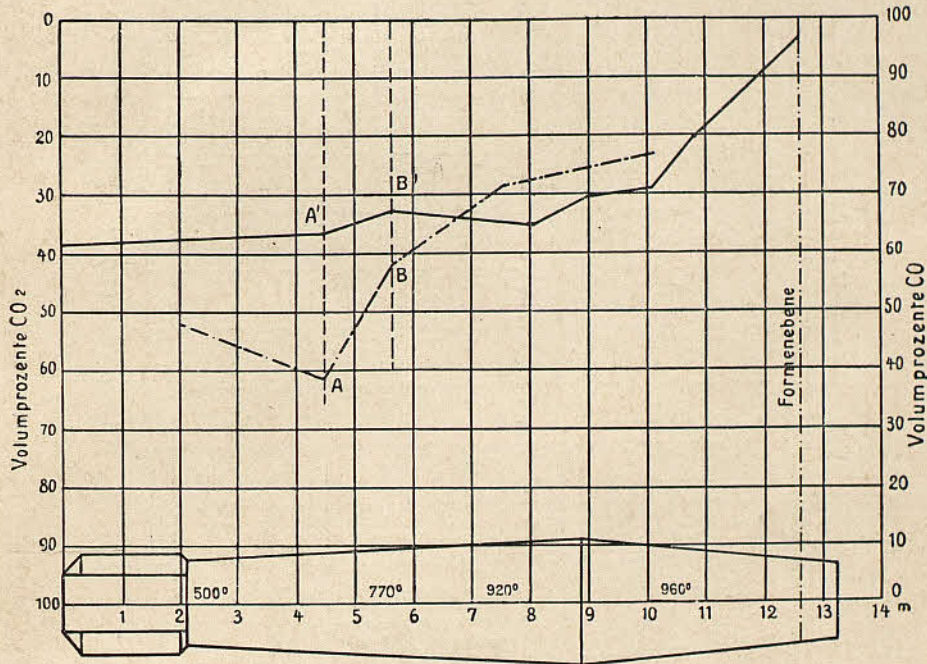


Fig. 17. — Diagramme d'un haut fourneau à Eisenerz (Schöffel et Kupelwieser).

Volumentprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

CO , des oxydes supérieurs produits par le grillage, et que la réduction du FeO ne peut commencer qu'à 10 mètres du gueulard ; en effet, jusque-là, la proportion de CO mesurée est plus faible que la proportion théoriquement nécessaire. Cette différence pourrait aussi s'expliquer par l'incertitude sur la détermination des températures, explication d'autant plus vraisemblable que celles-ci paraissent monter avec une lenteur exagérée. En tous les cas, dans cette région du fourneau, les courbes pratique et théorique sont voisines. Ce n'est qu'à 11 mètres environ du gueulard que la réduction commence avec intensité, ce qui concorde avec les observations de Tunner et Richter sur des fourneaux alimentés avec des minerais analogues. Les points A' et B' sont, sinon remarquablement, du moins nettement indiqués, et les températures mesurées s'accordent bien.

La figure 18, qui représente les recherches d'Ebelmen sur un haut fourneau à Audincourt, montre une concordance idéale de la marche réelle et de la marche théorique du fourneau. On peut ici, en toute sécurité, compléter les mesures de températures grâce à l'indication parfaite des points A' et B'.

La figure 19 représente les recherches de Bunsen et Playfair à Alfreton sur un haut fourneau alimenté avec de la houille crue, ce qui

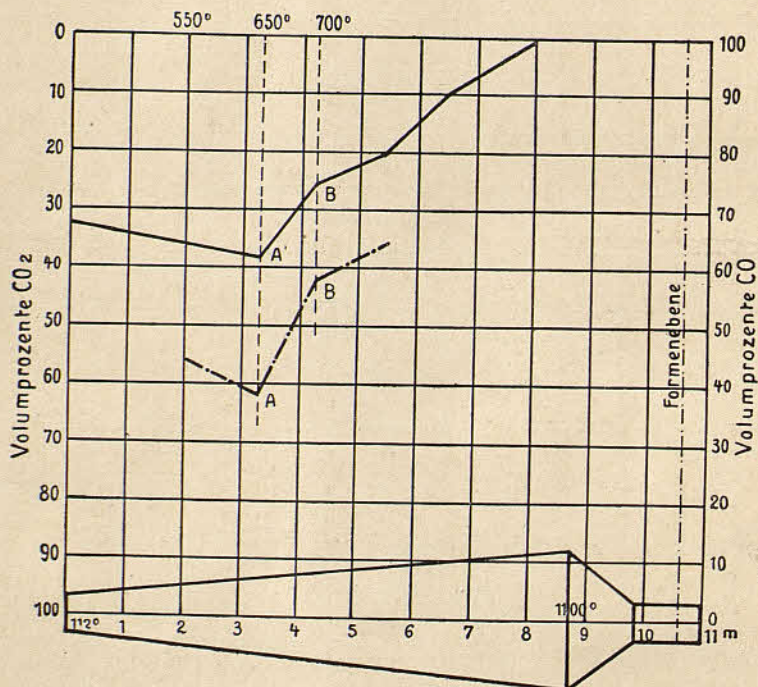


Fig. 18. — Diagramme du haut fourneau d'Audincourt.

Volumprozente = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

explique peut-être les variations de composition des gaz dans les zones supérieures du fourneau. L'action réductrice du courant gazeux dans la cuve est trop faible, et il est probable que la brusque élévation de la teneur en CO^2 à 7 mètres au-dessous du gueulard provient de la décomposition de la castine. Ici encore, on n'observe de réduction intense que dans les régions inférieures du haut fourneau.

Nous ne pouvons malheureusement pas dire quelles sont les conditions dans lesquelles se fait la réduction dans nos fourneaux modernes, conduits avec une forte pression du vent, puisqu'il n'existe aucune expérience qui puisse être représentée ainsi par un diagramme, comme ces anciennes recherches. L'étude directe du haut fourneau est pourtant plus facile avec les fourneaux à cuve libre, et pourrait, avec des appareils modernes, être poursuivie d'une façon continue.

On ne peut pas encore dire exactement, à l'heure actuelle, quelle serait l'utilité de semblables expériences. Sans doute, elles donneraient des indications précieuses pour l'établissement du profil des hauts fourneaux d'après la nature des minerais à traiter, et sur la meilleure répartition des températures pour un profil donné. Si ces questions, extrê-

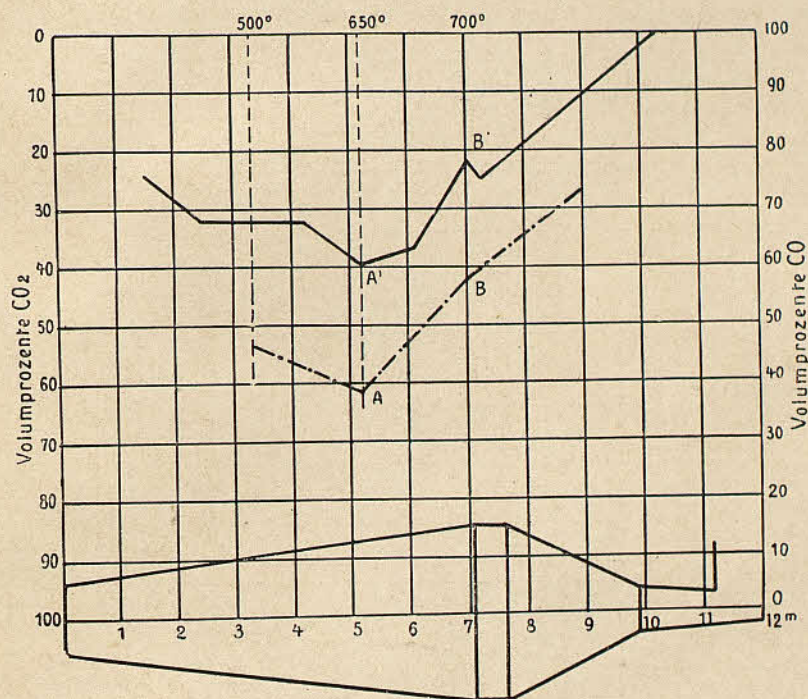


Fig. 49. — Diagramme du haut fourneau d'Alfreton.

Volumprozent = Volumes p. 100.

Formenebene = Niveau des tuyères.

mement importantes pour la conduite du fourneau, étaient élucidées, on serait peut-être conduit à envisager d'autres points de vue, probablement en faisant des mesures continues de la température aux points principaux du profil; les facilités qui en résulteraient pour le traitement de bien des difficultés que l'on considère actuellement comme accidentelles, justifieraient peut-être amplement les frais et le travail que nécessitent de telles recherches. A mon avis, le champ d'action qui s'ouvre ainsi devant nous est encore vaste et fécond.

ANNEXES

TABLES NUMÉRIQUES

TABLEAU I. — Tableau pour les

1	2	3		5	6	7	8		9 10	
		POIDS atomique.	POIDS moléculaire				CHALEUR spécifique.	DENSITÉ	POIDS spécifique.	VOLUME de 1 kilo-gramme.
	SYMBOLE						1 m ³ = kg.	1 kg. = m ³ .	pour 1 kilog.	pour 1 m ³
Oxygène	O	16	32	0,2175	1,4056	1,4291	0,6993		cal.	cal.
Azote	Az	14,04	28,08	0,2438	0,9713	1,2544	0,8000			
Air	En poids 77 % Az 23 % O En vol. 79 % Az 21 % O			0,2377	1,000	1,2928	0,7752			
Vapeur d'eau	H ² O	»	18,016	0,4803	0,6219	100° 0,6057	1,6508			
Acide carbonique	CO ²	»	44,0	0,2169	1,5201	1,9652	0,5102			
Acide sulfureux	SiO ²	»	46,06	0,1544	2,2131	2,8611	0,3496			
Carbone en CO	C	12	24,0	0,46	»	1,885	»	2 473	»	
Carbone en CO ²	»	»	»	»	»	»	»	8 080	»	
Oxyde de carbone en CO ²	CO	»	28,0	0,2426	0,9673	1,2506	0,799	2 403	3 000	
C de CO en CO ²	»	»	»	»	»	»	»	5 607	»	
Hydrogène transformé en eau	H	1,008	2,016	3,4090	0,0696	0,09004	11,414	34 462	3 401	
Hydrogène transformé en vapeur d'eau	»	»	»	»	»	»	»	28 780	2 590	
Méthane	CH ⁴	»	16,03	0,328	0,5539	0,7160	1,396	12 000	8 592	
Ethylène	C ² H ⁴	»	28,03	0,421	0,9684	1,2520	0,798	11 200	14 000	
Soufre	S	32,06	SO ² 64,06	0,1764	»	»	»	2 250	»	
Silicium	Si	28,4	SiO ² 60,4	0,205	»	2,350	»	7 830	»	
Phosphore	P	31,0	P ² O ⁵ 142,0	0,2045	»	2,340	»	5 900	»	
Fer transformé en FeO	Fe	55,9	111,8	0,41	»	7,86	»	1 350	»	
Fer en Fe ² O ⁴	FeO Fe ³ O ⁴	» »	71,9 231,7	0,1678	»	»	»	»	»	
Fer en Fe ² O ³	Fe ² O ³	»	159,8	0,1645	Fe ³ O ⁴ : Fe ² O ³ :	5,760 5,120	»	1 650	»	
Manganèse en MnO	Mn	55,0	110,0	0,12	»	7,390	»	1 730	»	
Manganèse en Mn ² O ⁴	MnO Mn ³ O ⁴	» »	71,0 229,0	0,1370	MnO : Mn ³ O ⁴ :	5,091 4,610	»	1 970	»	
Manganèse en MnO ²	MnO ²	»	87,0	0,1700	MnO ² :	5,026	»	2 250	»	
Aluminium	Al	27,1	54,2	0,2189	»	2,60 Al ² O ³ :	»	7 200	»	
Chrome	Cr	52,1	104,2	0,120	»	6,500 Cr ² O ³ :	»	»	»	

calculs calorimétriques.

COMBUSTION DE 1 PARTIE DU CORPS												
OXYGÈNE NÉCESSAIRE		AIR NÉCESSAIRE		PRODUITS DE LA COMBUSTION		AZOTE DE L'AIR		TOTAL DES PRODUITS DE LA COMBUSTION				
kg.	m ³	kg.	m ³	kg.	m ³	kg.	m ³	kg.	m ³ à 0°.	m ³ à 100°		
A 1 partie d'O de l'air correspondent 3,333 d'Az. A 1 partie d'O de l'air correspondent 4,348 d'air.												
1,33	0,93	5,79	4,48	CO	2,33	1,86	4,46	3,55	6,79	5,41		
2,67	1,87	11,60	9,02	CO ²	3,67	1,87	8,93	7,45	12,60	8,99		
0,57	0,39	2,48	1,92	CO ²	1,57	0,80	1,91	1,53	3,48	2,32		
1,33	0,93	5,79	4,48	CO ²	3,67	1,87	4,46	3,55	8,13	5,42		
8,00	5,59	34,72	26,96	H ² O	9,00	14,86	26,72	21,37	35,72	21,37 9 kg. H ² O		
8,00	5,59	34,72	26,96	H ² O	9,00	14,86	26,72	21,37	35,72	» 43,06		
4,00	2,80	17,36	13,44	CO ² 2H ² O	2,75 2,25	1,40 3,71	13,36	10,65	18,36	» 20,12		
3,43	2,40	14,92	11,52	2CO ² 2H ² O	3,14 1,29	1,60 2,13	11,49	9,12	15,92	» 16,81		
1,00	0,69	4,33	3,35	SO ²	2,00	0,70	3,33	2,66	5,33	3,36		
1,13	0,791	4,89	3,799	SiO ²	2,13	»	3,76	3,008	5,89	»		
1,29	0,903	5,55	4,311	P ² O ⁵	2,29	»	4,26	3,408	6,55	»		
0,286	0,200	1,22	0,864	FeO	1,286	»	0,83	0,664	2,216	»		
0,321	0,225	1,38	1,073	Fe ³ O ⁴	1,321	»	1,06	0,848	2,38	»		
0,428	0,299	1,84	1,427	Fe ² O ³	1,428	»	1,41	1,128	2,84	»		
0,291	0,204	1,25	0,972	MnO	1,291	»	0,96	0,768	2,25	»		
0,388	0,272	1,67	1,296	Mn ³ O ⁴	1,391	»	1,28	1,024	2,67	»		
0,582	0,407	2,50	1,943	MnO ²	1,582	»	1,92	1,536	3,50	»		
0,885	0,619	3,80	2,953	Al ² O ³	1,885	»	2,92	2,336	4,80	»		
0,460	0,322	1,98	1,538	Cr ² O ³	1,460	»	2,52	1,216	2,98	»		

TABLEAU II. — *Chaleurs spécifiques moyennes des gaz facilement liquéfiables.*
D'après Beckert, *Métallurgie du fer*, I.

TEMPÉ- RATURE	1 KILOGRAMME				1 MÈTRE CUBE A ...° ET 760 MILLIMÈTRES			
	Vapeur d'eau.	CO ₂	SO ₂	CH ₄	Vapeur d'eau.	CO ₂	SO ₂	CH ₄
0°	0,4415	0,1952	0,1450	0,3710	0,3555	0,3861	0,4164	0,2967
100°	702	0,2079	544	931	786	0,4112	435	0,3160
200°	989	206	638	0,4092	0,4017	363	705	353
300°	0,5276	333	732	433	248	614	976	546
400°	562	460	827	675	479	865	0,5247	739
500°	850	586	921	916	710	0,5116	517	952
600°	0,6137	713	0,2015	0,5157	941	367	788	0,4124
700°	424	840	109	398	0,5172	618	0,6059	317
800°	711	967	204	639	403	869	329	510
900°	998	0,3094	298	880	634	0,6120	600	703
1 000°	0,7285	221	392	0,6121	865	371	871	896
1 100°	572	348	486	363	0,6096	624	0,7141	0,5089
1 200°	859	475	580	604	327	873	412	282
1 300°	0,8146	602	675	845	558	0,7124	682	475
1 400°	433	728	769	0,7086	789	375	953	667
1 500°	720	855	863	327	0,7020	626	0,8224	860
1 600°	0,9007	982	957	568	251	877	495	0,6053
1 700°	294	0,4109	0,3052	809	482	0,8128	765	246
1 800°	581	236	146	0,8051	713	379	0,9036	439
1 900°	868	363	240	292	944	630	307	632
2 000°	1,0155	490	334	533	0,8175	881	577	825

TABLEAU III. — *Chaleurs spécifiques moyennes des gaz difficilement liquéfiables.*
D'après Beckert, *Métallurgie du fer*, I.

TEMPÉ- RATURE	1 KILOGRAMME					1 MÈTRE CUBE		
	Air.	O	Az	H	CO	CH ₄	Air O, Az, H, CO	CH ₄
0°	0,2375	0,2175	0,2438	3,4090	0,2425	0,5930	0,3073	0,4256
100°	405	202	468	517	455	0,6004	111	310
200°	34	29	99	943	86	078	149	362
300°	64	57	0,2529	3,5369	0,2516	152	188	416
400°	94	84	60	795	46	226	226	469
500°	0,2523	0,2311	90	3,6121	77	300	265	522
600°	53	38	0,2621	647	0,2607	374	303	575
700°	83	66	51	3,7073	37	448	341	629
800°	0,2612	93	82	499	67	522	380	682
900°	42	0,2420	0,2712	925	98	596	418	735
1 000°	72	47	43	3,8351	0,2728	0,6671	0,3457	0,4788
1 100°	0,2702	74	73	777	58	745	496	841
1 200°	31	0,2501	0,2804	3,9204	89	819	534	895
1 300°	61	28	34	630	0,2819	893	572	948
1 400°	91	56	65	4,0056	49	967	610	0,5001
1 500°	0,2820	83	95	482	80	0,7041	649	054
1 600°	50	0,2610	0,2926	908	0,2910	115	688	107
1 700°	80	37	56	4,1334	40	189	725	161
1 800°	0,2909	64	86	761	70	264	764	214
1 900°	39	91	0,3016	4,2187	0,3000	338	801	265
2 000°	69	0,2719	47	613	31	412	841	320

TABLEAU IV. — Équivalents mécaniques de la chaleur.

	GRANDE calorie.	CHEVAL HEURE	KILOWATT HEURE	KILOGRAMME de carbone.	KILOGRAMMÈTRE
1 grande calorie.	1	0,001 53	0,001 156	0,000 123 7	424
1 cheval-heure.	636,8	1	0,735	0,0788	270 000
1 kilowatt-heure.	864,5	1,36	1	0,107	367 200
1 kilogramme de carbone complètement brûlé.	8080	12,36	9,29	1	3 425 920
1 kilogrammètre	0,00236	$\frac{1}{270\ 000}$	$\frac{1}{367\ 200}$	$\frac{1}{3\ 425\ 920}$	1

TABLEAU V. — Humidité de l'air (grammes d'eau dans 1 kilogramme d'air à t° et h^{mm} de mercure).

(D'après Landolt-Börnstein, *Physique et Chimie*, tableaux, p. 126).

t°	760 mm.	700 mm.	600 mm.	t°	760 mm.	700 mm.	600 mm.
	gr.	gr.	gr.		gr.	gr.	gr.
— 30°	0,31	0,34	0,39	0°	3,75	4,07	4,75
— 25°	0,49	0,54	0,63	+ 5°	5,34	5,80	6,77
— 20°	0,77	0,84	0,98	+10°	7,51	8,16	9,53
— 15°	1,19	1,28	1,49	+15°	10,43	11,34	13,24
— 10°	1,76	1,91	2,23	+20°	14,33	15,57	18,20
— 5°	2,59	2,81	3,28	+25°	19,47	21,17	24,73
0°	3,75	4,07	4,75	+30°	26,18	28,47	»

TABLEAU VI. — Poids de 1 m³ d'air à t° et 760 mm.

POUR UNE PRESSION BAROMÉTRIQUE $H_1 P_1 = P \frac{H}{760}$.

— 20°	1,3952	— 10°	1,3426	+ 0°	1,2928	10°	1,2470	20°	1,2044
— 19°	1,3897	— 9°	1,3370	1°	1,2881	11°	1,2426	21°	1,2003
— 18°	1,3842	— 8°	1,3319	2°	1,2834	12°	1,2383	22°	1,1962
— 17°	1,3788	— 7°	1,3269	3°	1,2787	13°	1,2339	23°	1,1922
— 16°	1,3734	— 6°	1,3219	4°	1,2741	14°	1,2296	24°	1,1881
— 15°	1,3681	— 5°	1,3170	5°	1,2695	15°	1,2253	25°	1,1842
— 14°	1,3628	— 4°	1,3121	6°	1,2649	16°	1,2211	26°	1,1802
— 13°	1,3576	— 3°	1,3072	7°	1,2604	17°	1,2169	27°	1,1762
— 12°	1,3524	— 2°	1,3024	8°	1,2559	18°	1,2127	28°	1,1723
— 11°	1,3472	— 1°	1,2976	9°	1,2515	19°	1,2085	29°	1,1684

Poids spécifique de 1 mètre cube d'air humide.

$$\gamma = 0,0001252 \frac{p - p_a}{1 + \alpha t} + \frac{x}{1000}$$

$$\gamma = 0,0001252 \frac{1,0334 - p_a}{1 + 0,0036665 t} + \frac{x}{1000}$$

Valeurs de x, voir tableau V.

x = quantité de vapeur d'eau en gr.

p_a = pression de la vapeur d'eau en kg/m².

p = pression de l'air à 760 mm., en kg/m² = 10 344 kg.

TABLEAU VII. — Table numérique de $n = 1$ à $n = 0,01$.

n	n^2	n^3	\sqrt{n}	$\sqrt[3]{n}$	$\frac{1}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
1,00	1,0000	1,000000	1,00000	1,00000	1,00000	3,1416	0,785308	1,00
0,99	0,9801	0,970249	0,99499	0,99666	1,01010	3,1102	0,7698	0,99
0,98	0,9604	0,941192	0,98995	0,99329	1,02041	3,0788	0,7543	0,98
0,97	0,9409	0,912673	0,98489	0,98990	1,03093	3,0473	0,7390	0,97
0,96	0,9216	0,884736	0,97980	0,98648	1,04167	3,0159	0,7238	0,96
0,95	0,9025	0,857375	0,97468	0,98305	1,05263	2,9845	0,7088	0,95
0,94	0,8836	0,830584	0,96954	0,97959	1,06383	2,9531	0,6940	0,94
0,93	0,8649	0,804357	0,96437	0,97610	1,07527	2,9217	0,6793	0,93
0,92	0,8464	0,778688	0,95917	0,97259	1,08696	2,8903	0,6648	0,92
0,91	0,8281	0,753571	0,95394	0,96905	1,09890	2,8588	0,6504	0,91
0,90	0,8100	0,729000	0,94868	0,96549	1,11111	2,8274	0,6362	0,90
0,89	0,7921	0,704969	0,94340	0,96190	1,12360	2,7960	0,6221	0,89
0,88	0,7744	0,681472	0,93808	0,95828	1,13636	2,7646	0,6082	0,88
0,87	0,7569	0,658503	0,93274	0,95464	1,14943	2,7332	0,5945	0,87
0,86	0,7396	0,636056	0,92736	0,95097	1,16279	2,7018	0,5809	0,86
0,85	0,7225	0,614125	0,92195	0,94727	1,17647	2,6704	0,5674	0,85
0,84	0,7056	0,592704	0,91652	0,94354	1,19048	2,6389	0,5542	0,84
0,83	0,6889	0,571787	0,91104	0,93978	1,20482	2,6075	0,5411	0,83
0,82	0,6724	0,551368	0,90554	0,93599	1,21951	2,5761	0,5281	0,82
0,81	0,6561	0,531441	0,90000	0,93217	1,23457	2,5447	0,5153	0,81
0,80	0,6400	0,512000	0,89443	0,92832	1,25000	2,5133	0,5026	0,80
0,79	0,6241	0,493039	0,88882	0,92443	1,26582	2,4819	0,4902	0,79
0,78	0,6084	0,474552	0,88318	0,92052	1,28205	2,4504	0,4778	0,78
0,77	0,5929	0,456533	0,87750	0,91657	1,29870	2,4190	0,4657	0,77
0,76	0,5776	0,438976	0,87178	0,91258	1,31579	2,3876	0,4536	0,76
0,75	0,5625	0,421875	0,86603	0,90856	1,33333	2,3562	0,4418	0,75
0,74	0,5476	0,405224	0,86023	0,90450	1,35135	2,3248	0,4301	0,74
0,73	0,5329	0,389017	0,85440	0,90041	1,36986	2,2934	0,4185	0,73
0,72	0,5184	0,373248	0,84853	0,89628	1,38889	2,2619	0,4071	0,72
0,71	0,5041	0,357911	0,84261	0,89211	1,40845	2,2305	0,3959	0,71
0,70	0,4900	0,343000	0,83666	0,88790	1,42857	2,1991	0,3848	0,70
0,69	0,4761	0,328509	0,83066	0,88366	1,44928	2,1677	0,3739	0,69
0,68	0,4624	0,314432	0,82462	0,87937	1,47059	2,1363	0,3632	0,68
0,67	0,4489	0,300763	0,81854	0,87503	1,49254	2,1049	0,3526	0,67
0,66	0,4356	0,287496	0,81240	0,87066	1,51515	2,0735	0,3421	0,66
0,65	0,4225	0,274625	0,80623	0,86624	1,53846	2,0420	0,3318	0,65
0,64	0,4096	0,262144	0,80000	0,86177	1,56250	2,0106	0,3217	0,64
0,63	0,3969	0,250047	0,79374	0,85726	1,58730	1,9792	0,3117	0,63
0,62	0,3844	0,238328	0,78740	0,85270	1,61290	1,9478	0,3019	0,62
0,61	0,3721	0,226981	0,78102	0,84809	1,63934	1,9164	0,2922	0,61
0,60	0,3600	0,216000	0,77460	0,84343	1,66667	1,8850	0,2827	0,60
0,59	0,3481	0,205379	0,76811	0,83872	1,69492	1,8535	0,2734	0,59
0,58	0,3364	0,195112	0,76158	0,83396	1,72414	1,8221	0,2642	0,58
0,57	0,3249	0,185193	0,75498	0,82913	1,75439	1,7907	0,2552	0,57
0,56	0,3136	0,175616	0,74833	0,82426	1,78571	1,7593	0,2463	0,56
0,55	0,3025	0,166375	0,74162	0,81932	1,81818	1,7279	0,2376	0,55
0,54	0,2916	0,157464	0,73485	0,81433	1,85185	1,6965	0,2290	0,54
0,53	0,2809	0,148877	0,72801	0,80927	1,88679	1,6650	0,2206	0,53
0,52	0,2704	0,140608	0,72111	0,80415	1,92308	1,6336	0,2124	0,52
0,51	0,2601	0,132651	0,71414	0,79896	1,96078	1,6022	0,2043	0,51

TABLEAU VII (SUITE). — Table numérique de $n = 1,0$ à $n = 0,01$.

n	n^2	n^3	\sqrt{n}	$\sqrt[3]{n}$	$\frac{1}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
0,50	0,2500	0,125000	0,70711	0,79370	2,00000	1,5708	0,1963	0,50
0,49	0,2401	0,117649	0,70000	0,78837	2,04082	1,5394	0,1886	0,49
0,48	0,2304	0,110592	0,69282	0,78297	2,08333	1,5080	0,1809	0,48
0,47	0,2209	0,103823	0,68557	0,77750	2,12766	1,4765	0,1735	0,47
0,46	0,2116	0,097336	0,67823	0,77194	2,17391	1,4451	0,1662	0,46
0,45	0,2025	0,091125	0,67082	0,76631	2,22222	1,4137	0,1590	0,45
0,44	0,1936	0,085184	0,66332	0,76059	2,27273	1,3823	0,1520	0,44
0,43	0,1849	0,079507	0,65574	0,75478	2,32558	1,3509	0,1452	0,43
0,42	0,1764	0,074088	0,64807	0,74889	2,38095	1,3195	0,1385	0,42
0,41	0,1681	0,068921	0,64031	0,74290	2,43902	1,2881	0,1320	0,41
0,40	0,1600	0,064000	0,63246	0,73681	2,50000	1,2566	0,1257	0,40
0,39	0,1521	0,059319	0,62450	0,73061	2,56410	1,2252	0,1194	0,39
0,38	0,1444	0,054872	0,61644	0,72432	2,63158	1,1938	0,1134	0,38
0,37	0,1369	0,050653	0,60828	0,71791	2,70270	1,1624	0,1075	0,37
0,36	0,1296	0,046656	0,60000	0,71138	2,77778	1,1310	0,1018	0,36
0,35	0,1225	0,042875	0,59161	0,70473	2,85714	1,0996	0,09621	0,35
0,34	0,1156	0,039304	0,58310	0,69795	2,94418	1,0681	0,09079	0,34
0,33	0,1089	0,035937	0,57446	0,69104	3,03030	1,0367	0,08533	0,33
0,32	0,1024	0,032768	0,56569	0,68399	3,12500	1,0053	0,08042	0,32
0,31	0,0961	0,029791	0,55678	0,67679	3,22581	0,9739	0,07548	0,31
0,30	0,0900	0,027000	0,54772	0,66943	3,33333	0,9425	0,07068	0,30
0,29	0,0841	0,024389	0,53852	0,66191	3,44828	0,9111	0,06605	0,29
0,28	0,0784	0,021952	0,52915	0,65421	3,57143	0,8796	0,06157	0,28
0,27	0,0729	0,019683	0,51962	0,64633	3,70370	0,8482	0,05725	0,27
0,26	0,0676	0,017576	0,50990	0,63825	3,84615	0,8168	0,05309	0,26
0,25	0,0625	0,015625	0,50000	0,62996	4,00000	0,7854	0,04909	0,25
0,24	0,0576	0,013824	0,48990	0,62145	4,16667	0,7540	0,04524	0,24
0,23	0,0529	0,012167	0,47958	0,61269	4,34783	0,7226	0,04155	0,23
0,22	0,0484	0,010618	0,46904	0,60368	4,54545	0,6911	0,03801	0,22
0,21	0,0441	0,009261	0,45826	0,59439	4,76190	0,6597	0,03464	0,21
0,20	0,0400	0,008000	0,44721	0,58480	5,00000	0,6283	0,03142	0,20
0,19	0,0361	0,006859	0,43589	0,57489	5,26316	0,5969	0,02835	0,19
0,18	0,0324	0,005832	0,42426	0,56462	5,55556	0,5655	0,02545	0,18
0,17	0,0289	0,004913	0,41231	0,55397	5,88235	0,5341	0,02270	0,17
0,16	0,0256	0,004096	0,40000	0,54288	6,25000	0,5026	0,02011	0,16
0,15	0,0225	0,003375	0,38730	0,53133	6,66667	0,4712	0,01767	0,15
0,14	0,0196	0,002744	0,37417	0,51925	7,14286	0,4398	0,01539	0,14
0,13	0,0169	0,002197	0,36056	0,50658	7,69231	0,4084	0,01327	0,13
0,12	0,0144	0,001728	0,34641	0,49324	8,33333	0,3770	0,01131	0,12
0,11	0,0121	0,001331	0,33166	0,47914	9,09091	0,3456	0,009503	0,11
0,10	0,0100	0,001000	0,31623	0,46416	10,0000	0,3142	0,007854	0,10
0,09	0,0081	0,000729	0,30000	0,44814	11,1111	0,2827	0,006362	0,09
0,08	0,0064	0,000512	0,28284	0,43089	12,5000	0,2513	0,005026	0,08
0,07	0,0049	0,000343	0,26458	0,41213	14,2857	0,2199	0,003848	0,07
0,06	0,0036	0,000216	0,24495	0,39149	16,6667	0,1885	0,002827	0,06
0,05	0,0025	0,000125	0,22361	0,36840	20,0000	0,1571	0,001963	0,05
0,04	0,0016	0,000064	0,20000	0,34200	25,0000	0,1257	0,001257	0,04
0,03	0,0009	0,000027	0,17321	0,31072	33,3333	0,09425	0,0007068	0,03
0,02	0,0004	0,000008	0,14142	0,27144	50,0000	0,06283	0,0003142	0,02
0,01	0,0001	0,000001	0,10000	0,21544	100,000	0,03142	0,0000785	0,01

INDEX ALPHABÉTIQUE

<p>Additions 5 Calcul de l'addition de castine 22 Affinage (scories d') 4 Alfreton (haut fourneau d') 91 Ashland (haut fourneau d') 76 Audincourt (haut fourneau d') 90</p> <p>Barum (haut fourneau de) 83 Baur 35, 85 Beckert 96 Bilan thermique provisoire 45 — définitif 69 Blum, calcul du lit de fusion 26 Boudouard 14 Bunsen 90 Burbach (haut fourneau de) 77</p> <p>Calorifique (pouvoir des gaz) 64 Carbone (consommation de) 49 Carbone (oxyde de) 35 Carbonique (acide) 35 Castine 5 Cendres du coke 6 Cendres des combustibles (quantité de) 22 Chaleurs de fusion 46 — spécifiques 96 — pertes par les gaz 46 — — par les produits fondus 46 — — par l'eau de refroidissement 47 — — par rayonnement 47 Chaleur (équivalents mécaniques) 97 Charbon de bois 6 Charge, teneur en fer 13 — — Si 12 — — Mn 12 — — Ph 13 — — S 13 — (chaleur des matières de la) 70 Coke 6 Combustibles, composition 6 — consommation normale 11 — calcul de la consommation 35</p>	<p>Combustibles (économies de) 35 Creuset 80 Creuzthal 77 Cuivre 13</p> <p>Diagramme triangulaire 16 Differdange 77 Dissociation 38 Donawitz 78 Durée de la descente dans le fourneau 74</p> <p>Eau de refroidissement 48 — (pertes de chaleur) 48 Ebelmen 85 Edgar Thomson (usines) 79 Ehrenwerth 64, 81 Eisenerz (hauts fourneaux) 89 Elisa (hauts fourneaux d') 79 Equivalents mécaniques de la chaleur 97</p> <p>Fer, décomposition du protoxyde 40 — sesquioxyde 39 — de l'oxyde magnétique 40 Fernqvist 88 Fonte (différentes sortes de) 6 Forssjö (haut fourneau de) 86 Fusibilité des laitiers 13 Fusion (chaleurs de) 46</p> <p>Gayley (procédé) 44 Gaz du gueulard, composition 8 — températures 12 — pouvoir calorifique 64 — emploi dans les chaudières 67 Gaz du gueulard, emploi dans les moteurs 67 Glässner 35, 84 Grosseur des minerais 18 Gruner 46 Gueulard (diamètre du) 80 — (poussières du) 8</p> <p>Hammerby (haut fourneau de) 85</p>
--	---

Hasselfors (haut fourneau de)	88	Provisoire (bilan thermique)	45
Haut fourneau, dimensions normales	80	Puddlage (scories de)	4
— hauteur	80	Pyrites (déchets du grillage des)	4
— volume	73	Rayonnement (pertes par)	47
— profil	73	Réductibilité	38
— rendement	72	Réduction (réactions de)	42
Hématites brunes	2	— (équations de)	39
Hématites rouges	3	— (carbone de)	49
Hörde (haut fourneau à)	77	— (chaleurs de)	42, 43
Humidité de l'air	97	Rendement du haut fourneau	72
 		Rendement des machines soufflantes	61
Isède (haut fourneau d')	77	Refroidissement (eau de)	47
 		— (pertes par l'eau de)	47
Jordan	46	Richter	87
 		Rinman	88
Kladno (haut fourneau à)	78	Scheerer	87
Kupelwieser	84	Schöffel	84
Kramatorskaïa (haut fourneau à)	79	Scories d'affinage	4
 		— de puddlage	4
Lackawanna C ^{ie} (haut fourneau de)	79	Silice. Point de fusion	14
Laitiers du haut fourneau	7	— Dissociation	41
— fusibilité	13	Silicates	14
Langberg	87	— degré d'acidité	14
Ledebur	48	Simmersbach	81
Limonite	2	Soufflantes (machines). Calcul de la	
Lit de fusion (calcul du)	10	puissance indiquée	61
— (prix du)	18	Soufflantes. Rendement	61
Lürmann	64, 67	Spathiques (minerais)	1
 		Spécifiques (chaleurs)	96
Magnétique (minerai de fer)	4	Sphérosidérite	2
Manganèse (minerais de)	5	Soufre	13
— (oxyde de)	12	 	
Mathésius	26	Thermique (bilan provisoire)	45
Minerais de fer	1	— (bilan définitif)	69
Minerai de fer houiller	2	Trzinetz (haut fourneau à)	78
Minettes	3	Tunner	87
Mrazek	18	 	
 		Vapeur produite au moyen des gaz	
Osann	52, 57, 60, 74	du gueulard	67
Oxydation	55	Vares (haut fourneau à)	76
 		Vent. Chauffage	67
Pertes de chaleur par l'eau de refroi-		— Humidité	41
dissement	47	— Pression	60
Perte de chaleur par rayonnement	47	— Pertes	60
Perte de vent dans les conduites	60	— Quantités	57
Phosphore	10	— Températures	53
Phosphorique (acide)	13	Volume du haut fourneau	73
Platz	24	Vordernberg (haut fourneau à)	76
Playfair	90	 	
Poids des matériaux de la charge	9	Wedding	46
Portovecchio (haut fourneau à)	76	Witkowitz (haut fourneau à)	78
Poussières du gueulard	8		
Production du haut fourneau	73		

ÈVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC^e
