

ENCYCLOPÉDIE
CHIMIQUE

TOME V

APPLICATIONS DE CHIMIE INORGANIQUE. — 2^e SECTION. — INDUSTRIES CHIMIQUES

2^e partie. — Métallurgie

FONTE ET FER

PARIS — IMPRIMERIE C. MARPON ET E. FLAMMARION
26, RUE RACINE, 26

ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. FREMY

Membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique, directeur du Muséum
Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique

PAR UNE RÉUNION

D'ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DE PROFESSEURS ET D'INDUSTRIELS

ET NOTAMMENT DE

MM. ARSON et **AUDOUIN**, ing. en chef des travaux chim. à la Compagnie parisienne du gaz
H. BECQUEREL, répétiteur à l'École polytechnique; **BERTHELOT**, docteur, membre de l'Institut
BOUILHET, ing. dir. de la maison Christofle; **M. BOUAGEOIS**, répétiteur à l'École polytechnique
BOURGOIN, professeur à l'École de pharm.; **BOUTAN**, ingénieur des Mines
BRESSON, ancien directeur des mines et usines de la Société autrichienne des charbons de fer de l'État
CAMUS, directeur de la Compagnie du gaz; **AD. CARNOT**, directeur des études de l'École des mines;
CHASTAING, pharm. en chef de la Pitié; **CLÈVE**, profess. à l'Université d'Upsal; **CUMENGE**, ingén. en chef des mines
CURIE (J.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Montpellier; **DEBIZE**, ingénieur en chef des manuf. de l'État
DEBRAY, membre de l'Institut; **DEGAUX**, directeur des teintures des manuf. de l'État
DEHÉRAIN, membre de l'Institut, professeur au Muséum
DITTE, professeur à la Faculté des sciences de Caen; **DUBREUIL**, président de la chambre de commerce à Limoges
DUCLAUX, prof. à l'Institut agronom.; **DUPRÉ**, s.-dir. du labor. municipal; **DUQUESNAY**, ing. des manuf. de l'État
EUVÈRE, directeur des forges de Terre-Noire; **DE FOHGRAND**, docteur des sciences; **FUCHS**, ing. en chef des Mines
GAUDIN, ancien élève de l'École polytechnique, prof. de chimie; **GIRARD**, directeur du laboratoire municipal
L. GODEFROY, professeur à l'École libre des hautes-études; **L. GRUNER**, inspecteur général des mines
Ch.-Er. GUIGNET, ancien élève et répétiteur à l'École polytechnique, professeur de chimie
GUNTZ, maître de conf. à la Fac. des sciences de Nancy; **HENRIVAUX**, direc. de la manufact. des glaces de Saint-Gobain
JOANNIS, maître de conférences à la Faculté des sciences de Bordeaux; **JOLY**, maître de conférences à la Sorbonne
JOULIE, pharmacien en chef de l'hospice Dubois; **JUNGFLEISCH**, professeur à l'École de pharmacie
KOLB, administrateur de la Société des manufactures des produits chimiques du Nord
LEIDIE, pharm. en chef de l'hôpital Necker; **LEMOINE**, ing. en ch. des ponts et chaussées, exam. à l'École polytechnique
LODIN, ing. des mines; **MALLARD**, prof. à l'École des mines; **MARGOTTET**, prof. à la Faculté des sciences de Dijon
MARGUERITE, président du conseil d'admin. de la compagnie paris. du gaz
MATHEY, dir. des houillères de Blanz; **MEUNIER (STANISLAS)**, aide-natur. au Muséum; **MOISSAN**, agrégé à l'Éc. de pharm.
MOUTIER, examinateur de sortie à l'École polytechnique
MUNTZ, professeur, directeur des laboratoires à l'Institut agronomique; **NIVOIT**, profess. à l'École des ponts et chaussées
ODENT, anc. élève de l'École polytechnique; **OGER**, dir. du laboratoire de toxicologie à la préfecture de police
PABST, chimiste principal au laboratoire municipal; **PARMENTIER**, profes. à la Faculté des sciences de Montpellier
PÉCHINEY, directeur des usines de produits chim. du midi; **PERAZOZ** fils, directeur de la condition des soies
POMMIER, industriel; **PORTES**, pharm. en chef de l'hôpital de Lourcine; **PRUNIER**, prof. à l'École de pharmacie
RIBAN, directeur du laboratoire de la Sorbonne; **ROSWAG**, ingénieur civil des Mines
ROUSSEAU, s.-dir. du laboratoire de chimie de la Sorbonne; **SABATIER**, prof. à la Faculté des sciences de Toulouse
SARRAU, professeur à l'École polytechnique; **SCHLAGDENHAUFFEN**, prof. à l'École de pharmacie de Nancy
SCHLESING, prof. au Conservatoire des arts et métiers; **SOREL**, anc. ingén. des manuf. de l'État
TERREIL, aide-naturaliste au Muséum; **TERQUEM**, professeur à la Faculté de Lille
URBAIN, répétiteur à l'École centrale des arts et manufactures; **VERNEUIL**, professeur de chimie
VIEILLE, ing. des poudres et salpêtres; **VILLIERS**, agrégé à l'École de pharm.; **VINCENT**, prof. à l'École centrale
VIOLLE, prof. à la Faculté des sciences de Lyon; **WELDON**, membre de la Société royale de Londres, etc.

TOME V

APPLICATIONS DE CHIMIE INORGANIQUE. — 2^e SECTION. — INDUSTRIES CHIMIQUES

2^e partie. — Métallurgie

FRONTE ET FER

Par **M. G. BRESSON**

Ancien directeur des mines et usines de la Société autrichienne des charbons de fer de l'État.

PARIS

V^{VE} CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES CHEMINS DE FER, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES
40, Quai des Augustins, 40

1888

Fonte et Fer

Par M. G. BRESSON.

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

La fonte et le fer forment les deux termes extrêmes de la série des *composés ferreux* qui varient suivant la nature et la proportion des métalloïdes et des métaux associés au fer lui-même, et dont les *acières* occupent le centre. Ces métalloïdes et ces métaux sont principalement le carbone, le silicium, le soufre, le phosphore, le manganèse, le chrome, le tungstène, etc.; mais tandis que dans la fonte ils se rencontrent en proportions assez considérables pour en modifier sensiblement les propriétés, suivant que l'un ou l'autre y prédomine, et représenter jusqu'à 8 ou 10 p. 100 du poids total de ce produit industriel, dans le fer, ces corps associés ont disparu d'une manière assez complète pour que, dans la pratique, on n'ait pas généralement à en tenir compte. Si donc le fer, tel qu'on l'entend dans l'industrie métallurgique, n'est pas le fer chimiquement pur, on peut admettre qu'il ne contient plus que des traces des divers corps simples qui se rencontraient dans la fonte dont il provient. Le carbone seul s'y trouve encore en quantité pouvant atteindre jusqu'à un millième, bien qu'avec cette teneur on soit déjà à la limite entre le fer et les aciers extra-doux.

Sauf de très rares exceptions, les fers ainsi que les aciers, sont obtenus en employant la fonte comme la matière première de leur fabrication. La connaissance des diverses sortes de fontes doit donc précéder celle des fers et des aciers,

Et c'est à cette étude que la plus grande partie de ce volume sera consacrée. Les aciers, eu égard à leur importance toujours croissante, ont été l'objet d'un article spécial de cette *Encyclopédie*. Tout ce qui concerne les propriétés, la fabrication et les emplois du fer se trouvera réuni dans la seconde partie de cet ouvrage, en suivant le même ordre que celui adopté précédemment pour l'acier.

La fonte est obtenue industriellement au moyen de minerais de nature très différente, exploités dans les diverses assises géologiques de l'écorce terrestre, et d'un combustible qui peut être naturel, comme le lignite ou l'anhracite, artificiel, comme le *charbon de bois* ou le *coke*. L'étude de ces matières premières doit être faite avant d'aborder la question de la fabrication, et nous consacrerons un chapitre aux minerais d'une part et de l'autre aux combustibles, qui agissent ici, non seulement pour donner la chaleur nécessaire à la plupart des opérations métallurgiques, mais comme réactifs des combinaisons chimiques qui donnent naissance au produit.

CHAPITRE II

MINERAIS

Classification des minerais. — Minerais riches ou pauvres. — Classification des minerais d'après la nature de la gangue; d'après leur état physique. — Minerais fusibles ou réfractaires; minerais purs ou impurs. — Minerais oxydulés; minerais oxydés anhydres; minerais oxydés hydratés; minerais carbonatés; minerais silicatés. — Exploitation des minerais de fer. — Prix de revient des minerais.

Le fer existe dans presque tous les terrains, mais il n'existe à l'état de minéral industriellement exploitable, que si la teneur de la plus grande masse du terrain soumis à l'exploitation est d'au moins 30 p. 100. On descend quelquefois au-dessous de ce chiffre, mais c'est qu'alors le minéral renferme, à côté du fer, d'autres métaux, tels que le manganèse, le chrome, etc., utiles pour la fabrication de certaines fontes. On peut aussi admettre au traitement des minerais ayant une teneur inférieure à celle indiquée ci-dessus, lorsque la gangue terreuse qui les accompagne peut en outre intervenir utilement dans l'acte de la fusion. C'est ainsi que dans le cas où la grande masse des minerais est à gangue argileuse ou siliceuse, des minerais pauvres mais à gangue calcaire, pourront être utilement employés. L'inverse peut aussi se produire dans certaines exploitations.

Les minerais de fer peuvent être classés de plusieurs manières, suivant le point de vue auquel on se place. C'est ainsi qu'on distingue les minerais *pauvres*, tenant de 20 à 30 p. 100 de fer métallique, les minerais de *richesse moyenne*, dans lesquels cette teneur en fer est comprise entre 30 et 45 p. 100 ; et, enfin les minerais *riches* dans lesquels elle s'élève à 45 p. 100 et plus. La richesse théorique de l'oxyde de fer magnétique pur, le plus riche de tous les minerais, est de 72,41 p. 100. On trouve dans la nature des échantillons assez volumineux renfermant jusqu'à 70 p. 100 de fer, mais ils n'existent jamais en quantité bien considérable.

Classification du minéral d'après la nature de la gangue. — On classe aussi quelquefois les minerais, en tenant compte de la nature de la gangue, en

minerais *argileux*, *alumineux*, *quartzeux*, *calcaires*, etc., mais cette distinction ne saurait être absolue, car la composition des matières terreuses qui se rencontrent en mélange plus ou moins intime avec le minerai, varie pour ainsi dire avec chaque gisement, et, bien plus, varie souvent dans le gisement lui-même ; on devrait alors faire entrer dans la série les minerais *argilo-calcaires*, *argilo-siliceux*, etc... Nous aurons à parler plus loin de mines de fer, exploitées dans la chaîne des Karpathes, en Hongrie, et dont les diverses gangues (amphibole, pyroxène, feldspaths, serpentines, grenats de toute sorte) pourraient constituer les éléments d'un véritable cabinet de minéralogie. Cet exemple montre quelle confusion présenterait l'étude des minerais de fer faite sur des bases semblables.

Classification des minerais d'après leur état physique. — L'aspect extérieur conduit à mettre en regard des *minerais en roche*, qui se présentent en gros fragments souvent très résistants, les *minerais en grains*, et les *minerais menus* qui deviennent quelquefois une véritable poussière transformée par la pluie en boues diversement colorées. Certains minerais résistants lorsqu'ils sortent de la mine se désagrègent au bout d'un certain temps, de sorte que ce caractère n'est point lui-même d'une constance absolue.

Suivant la plus ou moins grande facilité de leur traitement, on sépare les minerais de fer en minerais *fusibles* et *réfractaires*. Se place-t-on enfin au point de vue de la qualité des fontes et des produits dérivés, on distingue les minerais purs des minerais impurs, et on entend alors par impuretés le soufre, l'arsenic, le phosphore ; mais là encore des malentendus peuvent se produire. C'est ainsi que les minerais phosphoreux à gangue calcaire, qui étaient considérés autrefois comme impurs au premier chef, peuvent donner aujourd'hui des aciers de qualité égale à ceux provenant des minerais absolument exempts de ce métal-loïde. Aujourd'hui la valeur de ces produits dépend bien plutôt du traitement métallurgique soigneusement étudié et appliqué, que de la nature des matières premières de la fabrication.

Nous classerons donc, comme on l'a fait jusqu'à présent, les minerais d'après les caractères essentiels de leur composition chimique ; on obtient ainsi cinq grandes catégories : 1° les fers oxydulés ; 2° les fers oxydés anhydres ; 3° les fers oxydés hydratés ; 4° les fers oxydés carbonatés ; 5° les fers oxydés silicatés.

1° FERS OXYDULÉS

Le fer oxydulé pur (Fe^3O^4) contient 72,41 p. 100 de fer et peut être considéré comme un mélange à équivalents égaux de protoxyde et de sesquioxyde (FeO , Fe^2O^3). Il cristallise en octaèdres réguliers, mais se rencontre le plus souvent amorphe et mélangé de peroxyde de fer dans diverses proportions. Sa couleur présente de grandes variations. Tantôt on le trouve en masse compacte allant du gris au noir avec des nuances tirant sur le vert ; tantôt c'est la couleur brune qui domine depuis le brun clair jusqu'au brun le plus foncé.

On conçoit, d'après cela, que la détermination exacte du fer oxydulé ne soit point toujours facile à obtenir, lorsque la cristallisation en octaèdres fait défaut. L'action sur l'aiguille aimantée donne une indication d'une exactitude incontestable, mais qui cesse d'être sensible lorsque ce minéral, qui prend aussi à cause de cette propriété, le nom de *fer magnétique* se trouve, mélangé en trop forte proportion avec des gangues ou des minerais d'autre composition. La couleur de la poussière, presque toujours brune, même lorsque le minéral en roche affecte une autre coloration, est aussi un bon moyen de constatation; mais lorsque le peroxyde domine dans le mélange, la poussière tire sur le rouge et cesse de donner des indications précises.

Les minerais oxydulés sont presque toujours des minerais à la fois riches et purs. Leur gangue est le plus souvent quartzreuse, mais on les trouve aussi quelquefois associés à des roches polybasiques de composition variée et affectant la forme de minéraux à formule définie. Les gisements de Suède et de Hongrie présentent à cet égard un intérêt particulier.

Les fers oxydulés sont, nous l'avons dit, des minerais purs; ils sont cependant le plus souvent accompagnés de pyrites de fer et quelquefois aussi de pyrites de cuivre, répandues dans la masse en petits cristaux et en petites plaquettes facilement reconnaissables à la couleur jaune caractéristique de ces minéraux. On les élimine autant que possible par un triage à la main et, lorsqu'elles n'existent pas en quantité considérable, le traitement métallurgique permet de neutraliser leur action. Le phosphore se rencontre aussi au moins à l'état de traces, dans la plupart des fers oxydulés, et sa présence est d'autant plus nuisible qu'il n'existe pas en quantité assez considérable pour qu'on puisse le faire disparaître en employant dans la transformation de la fonte en fer ou en acier, le traitement spécial qui a pris le nom de déphosphoration.

Les oxydes de manganèse se trouvent souvent associés aux fers oxydulés où leur présence compense, comme on le verra plus loin, celle du soufre et du phosphore. Le fer titané est aussi fréquemment mélangé à ces minerais sans nuire à leurs qualités ordinaires.

Une description des divers gisements de fer oxydulé nous entraînerait trop loin; nous nous bornerons à passer rapidement en revue les exploitations les plus renommées soit par la qualité, soit par l'abondance des minerais qui s'y rencontrent.

C'est ainsi qu'il convient de citer en première ligne le puissant gisement algérien de Mokta-el-Hadid, près de Bône dans le département de Constantine. Comme le montrent les analyses réunies ci-dessous, le poids total de la gangue atteint à peine quelques unités et le manganèse s'y rencontre en notables proportions. La teneur en fer métallique qui descend rarement au-dessous de 60 p. 100, permet à ces minerais de supporter de longs transports, et l'Algérie a envoyé en France, en Belgique, en Angleterre et même en Allemagne, bien des millions de tonnes de minéral de Mokta. Dans ces dernières années les puissants gîtes de Bilbao, dont il sera bientôt question et surtout l'énorme formation sédimentaire de la Moselle et du Luxembourg a diminué l'importance des exportations algériennes.

La Suède était, bien avant l'Algérie, la terre classique des minerais magnétiques. Les formations les plus connues sont celles de Dannemora et d'Arendal. Les roches encaissantes y sont, comme presque toujours en pareil cas, des schistes cristallins, recoupés par des séries d'éruptions de roches métallifères composées de grenats, de pyroxène et de calcite. Le minerai se distingue par son fort pouvoir magnétique, et une excessive pureté qui a fait pendant longtemps la réputation des produits métallurgiques suédois.

Nous citerons comme troisième exemple de minerais de fer oxydulés, le gisement de Morawitza, dans le comitat de Temesvar en Hongrie, qui alimente exclusivement les usines de la Société autrichienne-hongroise des chemins de fer de l'État. L'analogie de ces amas irréguliers, intercalés au contact de la syénite et du calcaire métamorphique avec ceux que l'on rencontre en Suède, est frappante, et elle se manifeste par la haute teneur en fer, la pureté du minerai et la variété des gangues polybasiques. Ces propriétés donnaient à ces minerais une haute valeur jusqu'au moment où les nouveaux procédés de déphosphoration ont diminué l'importance des minerais en roche de formation ancienne qui jusqu'alors étaient seuls appropriés à la fabrication de l'acier et parmi lesquels les minerais magnétiques étaient particulièrement recherchés.

Chacun sait le grand développement qu'a pris dans ces dernières années la métallurgie du fer et de l'acier en Amérique. Les minerais oxydulés du lac Supérieur et de l'Iron-Mountain y ont contribué pour une large part. On en trouvera également l'analyse ci-dessous :

Composition des divers minerais oxydulés.

	ALGÉRIE			SUÈDE		HONGRIE		AMÉRIQUE	
	1	2	3	1	2	1	2	1	2
Peroxyde de fer.	81.16	78.14	»	53.93	»	66.60	55.27	»	»
Protoxyde de fer.	11.06	3.73	»	12.21	»	9.00	12.64	»	»
Fer oxydulé.	»	»	»	»	88.90	»	»	»	»
Fer métallique.	»	»	61.00	»	»	»	»	65.94	66.04
Protoxyde de manganèse	»	»	»	»	3.06	»	»	»	»
Oxyde rouge de manganèse	»	»	»	»	»	1.80	3.16	»	»
Manganèse métallique.	1.67	4.53	1.26	2.55	»	»	»	0.48	0.12
Silice.	2.50	6.00	6.50	9.00	5.31	6.40	19.10	5.13	4.75
Alumine.	0.60	0.09	2.20	3.50	0.58	3.70	4.48	0.83	0.08
Chaux.	traces.	0.40	0.70	10.00	0.98	1.15	1.40	0.92	0.04
Magnésic.	»	»	»	4.40	1.16	0.40	1.04	0.77	»
Baryte.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Soufre.	»	»	traces	0.01	0.05	traces	0.02	0.30	»
Phosphorc.	traces	»	0.04	»	»	traces	0.03	0.11	0.16
Cuivre.	0.20	traces	traces	»	»	traces	0.07	»	»

2^e FERS OXYDÉS ANHYDRES

Les fers oxydés anhydres sont caractérisés par la présence unique du peroxyde de fer ; leur teneur théorique en fer métallique serait donc de 70 p. 100. Leurs variétés sont le fer oligiste, l'hématite rouge et le fer oxydé rouge.

Fer oligiste. — Ce minerai est caractérisé par sa structure cristalline : on le nomme aussi fer spéculaire à cause des facettes grises brillantes qu'il présente et qui ont la propriété de renvoyer la lumière. Il est souvent associé au fer oxydulé, et ses gangues sont généralement la silice et les silicates terreux. Ses gisements sont peu nombreux, et le seul qui se rencontre en France avec un certain développement est celui de Servans, dans la Haute-Saône, où la présence de la baryte sulfatée dans la gangue, rend le minerai à peu près inutilisable. Le gîte de beaucoup le plus connu est celui de l'île d'Elbe, dont les produits sont utilisés par les établissements construits récemment en Italie, et par quelques hauts fourneaux du sud de la France.

Hématite rouge. — L'hématite rouge se présente sous forme d'une masse rougeâtre, passant quelquefois au gris violacé et affectant volontiers la structure fibreuse ou concrétionnée. Elle existe en amas puissants dans les terrains anciens, et présente pour la métallurgie un intérêt considérable.

Le plus important des gisements, actuellement exploités, est celui de Bilbao, sur la côte nord de l'Espagne. Outre les aciéries qui se sont installées depuis peu à proximité des exploitations, ces minerais alimentent toutes les grandes usines du littoral ouest et nord français, ainsi qu'un grand nombre d'établissements allemands et belges. Comme le montrent les analyses, ces minerais peuvent en effet lutter pour la richesse et la pureté avec les fers oxydulés mentionnés au paragraphe précédent.

L'Angleterre dans le Cumberland, l'Allemagne dans la province de Nassau la Hongrie dans les montagnes des Karpathes, possèdent des gisements d'hématite rouge donnant lieu à des exploitations actives. Nous citerons, dans ce dernier pays, le gîte jusqu'à présent peu connu de Gyalar, près de la ville de Vajda-Hunyad, en Transylvanie. L'affleurement s'y présente avec une puissance d'au moins 100 mètres et y forme comme une véritable montagne permettant une exploitation à ciel ouvert dans les meilleures conditions. Le minerai possède une teneur de 40 à 50 p. 100 et est toujours accompagné de manganèse, dont la proportion sur certains points s'élève jusqu'à 8 p. 100. On estime à plus de 60 millions de tonnes, la contenance de ce gisement qui n'est jusqu'à présent exploité que par quelques petits hauts fourneaux au bois de la région reculée où il se rencontre.

Fer oxydé rouge. — Ce minerai diffère peu de l'hématite, et on fait rentrer dans cette classe tous les peroxydes anhydres qui ne présentent pas nettement

les caractères des deux espèces étudiées ci-dessus. On le trouve tantôt en morceaux durs agathisés ou feuilletés, tantôt associé à l'argile, tendre, onctueux au toucher ou pulvérulent. Il existe en couche puissante à la Voulte et à Privas dans l'Ardèche, intercalé dans les terrains secondaires. La gangue est généralement quartzreuse, mais parfois calcaire. Il est souvent accompagné de fossiles, et par suite phosphoreux. Aussi sa valeur métallurgique est-elle moindre que celle du fer oligiste et de l'hématite rouge véritable.

Composition des divers minerais peroxydés anhydres.

	ANGLETERRE		ALLEMAGNE		FRANCE		ESPA- GNE	ITALIE
	CUMBER- LAND	LAN- CASHIRE	HARTZ	NASSAU	LA VOULTE	PRIVAS	BILBAO	Ile d'Elbe
Peroxyde de fer	90.53	94.23	80.45	66.58	80.79	68.60	78.03	82.57
Protoxyde de fer	"	"	"	"	"	"	"	2.83
Fer métallique	"	"	"	"	"	"	"	"
Protoxyde de manganèse	0.10	0.23	"	"	"	"	0.85	"
Manganèse métallique	"	"	"	"	"	"	"	"
Silice	7.05	4.90	16.74	11.49	8.75	18.20	5.91	7.50
Alumine	1.43	0.63	0.97	9.78	6.39	3.51	0.21	1.20
Chaux	0.71	0.05	"	8.30	1.75	4.22	3.61	"
Magnésic	0.06	"	"	1.75	traces	"	1.65	0.09
Baryte	"	"	"	"	"	"	"	"
Soufre	traces	0.05	"	traces	non dosé	non dosé	traces	0.13
Phosphore	"	"	0.21	0.43	non dosé	non dosé	0.02	0.01
Cuivre	"	"	"	"	"	"	"	"

3° FERS OXYDÉS HYDRATÉS

La formule chimique de ces minerais est, prise dans son sens le plus général, $\text{Fe}^2\text{O}^3, \text{H}_2\text{O}$, correspondant à une teneur de 11 p. 100 d'eau. La gangue n'étant plus siliceuse, comme c'est presque toujours le cas dans les formations précédentes, mais plutôt argileuse et argilo-calcaire, renferme aussi de l'eau en combinaison, de sorte qu'il n'est pas rare de rencontrer ces minerais avec une teneur en eau de 15 p. 100 et au-delà. Cette eau diminue naturellement la richesse. Avec ce nouveau chapitre, nous abordons donc la famille des minerais de teneur moyenne et des minerais pauvres.

Ces nouveaux caractères de composition chimique correspondent du reste aux circonstances géologiques de formation de ces minerais. Tandis que les précédents se rencontraient pour la plupart dans des terrains éruptifs ou de transition, ceux qui nous restent à étudier se présentent presque partout dans des terrains sédimentaires, soit qu'ils résultent de la décomposition des carbo-

nates ou des sulfures, soit qu'ils se soient produits par l'action de l'eau et de l'acide carbonique sur le peroxyde anhydre. Pour la même cause, tandis que les minerais anhydres sont le plus souvent compacts et par suite d'une réduction difficile, exigent même quelquefois avant leur traitement au haut fourneau, une opération préalable désignée par le nom de grillage, les minerais hydratés sont ordinairement friables, et facilement accessibles aux gaz réducteurs, ce qui compense dans une certaine mesure, leur moindre teneur en fer.

On distingue dans les minerais en grains de nombreuses variétés ; nous étudierons spécialement celles qui portent les noms d'hématites brunes, fers hydratés en roche, minerais en grains, minerais oolithiques hydratés.

Hématites brunes. — L'hématite brune existe en filons et en amas dans les terrains anciens et les terrains secondaires, sous forme de concrétions mamelonnées à cassure cireuse et fibreuse. Sa couleur est brun foncé, tirant quelquefois sur le noir, surtout lorsqu'elle renferme du manganèse, et sa poussière est toujours brune, tandis que celle de l'hématite rouge présente toujours une couleur plus claire et plus vive qui permet précisément de distinguer ces deux sortes de minerais.

La porosité, la présence fréquente du manganèse, font de l'hématite brune un excellent minerai. On l'exploite en France, dans les Pyrénées, où elle est très répandue et forme le gîte bien connu de Rancié, elle se rencontre aussi dans le département de la Dordogne et dans ceux qui l'avoisinent.

On désigne quelquefois, sous le nom de *mines douces*, des hématites brunes dont le traitement est exceptionnellement facile. Elles résultent de la décomposition de minerais carbonatés dont l'acide carbonique s'est dégagé, et le protoxyde transformé en peroxyde. En général, les parties profondes des filons d'hématites finissent par des masses de fer carbonaté ; aussi verrons-nous souvent le minerai dont nous nous occupons actuellement, associé aux célèbres gisements de fers carbonatés dont nous aurons à parler plus bas.

Fer hydraté en roche. — Ces minerais remplissent des cavités parfois très vastes au contact de deux terrains différents ou dans le calcaire jurassique ; ils présentent une gangue sableuse ou terreuse agglomérée par un ciment d'hématite brune. Ils passent facilement aux ocres et prennent alors une couleur jaune clair. Il n'est pas rare d'y rencontrer le sulfate de baryte et diverses combinaisons du soufre et du phosphore avec le fer. Aussi les gisements qui existent en différents pays ont-ils été négligés depuis que l'exploitation des minerais à teneur si régulière de Mokta et de Bilbao a permis de les transporter au loin.

Quelquefois les minerais hydratés en roche se rencontrent à la surface du sol avec une structure cloisonnée, et ils prennent alors le nom de *limonite*. Ils renferment beaucoup de débris animaux et sont par conséquent très phosphoreux. On les recherche lorsqu'on veut avoir une fonte très fluide et destinée à être moulée en objets d'ornement, mais les gisements présentant quelque importance sont rares et ne comptent plus guère aujourd'hui.

Minerais en grains ou pisiformes. — Ces minerais se présentent sous forme de petits grains arrondis de dimensions variables. On les avait d'abord assimilés

à de petits galets et désignés sous le nom de minerais d'alluvions, mais on a reconnu qu'ils existaient aussi dans les terrains tertiaires, et même à leur base. Ils paraissent s'être formés par dépôt d'oxyde de fer, dans une eau agitée, sous forme d'enveloppes concentriques entourant un grain de sable ou de terre, parfois même un noyau d'oxyde de fer. La grosseur des grains varie de 1 à 15 millimètres et ils sont généralement mêlés de marne ou d'argile dont on les débarrasse par un lavage au patouillet, précédé d'un bocardage quand la gangue est difficilement délayable. Si cette gangue consistante est elle-même assez riche en fer pour que sa teneur jointe à celle des grains qu'elle renferme permette le traitement du minerai en roche tel qu'il sort du gisement, on se dispense du lavage et on épargne la dépense et le déchet qu'il cause toujours. La teneur de la gangue dépasse rarement 15 p. 100; au contraire, la teneur des grains isolés peut dépasser 42 p. 100 et varie ordinairement entre 35 et 40.

Lorsque la gangue est très aluminieuse, elle est d'une fusion difficile; aussi convient-il, dans ce cas, de recourir à la préparation mécanique et au lavage, même lorsque la teneur en fer est assez élevée. Les grains eux-mêmes sont du reste réfractaires, et leur emploi tend à se restreindre de plus en plus.

Lorsque les grains présentent la forme d'œufs de poisson, on leur donne le nom de *pisolithiques* ou *pisiformes*; lorsqu'ils sont plus petits encore et imitent la graine de certaines plantes (millet, pavot), ils reçoivent l'épithète de *milliolithiques*. Ces différences de forme ont d'ailleurs peu d'influence sur la composition chimique du minerai.

Les minerais en grains se rencontrent surtout dans le centre de la France (départements du Cher, de l'Indre, de la Nièvre, de la Vienne); ils ont été autrefois, sous le nom de *minerais du Berry*, le siège d'exploitations assez importantes. On les trouve également en Franche-Comté à la base de l'oolithe, dans les *mares oxfordiennes* du terrain jurassique; on les exploite encore dans les formations analogues de la Champagne et de la Meuse, où ils alimentaient autrefois un grand nombre de petits hauts fourneaux au bois.

L'importance des minerais en grains s'efface chaque jour devant le grand développement qu'a pris l'exploitation des minerais oolithiques de la Moselle et du Luxembourg, dont les dépôts ont en outre l'avantage de se trouver à proximité des plus riches bassins houillers du continent.

Minerais oolithiques. — Ces minerais se rencontrent dans les même assises géologiques que les précédents, mais ils jouissent de l'heureuse propriété de se trouver dans une gangue calcaire faiblement ferrugineuse, il est vrai, mais qui joue le rôle de fondant au haut fourneau. Le lavage n'est donc ici jamais nécessaire, et si la teneur du minerai descend quelquefois jusqu'à 30 p. 100, celle du lit de fusion, c'est-à-dire du mélange de minerai et du fondant additionnel, est à peu près la même, puisque le fondant n'intervient pour ainsi dire pas. De plus, le calcaire se trouvant ici intimement mêlé au fer, les minerais oolithiques sont d'une grande fusibilité, ce qui augmente notablement leur valeur industrielle.

C'est sur le lias, à la base de l'oolithe et entre deux épaisses assises de marne, qu'existent les puissantes couches de minerai qui, partant de Toul et de Frouard, se continuent par Metz et Longwy, dans la Lorraine allemande, le grand

duché du Luxembourg, et viennent mourir en Belgique. Quatre États sont, comme on le voit, intéressés à l'exploitation de cet énorme gisement, et, en ce qui concerne la France, un seul mot suffira à rendre compte de son importance. Dans la production totale de la fonte en 1884, s'élevant pour la France entière à 4,871,537 tonnes, le département de Meurthe-et-Moselle entrainait à lui seul pour 747,302 tonnes, soit près de 40 p. 100, et cette prépondérance tend à s'accroître chaque jour. Comme nous l'avons dit dans l'article consacré aux aciers, depuis le succès incontesté de la déphosphoration, la production des aciers bruts tend à suivre la même marche ascendante.

Le congrès de la *Société de l'industrie minière* qui s'est tenu en septembre 1887, dans le département de Meurthe-et-Moselle, a permis de recueillir sur l'état actuel des exploitations de ce département des renseignements nouveaux intéressants. Les mines peuvent se subdiviser actuellement en trois groupes, ayant pour centre Nancy, Briey et Longwy.

Le premier groupe comprend 47 concessions d'une superficie totale de 15,375 hectares qui, en 1886, ont produit 771,492 tonnes de minerai.

Le second groupe comprend 14 concessions d'une étendue de 11,747 hectares ; enfin le groupe de Longwy compte 15 concessions d'une superficie de 8,077 hectares, ayant fourni, en 1886, une quantité de 682,472 tonnes. De plus, de nombreuses minières, toutes situées dans la région de Longwy, ont donné, en 1886, un contingent de 235,018 tonnes. En réunissant ces divers chiffres, on arrive au total de 3,689,982 tonnes, dont l'exploitation occupe une population de plus de 2,000 ouvriers. C'est, comme minerai de fer, plus des deux tiers de la production française.

La formation métallifère plonge d'une manière générale, de l'est à l'ouest, avec une inclinaison de 1 à 3 p. 100, mais de nombreuses failles ont déterminé des rejets dont le plus important accuse une différence de niveau de 60 mètres. L'épaisseur maxima de la formation (28 mètres), se trouve à Hussigny, à l'altitude de 362 mètres, et l'épaisseur décroît en même temps que l'altitude diminue ; elle est de 19 mètres à Algrange à la cote de 234 mètres, de 16 mètres à Moyeuve à la cote de 180 mètres et elle n'est plus que de 6 mètres à Flavigny, qui n'est plus qu'à 115 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Une communication faite par M. Simon, ingénieur en chef de l'exploitation de la mine d'Hussigny, établit qu'en ce point, l'épaisseur des couches utilisables au nombre de cinq, atteint 16^m,20, savoir :

I. Première couche de calcaire ferrugineux.	1 ^m ,90
II. Deuxième couche de calcaire ferrugineux.	2 50
III. Couche de minerai rouge.	3 50
IV. Couche de minerai gris.	4 »
V. Couche noire	2 50
Total.	16 ^m ,40

La couche rouge est la plus riche, et c'est là que les exploitations sont les plus actives. L'ensemble réunit 28 mètres de formation ferrugineuse, y compris les bancs stériles intercalés.

Minerais hydratés divers. — Nous réunirons sous cette détermination tous les minerais de qualité en général inférieure, désignés sous le nom de minerais terreux, de minerais résineux, ocres jaunes et rouges, etc. On les exploite souvent au voisinage de mines de pyrites intactes ou en décomposition, dans diverses régions du sud de la France. Il est aisé de comprendre que le soufre doit s'y rencontrer en proportions toujours assez considérables, et que de plus ils peuvent contenir tous les métaux et métalloïdes des pyrites de fer parmi lesquels le zinc et l'arsenic sont dominants ; ces minerais réclament donc l'adjonction des minerais d'Afrique, d'Espagne et des Pyrénées pour donner de bons produits et surtout pour la production des fontes destinées à la fabrication de l'acier.

Il convient de mentionner également ici un minerai gris verdâtre, dans lequel on distingue de petits grains oolithiques, mais où l'eau est remplacée par l'acide carbonique et la silice ; il forme donc en quelque sorte la transition entre les minerais hydratés et les minerais carbonatés, dont nous allons maintenant nous occuper. On le rencontre principalement dans le Valais, et il n'a aucune importance au point de vue industriel.

Composition de divers minerais pyroxydés hydratés.

	HÉMATITE BRUNE	MINERAIS EN GRAINS			MINERAIS OOLITHIQUES			MINERAIS TERREUX
	LOT- ET-GARONNE	CHER	FRANCHE- COMTÉ	HAUTE- MARNE	LUXEMBOURG	MEURTHE ET-MOSELLE	MEURTHE- ET-MOSELLE	GARD
Peroxyde de fer	74.00	»	70.00	52.09	51.07	55.70	39.02	57.10
Protoxyde de fer	0.10	»	»	»	»	»	»	»
Fer métallique	»	41.08	»	»	»	»	»	»
Oxyde de manganèse	»	»	traces	1.06	0.67	»	»	»
Manganèse métallique	»	»	»	»	»	»	»	0.90
Silice	14.40	11.95	10.05	16.00	6.85	9.05	6.25	11.75
Alumine	4.40	4.45	6.00	8.00	4.61	6.80	2.95	3.75
Chaux	»	2.55	0.50	6.80	14.57	8.70	25.63	7.76
Magnésic	traces	»	»	»	0.35	0.41	0.32	»
Baryte	»	»	»	»	»	»	»	»
Soufre	traces	traces	»	0.01	traces	traces	traces	0.10
Acide phosphorique	6.32	traces	traces	0.70	1.68	1.80	1.25	0.07
Cuivre	»	»	»	»	»	»	»	0.13
Zinc	»	»	»	»	»	»	»	0.51
Plomb	»	»	»	»	»	»	»	0.04

MINERAIS CARBONATÉS

Ces minerais forment une grande famille, dans la composition de laquelle l'acide carbonique intervient. La composition théorique du composé (FeO, Co^2) correspond à 62 p. 100 de protoxyde de fer, et 38 p. 100 d'acide carbonique, mais ici, comme dans toutes les formations métallifères déjà décrites, la gangue accompagnant le minéral se rencontre toujours avec une composition et dans des proportions variables. La quantité d'acide carbonique renfermée dans le minerai n'est donc pas plus constante que la teneur en fer lui-même.

Les fers carbonatés se divisent à leur tour en trois grandes classes différant notablement par leur âge géologique et leurs propriétés. Ce sont : 1° les fers spathiques ; 2° les fers carbonatés des houillères ; 3° les fers carbonatés oolithiques.

Fer carbonaté spathique. — Ce minéral cristallise en grandes lames dérivant du rhomboèdre à angle de 107 degrés, avec trois clivages faciles parallèlement à la base et aux faces du prisme. Tandis que tous les minerais que nous avons précédemment étudiés présentent des couleurs très variables, mais généralement foncées, le fer spathique est d'une couleur blanche tirant sur le jaune clair, ou le blond quand il n'a pas été altéré, mais il passe facilement à l'air au brun plus ou moins foncé.

Le compagnon ordinaire du fer spathique est le manganèse, se présentant également à l'état de carbonate de protoxyde de manganèse. Le phosphore n'y existe qu'à l'état de traces ; par contre, les pyrites de cuivre et de fer s'y trouvent disséminées comme dans le minerai magnétique, et elles occasionnent ici les mêmes inconvénients.

La gangue est quelquefois siliceuse, mais le plus souvent calcaire ; le carbonate de magnésie se rencontre aussi fréquemment associé au carbonate de chaux. Dans ce dernier cas la fusibilité du minerai se trouve encore augmentée.

Le fer spathique constitue en somme un excellent minerai et abondamment répandu. Le plus beau gisement que nous connaissions est celui d'Eisenerz, près de Léoben en Styrie. Le minerai y forme une véritable montagne qui alimente depuis plusieurs centaines d'années les hauts fourneaux de Styrie, et leur fournit des minerais dont la teneur après grillage est d'environ 50 p. 100 et qui, eu égard à leur gangue calcaire et magnésienne, se présentent dans les conditions favorables de réductibilité dont nous parlions tout à l'heure. Ils fournissaient récemment encore un contingent important aux hauts fourneaux de la Silésie et de la Bohême, marchant en fonte pour acier. La déphosphoration ainsi que le développement pris par les exploitations de fer magnétique et d'hématite dont nous avons eu l'occasion de signaler l'existence dans les Karpathes, ont déjà diminué l'importance de ce célèbre gisement.

Le fer spathique se rencontre également en abondance soit en amas, soit en filons, en Westphalie et dans le Nassau. Il y est fréquemment associé à l'hématite brune, mais toujours riche en manganèse. Cette région est devenue par suite

le centre de la fabrication des fontes manganésées dont on connaît l'importance pour la métallurgie de l'acier.

En France, le fer spathique forme le gîte justement réputé d'Allevard, dans les Alpes, et il se rencontre également associé aux hématites brunes dans divers gisements de la région sud de notre pays. Ce minerai se trouve surtout dans les régions montagneuses et la grande chaîne des Alpes avec ses diverses ramifications en est en Europe le principal réceptacle.

Minerais carbonatés des houillères. — Le vieux terrain houiller aussi bien que les formations carbonifères plus récentes qui se rencontrent surtout dans le lias présentent fréquemment au toit des couches de houille des assises de schistes ou d'argiles bitumineuses renfermant elles-mêmes du minerai.

Ce minerai se présente le plus souvent en rognons dont la couleur varie du gris au noir, suivant la proportion de matières bitumineuses ou charbonneuses dont il est pénétré.

C'est cette forme et sa densité qui permettent de le distinguer de la gangue à laquelle il est associé. Exempt par son mode de formation, même des métaux nuisibles que nous avons souvent rencontrés précédemment, il présente l'inconvénient de renfermer du phosphore en proportion trop considérable pour donner de bons produits par le traitement acide, sans pourtant en contenir assez pour permettre avec succès l'emploi de la déphosphoration. De plus, il ne renferme pas de manganèse, cet utile auxiliaire de la métallurgie du fer. L'avantage des minerais des houillères, c'est, comme leur nom même l'indique, de se trouver toujours réunis sur le même point que le combustible, et c'est là ce qui permet de maintenir certaines exploitations qui, sans cette coïncidence, devraient être abandonnées.

Le minerai des houillères se rencontre principalement en Angleterre dans le pays de Galles, le Staffordshire et l'Écosse. Il a reçu dans ces diverses régions le nom de blackband, et c'est également ainsi qu'on le désigne en Allemagne, où on le trouve surtout dans les grands bassins de Silésie et de Westphalie. En Autriche-Hongrie ce minerai est peu répandu. Il convient cependant de citer sa présence au-dessus des couches de houille du lias à Steierdorf dans le Banat. En France il ne donne lieu à aucune exploitation sérieuse.

Quelle que soit sa provenance, le blackband doit toujours, avant le traitement au haut fourneau, être soumis à un grillage qui expulse l'acide carbonique et les matières bitumineuses dont il est imprégné. Après le grillage qui enrichit sa teneur jusqu'à 50 p. 100, il présente une couleur rouge brique qui permet de le reconnaître facilement.

Minerais carbonatés argileux du lias. — Le plus important des gisements de fer carbonatés du lias est celui du Cleveland, dans le Yorkshire. La principale couche, qui y est d'une grande étendue et d'une grande régularité, atteint 6 mètres d'épaisseur et est divisée par strates schisteuses à grains oolithiques. Comme dans la formation oolithique de la Moselle, à laquelle le gisement du Cleveland est comparable, sauf la présence de l'acide carbonique, le minerai contient beaucoup de fossiles et par suite d'acide phosphorique. Par contre les métaux nuisibles y sont inconnus.

Composition de divers minerais carbonatés.

	ALGÉRIE	FRANCE	ANGLETERRE		HONGRIE	ANGLE- TERRE
	EISENENZ	ALLÉVARD	YORKSHIRE	DERBYSHIRE	STEIROURF (Après grillage)	CLEYELAND (Après grillage)
Protoxyde de fer	27.91	50.50	41.77	40.01	39.92	43.35
Sesquioxyde de fer.	19.49	"	2.39	2.50	3.60	1.20
Protoxyde de manganèse.	2.38	8.00	1.13	1.26	0.95	"
Acide carbonique et eau	30.26	38.40	31.39	29.72	"	"
Silice	6.50	1.00	8.93	11.19	8.62	7.65
Alumine	1.22	"	4.79	5.91	7.96	9.88
Chaux.	10.48	1.70	2.55	2.78	7.44	0.58
Magnésie	2.61	0.70	3.85	3.05	3.82	5.35
Baryte.	"	"	"	"	"	"
Potasse	"	"	"	"	0.27	"
Soufre	"	"	"	"	0.08	0.09
Acide phosphorique.	"	"	0.75	"	1.86	3.87
Cuivre.	fortes traces	"	"	"	"	"

FERS OXYDÉS SILICATÉS

Ces minerais sont de beaucoup les moins répandus et les moins avantageux pour le traitement au haut fourneau. Ils fondent en effet facilement avant d'être complètement réduits ce qui, comme on le verra en étudiant la marche du haut fourneau, ne peut se faire qu'avec un excédent de dépense du combustible. Mais si à l'état naturel, ils n'ont qu'une minime importance, les opérations métallurgiques produisent un composé ferreux qui peut être utilisé avantageusement pour la fabrication de la fonte. Ce sont les *scories de forge* qu'on distingue en scories de puddlage et scories de réchauffage. La fabrication de l'acier donne aussi comme produits accessoires des scories de convertisseur Bessemer et de four Martin, mais dans ces dernières, c'est moins la teneur en fer que la teneur en manganèse et en phosphore qui permet leur utilisation. Nous avons indiqué, dans le volume consacré aux aciers, le rôle que les scories basiques du procédé Thomas et Gilchrist jouent dans l'agriculture comme engrais, et depuis le moment où ces lignes étaient écrites, leur importance à cet égard n'a fait que se développer.

Il convient de rapprocher des scories de forge les *pyrites grillées* obtenues comme résidu dans la fabrication de l'acide sulfurique. Par suite d'une construction de plus en plus rationnelle des fours de grillage, on a réussi à ne laisser dans la pyrite grillée que des quantités de soufre assez faibles pour ne point

faire obstacle au traitement dans le haut fourneau de l'oxyde de fer riche et pur qui provient de sa transformation. Les fabriques de produits chimiques de la Société de Saint-Gobain livrent ainsi aux usines du bassin de la Loire, une matière première qui supplée dans une certaine mesure à l'insuffisance des minerais dans cette région.

Mode d'exploitation des minerais de fer. — Ce que nous avons dit des divers gisements de minerais de fer montre que leur exploitation est en général facile. L'exploitation par puits profonds exigeant de puissants engins mécaniques, forme ici l'exception. On n'a pas à lutter contre des dégagements de gaz dangereux, et l'aérage naturel suffisait toujours dans les nombreuses exploitations que nous avons visitées. L'assèchement se fait aussi le plus souvent en utilisant l'inclinaison naturelle des couches traversées.

Lorsque le minerai forme de véritables montagnes comme celles que nous avons eu plusieurs fois l'occasion de décrire, l'exploitation se fait principalement à ciel ouvert, et par grands gradins. C'est une exploitation qui ressemble bien plus à celle d'une carrière qu'à celle d'une mine. L'art de l'ingénieur consiste en pareil cas à racheter les différences de niveau et à aménager les transports de la manière la plus économique possible.

Les plans inclinés à voie simple ou double, avec ou sans contrepoids, jouent en pareil cas un rôle important. L'exploitation de l'Erzberg de Styrie donne à cet égard des modèles intéressants à consulter.

L'exploitation devant nécessairement commencer par la partie supérieure du gîte, on peut utiliser la pesanteur non seulement pour remonter au niveau des attaques les vases vides qui ont porté le minerai au fond de la vallée, mais encore pour leur faire faire, lorsque les circonstances l'exigent, certains parcours horizontaux en prenant pour modèles les plans inclinés biautomoteurs de la Grand'Combe. Nous avons eu l'occasion d'en faire dans les mines de fer magnétiques de Morawitza, en Hongrie, une intéressante application.

Lorsque le gisement forme des amas irréguliers renfermés dans le flanc d'un coteau suffisamment escarpé, mais entouré d'une couche de morts-terrains assez considérable pour qu'une exploitation en carrière ne soit pas avantageuse, on peut employer la méthode par entonnoir.

On découvre le gîte à sa partie supérieure pendant qu'on pratique à 15 ou 20 mètres au-dessous du premier découvert, une galerie à flanc de coteau allant rejoindre le fond de l'entonnoir qui s'est successivement élargi et approfondi. Cette galerie devient ainsi une galerie de roulage pour toute la partie du gîte qui se trouve au-dessus d'elle. On procède de la même manière en établissant une nouvelle galerie à une distance de la précédente qui varie nécessairement suivant la forme et l'importance du gisement, et ainsi de suite jusqu'au moment où l'exploitation dépassant le fond de la vallée, oblige à recourir uniquement aux travaux souterrains.

Les exploitations faites soit entièrement, soit partiellement à ciel ouvert, ont le grand avantage de permettre un triage facile des minerais de fer, et nous avons vu que ce triage est nécessaire, lorsque des minerais riches et purs d'ailleurs, renferment par exemple des pyrites de fer ou de cuivre disséminées

dans la masse. On peut aussi, de cette manière, bien mieux séparer la gangue et le minerai pauvre du minerai assez riche pour être traité au haut fourneau. La lampe du mineur ne vaut jamais en pareil cas la lumière du soleil, et nous avons vu dans quelques exploitations faire de sérieux sacrifices sur les dépenses de main d'œuvre causées par l'importance des déblais pour continuer à jouir du bénéfice du travail à ciel ouvert.

Lorsque les travaux souterrains doivent être définitivement adoptés, le mode d'exploitation dépend également de la nature du gîte. Si par suite de sa qualité et de sa valeur commerciale, le minerai supporte des frais d'exploitation élevés, on en amène au jour toute la masse, en remblayant, si la sécurité l'exige, les excavations produites. Au contraire, dans les grands gisements qu'on sait pouvoir faire face aux besoins de la consommation, quelque développement qu'elle prenne, pendant des centaines d'années, on se préoccupe avant tout d'une exploitation économique et on se contente d'y tracer un réseau de larges galeries en laissant de nombreux piliers destinés à assurer la stabilité de l'édifice souterrain. Nous nous contentons de donner ces aperçus généraux sans entrer dans des détails qui ne sauraient trouver place ici.

Prix de revient des minerais. — Le prix de revient des minerais de fer varie encore aujourd'hui dans d'assez larges limites ; pour un même gisement, il peut du reste présenter, suivant les circonstances, des variations assez sensibles, suivant qu'une part plus ou moins large est donnée aux travaux de recherche et de préparation du gîte, suivant que la production augmentant ou diminuant, les frais généraux de l'exploitant varient dans le rapport inverse.

Si ce prix de revient est chargé non seulement des frais généraux de l'exploitation, mais encore de tous les frais généraux d'une entreprise ayant un capital disproportionné, il peut présenter des anomalies qui échappent à toute analyse. On ne peut donc en général aborder cette question du prix de revient qu'avec une grande réserve, et cependant il est bon d'en dire quelques mots.

Ceci posé, nous ne croyons pas être loin de la vérité en disant que le prix de revient moyen des minerais de fer, actuellement exploités en Europe (y compris l'Algérie), est sur le carreau de la mine d'environ 4 francs la tonne. Pour un grand nombre de hauts fourneaux, ce prix doit être majoré de frais de transports considérables qui peuvent doubler et tripler la valeur d'exploitation de la matière première. Nous connaissons des usines du centre de la France qui employaient encore dans les dernières années des minerais d'Afrique et d'Espagne dont la tonne leur revenait certainement à 20 francs sinon à 30 francs. Ce sont là des cas spéciaux comme il s'en présente forcément en pareille matière.

Lorsque les minerais sont particulièrement purs, riches, ou faciles à traiter, lorsqu'ils sont associés à des corps utiles, comme le manganèse (minerais spathiques de Styrie, fers magnétiques de Suède, hématites du Nassau, des Alpes ou des Pyrénées), ils supportent des prix de revient certainement bien supérieurs au prix moyen que nous venons d'indiquer. Par contre, les énormes exploitations de la Lorraine et du Luxembourg fournissent des minerais dont le prix de revient varie de 2 fr. 50 à 3 francs la tonne, et peut même dans certaines

circonstances particulièrement favorables, descendre au-dessous de ces chiffres. Comme on le voit le minéral de fer est devenu un produit de mince valeur, et comme nous ayons eu l'occasion de l'indiquer, il existe en Europe nombre de gisements qu'on effleure à peine et qui resteront longtemps, peut-être même toujours inutilisés, par suite du prix de revient trop élevé qui résulterait de leur exploitation.

CHAPITRE III

FONDANTS

Nécessité et rôle des fondants. — Castine; quartz.

Comme le fait remarquer Gruner, à la page 177 de son *Traité général de métallurgie*, il ne suffit pas de fondre les métaux, il faut encore pour les isoler fondre leur gangue, sauf de rares exceptions où l'on arrive au même résultat par volatilisation ou liquation du métal. Pour le fer ce dernier cas ne se présente jamais. Les minerais siliceux étant les plus nombreux, et le silice étant aussi l'élément qui domine dans les cendres du combustible, c'est vers la formation d'un silicate fusible que les efforts du métallurgiste ont dû se diriger. Au point de vue de la consommation du combustible, on devrait même rechercher toujours le maximum de fusibilité; mais il est des cas où la conservation des fourneaux, la pureté du métal ou d'autres motifs réclament plutôt des silicates dont la fusibilité se trouve atténuée, tantôt par un excès de silice, tantôt par un excès de base. La composition du silicate sortant du haut fourneau en même temps que la fonte, et désigné spécialement sous le nom de *laitier*, est donc un des points qui doivent le plus tenir en éveil l'attention de l'ingénieur chargé de la conduite de l'appareil. Il doit la vérifier par de fréquentes analyses, et c'est un des points où les connaissances chimiques interviennent le plus utilement dans la pratique industrielle.

Les propriétés des silicates ont été spécialement étudiées par Selström, Berthier, Plattner, et résumées par Gruner, dans ses *Principes généraux de métallurgie*, auxquels nous empruntons les indications suivantes, principalement applicables à la métallurgie de la fonte et du fer.

1° Les bases fusibles, c'est-à-dire les alcalis, l'oxyde de plomb, etc., forment des silicates d'autant plus fusibles que la base est plus abondante.

2° Les bases infusibles ou peu fusibles donnent au contraire des composés dont la fusibilité sera d'autant plus grande que le mélange se rapprochera davantage d'une sorte de moyenne ne renfermant ni excès de silice, ni excès de base

3° A formule égale, un silicate simple contenant une seule base infusible est toujours moins fusible qu'un silicate double ou multiple renfermant deux ou plusieurs bases. La formation de polysilicates est donc un des buts que l'on doit poursuivre dans la composition des matières chargées au haut fourneau, à moins que des raisons techniques ou économiques ne viennent s'y opposer.

Ce que nous avons dit de la composition des minerais permet de juger, dès à présent, quelles seront dans la métallurgie du fer les fondants le plus souvent employés. Dans la plupart des minerais la silice domine, le fondant additionnel sera dans ce cas le carbonate de chaux, spécialement désigné pour cet usage, sous le nom de *castine*, et que la nature fournit abondamment dans le voisinage de presque toutes les mines de fer. Le carbonate de magnésie se trouve fréquemment associé au carbonate de chaux, et forme une roche qui, sous le nom de *dolomie*, est très répandue dans tout le massif oriental des Alpes. La présence de deux bases différentes devra faire rechercher ce fondant pour obtenir des laitiers fusibles et bien fluides.

Lorsque la gangue du minerai est absolument basique, le fondant devra au contraire être acide, et dans ce cas la silice ou l'argile se recommandent par leur abondance et la modicité de leur prix. Nous les avons vu employés dans quelques hauts fourneaux au bois de Styrie, mais dans les hauts fourneaux au coke leur emploi est vraiment exceptionnel.

Il est bien rare en effet que les minerais à gangue calcaire ne renferment pas en même temps quelques centièmes de silice (les nombreuses analyses que nous avons reproduites en donnent la preuve) et cette silice jointe aux cendres du coke qui sont toujours siliceuses suffisent presque toujours pour fournir au laitier, l'élément acide nécessaire à sa formation.

Ainsi donc le carbonate de chaux et de magnésie d'une part, le sable et l'argile de l'autre, sont les fondants ordinaires des minerais de fer. Quelques minéraux peuvent toutefois dans certains cas être utilement employés. Les roches *sotliques* ou *polassiques* donnent au laitier, comme on le sait une grande fluidité. Le *spath fluor*, soit seul, soit à l'état de gangue, agit dans le même sens que les alcalis, et est quelquefois employé là où ses filons présentent une importance assez grande pour justifier une exploitation.

On peut se demander s'il n'y aurait pas avantage à substituer dans le chargement du haut fourneau la chaux vive à un carbonate. La chaux vive offre des avantages lorsque la calcination du calcaire peut se faire à l'aide de la chaleur perdue de l'un des foyers de l'usine. On économise ainsi les 373 calories qu'exige la décomposition de chaque kilogramme de carbonate de chaux. Mais il faut alors se servir immédiatement de la chaux cuite, sinon elle se transforme en hydrate dont la décomposition est pour le moins aussi difficile que celle du carbonate.

Étant données les vastes dimensions des hauts fourneaux actuels, il y a intérêt à les utiliser eux-mêmes comme four de cuisson de la castine dans la partie supérieure de l'appareil, et on a l'avantage d'épargner ainsi une manutention spéciale.

La composition chimique de la castine doit, non moins que celle des minerais, appeler l'attention du métallurgiste. Les sulfates de chaux et de barytes, les

phosphates de chaux et de magnésie y sont souvent associés, et nous savons déjà que le soufre est toujours un ennemi dans la fabrication de la fonte ; le phosphore cesse de l'être lorsqu'il existe à la fois dans le minerai et la castine en certaines proportions que nous aurons à déterminer plus loin.

Composition de divers fondants.

	CASTINE (I)	CASTINE (II)	QUARTZ
Chaux	91.84	54.33	0.32
Magnésie.	1.85	1.24	»
Alumine	0.70	0.01	1.20
Acide carbonique.	41.60	44.05	»
Acide sulfurique.	traces	»	»
Acide phosphorique	0.10	traces	»
Peroxyde de fer	0.57	»	2.66
Protoxyde de fer.	0.05	0.14	1.10
Silice.	270	0.13	94.75
Bitume.	»	0.03	»

Le prix de revient des fondants est, en général, très peu élevé ; leur mode d'exploitation est des plus simples. Ils n'exigent pas le triage qui augmente souvent les frais de production. On peut admettre qu'ils coûtent rarement aux hauts fourneaux plus de 1 franc la tonne, lorsque la question de transport n'intervient pas.

CHAPITRE IV

COMBUSTIBLES

Charbon de bois. — Anthracite. — Coke. — Fours à coke; leur construction et leur emploi.

Les combustibles utilisés dans la fabrication de la fonte, sont le charbon de bois, le lignite, la houille crue, l'anthracite et le coke. Tous, sauf le coke, ont été étudiés d'une manière très complète, dans le volume de cette *Encyclopédie*, consacré aux combustibles végétaux et minéraux. Nous ne reviendrons pas sur leurs propriétés générales, et nous nous bornerons à indiquer les qualités spéciales qu'ils doivent posséder pour satisfaire aux exigences du traitement métallurgique dans le haut fourneau. La plus grande part de cette étude sera nécessairement consacrée au coke, dont l'emploi est absolument prédominant par rapport aux autres combustibles dont l'usage se trouve de plus en plus limité à certaines régions peu étendues.

1° CHARBON DE BOIS

Le charbon de bois est la seule forme sous laquelle le combustible végétal soit utilisé dans la fabrication de la fonte. On rencontrait peut-être, il y a quelques années encore dans des régions exceptionnellement boisées, un ou deux petits hauts fourneaux marchant en faisant usage de *bois torréfié*, mais il n'y a pas lieu de s'y arrêter. Le charbon de bois joue au contraire en Suède, en Hongrie, en Russie, un rôle très appréciable dans l'industrie sidérurgique de ces pays, et il en sera sans doute de même dans certaines contrées du Nouveau-Monde, si les minerais qu'elles renferment viennent jamais à être mis en valeur.

Le charbon de bois est le résidu fixe que laisse la combustion incomplète du bois ou sa carbonisation. Le bois séché à l'air contenant en moyenne 38,5 p. 100 de carbone, c'est là le rendement maximum que l'on peut espérer

dans la carbonisation, mais comme on ne saurait éviter la formation de composés volatils carburés, résultant de la réaction de l'eau contenue dans le bois sur le carbone qu'il renferme, les méthodes les plus parfaites ne donnent guère plus de 25 p. 100 en poids, et il n'est pas rare de voir ce rendement descendre au-dessous de 20 p. 100 dans la carbonisation en meule à l'air libre, la seule méthode qui jusqu'à présent fournisse le charbon de bois métallurgique.

Quelle que soit la méthode employée, le charbon de bois conserve la forme qu'avait le bois avant la carbonisation. On y distingue la structure fibreuse et les cercles de croissance annuelle du bois lui-même, mais il se produit une forte contraction d'où résultent des fissures dirigées dans le sens des rayons médullaires, et une fragilité, nuisible lors des transports par les déchets qu'elle occasionne ; cette fragilité n'est pas sans inconvénient dans le haut fourneau lui-même où les charbons de bois trop friables s'écrasent en causant les accidents qui seront décrits plus loin.

Nous renvoyons au tome II (Complément) de cette *Encyclopédie*, pour tous les détails relatifs à l'influence qu'exercent sur la qualité du charbon de bois la température à laquelle se fait la distillation, la rapidité plus ou moins grande avec laquelle elle est conduite, enfin la nature du bois employé. Ces diverses circonstances ont également une influence sur le rendement que l'industriel doit chercher à augmenter autant que possible sans pourtant porter atteinte à certaines conditions essentielles, telles qu'une homogénéité aussi complète que possible du produit. C'est ainsi qu'un charbon préparé vers 340 degrés à 400 degrés et par calcination lente, est d'un beau noir pur, sonore, dur, tachant peu les doigts. Préparé à une température inférieure, il est plus ou moins brun, peu sonore, tendre, mais plus tenace que le charbon noir. Un charbon trop cuit ou plutôt partiellement brûlé par l'action de l'air, passe à l'état de braise ; la friabilité y est poussée à son plus haut degré, et la cassure d'un noir terne, permet facilement de reconnaître qu'en pareil cas l'opération n'a pas été conduite d'une manière satisfaisante.

La proportion des cendres du charbon de bois et la composition de ses cendres doivent particulièrement attirer notre attention. Ces cendres sont nécessairement de même nature que celles des bois et varient de même avec les essences et la nature chimique du sol ; elles ne dépassent guère la proportion d'un centième dans le bois proprement dit, mais atteignent 2 à 5 centièmes dans l'écorce. Dans le charbon de bois la proportion moyenne est de 3 à 4 p. 100. Elles renferment des sels alcalins solubles, où domine le carbonate de potasse. Les carbonates de chaux et de magnésie, les oxydes de fer et de manganèse forment avec la silice la partie insoluble. Les acides sulfurique et phosphorique s'y rencontrent également, mais leur proportion par rapport au poids du combustible est trop faible pour exercer sur la composition de la fonte une influence appréciable.

Les charbons de bois sont hygroscopiques comme les bois secs ; à l'air humide ils peuvent absorber jusqu'à 7 p. 100 d'eau ; l'absorption est d'autant moindre qu'ils ont été préparés à plus haute température. Avec la teneur en eau indiquée ci-dessus, le mètre cube de charbon de bois résineux (sapin blanc, sapin rouge et pin Sylvestre), pèse de 125 à 180 kilogrammes ; le mètre cube de

bois feuillus tendres (tilleul, peuplier, bouleau), de 140 à 200 kilogrammes, enfin le mètre cube de bois dur (hêtre, frêne, chêne), de 200 à 240 kilogrammes.

Le pouvoir calorifique du charbon de bois est de 8,000 calories ; mais dans la pratique industrielle, le combustible ayant toujours subi quelque détérioration avant d'arriver au gueulard du haut fourneau, ce chiffre est rarement atteint.

Comme nous l'avons dit, l'Autriche-Hongrie est un des pays dans lesquels la fabrication de la fonte au bois est la plus développée. Les forêts occupent comme les montagnes, ou plutôt en même temps que les montagnes, une étendue considérable sur la carte de la monarchie. La faible densité de la population, la pénurie des moyens de transport permet et justifie ici ce qui serait considéré avec raison, en d'autres lieux et en d'autres circonstances, comme un gaspillage. Il convient d'ajouter que la plupart des forêts sont ou bien des forêts de hêtres donnant un excellent bois de chauffage ou de carbonisation, mais peu propre à la construction ou à d'autres usages industriels, ou bien des forêts de bois résineux dont l'abondance est absolument hors de rapport avec toute autre utilisation.

Une autre particularité à signaler, c'est que la plupart des compagnies métallurgiques possèdent elles-mêmes de vastes étendues de forêts. Nous en connaissons quatre possédant à elles seules une superficie de 306,000 hectares ayant produit, en 1882, près de 6,500,000 hectolitres de charbon de bois ; et encore cette production était insuffisante. La Société minière et métallurgique des Alpes autrichiennes qui figure dans le chiffre ci-dessus pour 3,377,000 hectolitres, en avait acheté en outre plus de 2,000,000. En prenant comme poids moyen de l'hectolitre, le chiffre de 20 kilogrammes, la consommation annuelle de cette compagnie n'était donc pas à cette époque inférieure à 112,000 tonnes de charbon de bois. C'est là, croyons-nous, un fait unique et qui mérite d'être signalé.

Le procédé de carbonisation le plus usité est celui des meules verticales tel qu'il a été déjà décrit dans l'*Encyclopédie*. En forêt, ces meules renferment le plus souvent de 40 à 100 stères, et dans ces conditions, la construction de la meule dure huit jours, la combustion huit autres jours, et le refroidissement trois jours. Si le travail se fait sur des emplacements spéciaux où les bois amenés le plus souvent par flottage, sont concentrés chaque année par centaines de mille stères, la contenance des meules peut atteindre 500 stères, et la durée du travail devient nécessairement plus considérable. On obtient par stère de 4 1/2 à 5 hectolitres de charbon pesant, en moyenne, 20 kilogrammes, ce qui correspond à un rendement de 22 p. 100 en poids et de 48 p. 100 en volume. Le prix de revient en forêt peut, en Autriche, varier de 20 et 25 francs la tonne, prix très modéré, mais qui subit souvent une majoration d'un tiers ou même de moitié, par suite du transport jusqu'au haut fourneau, et des déchets qui l'accompagnent.

La carbonisation en forêt, telle que nous l'avons décrite, présente l'inconvénient de laisser inutilisés les produits de la distillation. La carbonisation en four permet de condenser ces produits, mais donne jusqu'à présent un charbon de qualité inférieure. Des essais en ce sens se poursuivent néanmoins dans

-plusieurs exploitations austro-hongroises, et on peut prévoir le moment où de nouveaux progrès seront réalisés.

2° HOUILLES ET LIGNITES

Les houilles et les lignites à l'état cru ne s'emploient qu'exceptionnellement dans les hauts fourneaux. On n'y recourt que dans le cas où ces combustibles sont d'une grande pureté, et en même temps en fragments assez gros et assez résistants pour ne pas s'écraser et empêcher ainsi le passage de l'air à travers les couches du lit de fusion. Leur richesse en matières volatiles détermine toujours un refroidissement au moment où cette volatilisation se produit ; on n'obtient donc par ce procédé que des fontes froides ; il présente, par contre, l'avantage de fournir une grande quantité de gaz pour alimenter les chaudières et les appareils destinés au chauffage de l'air. C'est dans ce but que nous avons vu employer la houille et la lignite en mélange avec le charbon de bois et le coke dans les Alpes et les Carpathes là où le charbon de bois devient rare et où la fabrication du coke présente trop de difficultés.

3° ANTHRACITES

On désigne sous le nom d'anthracite une houille qui ayant été exposée à une calcination souterraine par des phénomènes métamorphiques, a perdu presque tous ses éléments volatils. C'est un coke naturel qui peut être employé au haut fourneau, mais l'absence des gaz refroidissants y est compensée d'une manière fâcheuse par la compacité et le peu de conductibilité pour la chaleur. En outre, l'anthracite décrépite souvent avec une telle violence que ce seul fait peut rendre impossible son emploi pour la fabrication de la fonte.

La Pensylvanie, aux États-Unis et le pays de Galles, en Angleterre, sont les deux régions où la fabrication de la fonte à l'anthracite s'est le plus développée. D'après une notice publiée par l'ingénieur John M. Hartman, à l'occasion du congrès de l'Iron and steel Institute, tenu à Vienne, en 1882, l'anthracite de Pensylvanie a ordinairement la composition suivante :

Carbone	88.0
Substances volatiles	3.5
Silice	4.5
Alumine	2.6
Oxyde de fer	0.5
Chaux	2.0
Magnésie	2.0
Soufre	0.2

L'expérience a montré que des fragments d'environ huit centimètres de côté se comportent mieux que les morceaux plus gros atteignant jusqu'à 15 ou 20 centimètres qu'on avait d'abord employés. L'anthracite des États-Unis

décrépité moins au feu que celui du pays de Galles ; il possède comme lui un pouvoir calorifique de 9,000 calories et sa teneur en cendres est peu élevée comme l'indique la composition chimique rappelée ci-dessus ; il constitue donc une matière fort utile pour la fabrication de la fonte, et plus de deux cents hauts fourneaux se sont établis sur le vaste bassin dans lequel il est exploité.

4° COKE

Le coke est par excellence le combustible employé dans les hauts fourneaux. Sur 1,500,000 tonnes de fonte produites en France dans l'année 1886, la fonte au bois n'entre pour que 12,000 tonnes environ. En Belgique et en Allemagne la proportion serait plus forte encore. Nous devons donc lui consacrer une étude d'autant plus complète que la qualité du coke influe notablement non seulement sur le prix de revient, mais encore sur la qualité de la fonte elle-même.

Le coke, envisagé au point de vue de son emploi dans le haut fourneau par rapport à la houille est ce que le charbon de bois est au bois lui-même ; c'est le produit d'une distillation ayant pour but l'élimination d'éléments volatils dont le départ dans le haut fourneau occasionnerait un refroidissement nuisible à la marche de l'appareil. De plus, la plupart des houilles menues et même en poussière lorsqu'elles sont transformées en cokes s'agglomèrent et donnent après l'opération des morceaux très résistants, et possèdent par suite les qualités nécessaires pour résister à l'écrasement dans le haut fourneau. Or, les houilles menues ont, par rapport aux fragments plus ou moins volumineux désignés sous le nom de *gros*, *gaillette*, *noisette*, etc., une valeur commerciale très réduite, et la fabrication du coke vient très à propos les utiliser.

Il convient toutefois d'indiquer dès à présent, que toutes les houilles ne se prêtent pas à la transformation en coke. Il faut qu'on y rencontre assez de matières bitumineuses pour qu'un ramollissement se produise à une température élevée. Les fragments de charbon cessent de se souder quand ils ont moins de 41 p. 100 de matières volatiles. L'agglutination dépend surtout de l'hydrogène en excès laissé par l'oxygène après formation d'eau. On peut admettre qu'une houille est collante quand sa teneur en hydrogène (cendres déduites), dépasse 4,5 p. 100, à moins qu'elle ne soit très oxygénée comme les houilles sèches à longue flamme, incapables de produire du coke malgré 40 à 45 p. 100 de matières volatiles.

Avec les houilles maigres dont l'agglutination est impossible, on peut néanmoins obtenir un coke métallurgique, en partant de gros fragments qui se transforment en quelque sorte individuellement. C'est une opération analogue à celle qui se produit dans la transformation du bois en charbon de bois, mais le coke ainsi obtenu n'a jamais la résistance du coke fondu ; nous avons du reste indiqué les raisons économiques qui recommandent particulièrement l'emploi des menus, et c'est uniquement à ce point de vue que nous nous plaçons dans cette étude.

Les houilles préférées pour la fabrication du coke sont donc les houilles demi-

grasses à 88 jusqu'à 90 p. 100 de carbone; elles donnent le rendement maximum, et leurs molécules à peine écartées par un faible dégagement de matières volatiles se prennent en un coke compact et dense. Plus grasses, les houilles peuvent encore fournir d'excellent coke, surtout si on les mélange avec des houilles maigres ou anthraciteuses, mais elles gonflent beaucoup en fondant et si le départ des matières volatiles est brusque, le coke reste caverneux et friable. Au contraire, avec des houilles grasses de composition appropriée, le coke a l'apparence d'une masse fondue plus ou moins poreuse, présentant à la surface l'aspect bien caractéristique du choux fleur, et dans la cassure, la forme d'aiguilles de prismes ou pyramides allongées. Cette structure correspondant à un éclat gris noir, semi-métallique bien facile à reconnaître, caractérise un coke de bonne qualité dont l'emploi assurera au haut fourneau une marche bien constante.

Le coke est hygroscopique comme le charbon de bois, quoique cependant à un moindre degré; à l'air sec et à la température ordinaire, il n'absorbe que 1 à 1 1/2 p. 100 d'eau; plongé dans l'eau, il peut en absorber depuis 20 jusqu'à 50 p. 100, proportion qui se réduit de nouveau par quatre à cinq jours d'exposition à l'air aux chiffres de 5, 10, au plus 15 p. 100. Le métallurgiste doit tenir grand compte de cette indication et éviter l'inconvénient d'un excès d'eau employé pour l'extinction du coke à la sortie des fours de carbonisation. Il convient aussi pour la même raison de tenir sous des hangars couverts les approvisionnements de coke du haut fourneau, précaution qui n'est pas toujours suffisamment observée.

Le coke, abstraction faite des cendres, possède un pouvoir calorifique sensiblement égal à celui du carbone pur, c'est-à-dire d'environ 8,000 calories. Il est moins inflammable, moins combustible que le charbon de bois, car il ne s'enflamme qu'au rouge, et un fragment isolé s'éteint rapidement; mais aussi à cause de sa plus grande densité, il peut développer, lorsqu'il est brûlé en couches suffisamment épaisses, et sous l'action d'un courant d'air rapide, une température locale plus élevée que le charbon de bois, mais à condition de ne pas contenir beaucoup plus de cendres que le charbon de bois lui-même.

Cendres du coke. — Pour des raisons qu'on a déjà entrevues, il importe de réduire au minimum la quantité des cendres contenues dans le coke. Dans les rares cas où on carbonise de la houille en morceaux, on est sans action sur cette teneur en cendres, qui, du reste, y est presque toujours très faible; lorsqu'au contraire on part de menus qui sont souvent très mélangés de schistes ou autres matières stériles provenant du toit ou du mur de la couche et d'intercalations de la couche elle-même, ou soumet souvent ces menus à un lavage avant le chargement dans les fours. Nous ne saurions entrer ici dans les détails de cette opération, qui se rattache plutôt à l'exploitation des mines qu'aux procédés métallurgiques. Elle se fait en utilisant la différence de densité de la houille et des parties stériles, dont les fragments de même grosseur soumis à de petits déplacements verticaux et alternatifs, se classent d'après leur poids. On utilise généralement, pour donner ces secousses verticales l'eau passant à travers une grille sur laquelle le combustible à laver est déposé. De là la catégorie nombreuse des

cribles à secousse, bacs à piston qui, différant par les détails, procèdent tous du principe indiqué ci-dessus. Comme on l'a dit, la séparation n'est efficace que lorsqu'elle s'applique à des fragments de même grosseur. Ces installations sont donc complétées par des *trommels classificateurs* d'où les matières arrivent directement dans les appareils de lavage.

Pendant longtemps, le lavage des charbons entraînait des pertes assez sensibles, car les parties les plus ténues des charbons, comme des schistes, restaient en suspension dans les eaux de lavage et étaient entraînées par elles. On laissait alors ces eaux séjourner dans de larges bassins, où les matières désignées sous le nom de *boues, mours, etc.*, se déposaient tant bien que mal; mais à cet état de ténuité la séparation du combustible et des sables schisteux était impossible, et ces déchets restaient à peu près sans emploi. On a réussi depuis peu à les laver à leur tour et à faire rentrer dans la fabrication du coke le charbon qu'ils renfermaient; on a pu obtenir ainsi une nouvelle diminution du prix de revient du coke obtenu en partant d'une houille de composition et de nature déterminée.

Quelles que soient les précautions prises, la teneur en cendres du coke ne descend pas au-dessous de 4 à 5 pour 100, et il est même bien rare que ce chiffre puisse être obtenu d'une manière courante. La teneur de 8 à 10 pour 100, fréquente dans les bons coques anglais et allemands, assure une bonne marche du haut fourneau; celle du 12 à 14 pour 100 est la plus commune en France, et la proportion monte à 16 et 18 pour 100 avec les charbons non lavés. On peut considérer comme dernière limite de cendres admissible, le chiffre de 20 pour 100; il est quelquefois atteint accidentellement, mais nous ne croyons pas qu'aujourd'hui un seul industriel consentirait à traiter un marché de coke dans des conditions pareilles. Il convient, en effet, de remarquer que dans les arrangements de cette nature la teneur maxima du coke en cendre et en eau est toujours soigneusement stipulée, et l'acheteur s'assure par de fréquentes analyses que ces conditions sont bien observées.

La composition des cendres du coke dépend naturellement de celles des cendres renfermées dans la houille; on y trouve surtout des argiles plus ou moins ferrugineuses contenant des sulfates, et souvent, en faibles quantités, de l'acide phosphorique. On peut admettre, comme composition moyenne, celle qui est indiquée par M. de Vathaire, dans son ouvrage sur la construction et la conduite des hauts fourneaux, et se résume comme il suit :

{	Silice	50 à 60	0,0
	Alumine	30 à 25	—
	Chaux et magnésie.	13 à 8	—
	Oxyde de fer et pyrite.	4 à 6	—
	Acide phosphorique	0 à 1	—
	Soufre et divers	0 à 1	—

Exceptionnellement, on trouve des coques où l'élément calcaire domine dans les cendres; dans d'autres, provenant de houilles exemptes de pyrites, l'oxyde de fer disparaît entièrement, et ces cendres présentent alors une couleur blanche qui permet de les reconnaître facilement. Le soufre se dégage en grande partie durant la carbonisation, par suite de la transformation du bisulfure en proto-

sulfure et même en sulfure inférieur; les cokes purs en ont de 3 à 5 millièmes, les autres jusqu'à 3 centièmes. Quant au phosphore, l'opération qui transforme la houille en coke reste sans action sur lui; dans quelques cokes la proportion est environ d'un dix-millième; d'autres en contiennent un millième et même plus. On comprend que de semblables combustibles ne doivent pas être employés pour la fabrication de la fonte destinée à être transformée en acier par le procédé acide. La teneur en phosphore reste, au contraire, sans influence sur la fabrication de l'acier basique, et c'est là un nouvel avantage de ce procédé.

Fours à coke. — Une étude détaillée des divers systèmes de fours à coke sortirait du cadre de ce travail. Dans tous les cas, la masse carbonisée affecte la forme d'un parallépipède à base rectangulaire, et suivant les dimensions de la base par rapport à la hauteur, suivant que la petite, la moyenne ou la grande arête est horizontale ou verticale, on a des systèmes différents sur lesquels les inventeurs ont exercé leur sagacité. Lorsque la grande arête est verticale, et ce type peut être avantageusement employé toutes les fois qu'on se trouve en présence de houilles peu collantes dans lesquelles l'action de la pesanteur vient en aide à l'agglomération, on rentre dans le type connu sous le nom de four Appolt; l'inconvénient de ce four est d'être d'une construction et d'un entretien coûteux, et malgré l'avantage marqué ci-dessus, il s'est peu répandu. Dans les fours de construction ancienne la petite arête, au contraire, était verticale, et on avait le type dit à boulanger, à peu près complètement abandonné aujourd'hui. En somme, presque tous les fours à coke rentrent aujourd'hui dans le type du *four belge*, dont la figure 1 montre la vue de face avec et sans porte de fermeture, tandis que les figures 2, 3 et 4 donnent une coupe permettant d'en étudier la structure. Ce four est caractérisé par les points suivants :

- 1° Position verticale de l'arête moyenne du parallépipède;
- 2° Chargement par le haut du four;
- 3° Circulation des gaz résultant de la combustion dans les pieds-droits et sous la sole du four pour assurer une cuisson rapide de la houille chargée;
- 4° Défournement mécanique au moyen d'un bouclier pénétrant par une des portes et repoussant par l'autre le gâteau de coke tout entier.

Dans le four représenté ci-joint et fonctionnant depuis peu d'années aux usines de Reschitza, en Hongrie, ces indications générales ont été utilisées de la manière suivante :

Les massifs comprennent de vingt-cinq à trente fours, ayant chacun 0^m,50 de largeur, 1^m,70 de hauteur, et 7^m,58 de longueur au niveau de la sole, tandis que cette longueur n'est que 7^m,25 à la clef de voûte.

L'écartement entre l'axe de deux fours est de 1^m,32; l'épaisseur de la maçonnerie qui les sépare est donc de 82 centimètres. C'est dans cette maçonnerie que se trouvent pratiqués de chaque côté du four deux carnaux horizontaux complètement séparés par une assise de briques B, tandis que des briques intermédiaires placées de distance en distance servent à assurer la verticalité des parois. Les gaz sortant du four par un certain nombre d'ouvertures a placées alternativement à l'une des extrémités et un peu avant la naissance de la voûte parcourent ainsi deux fois la paroi verticale du four et viennent ensuite passer dans le carneau

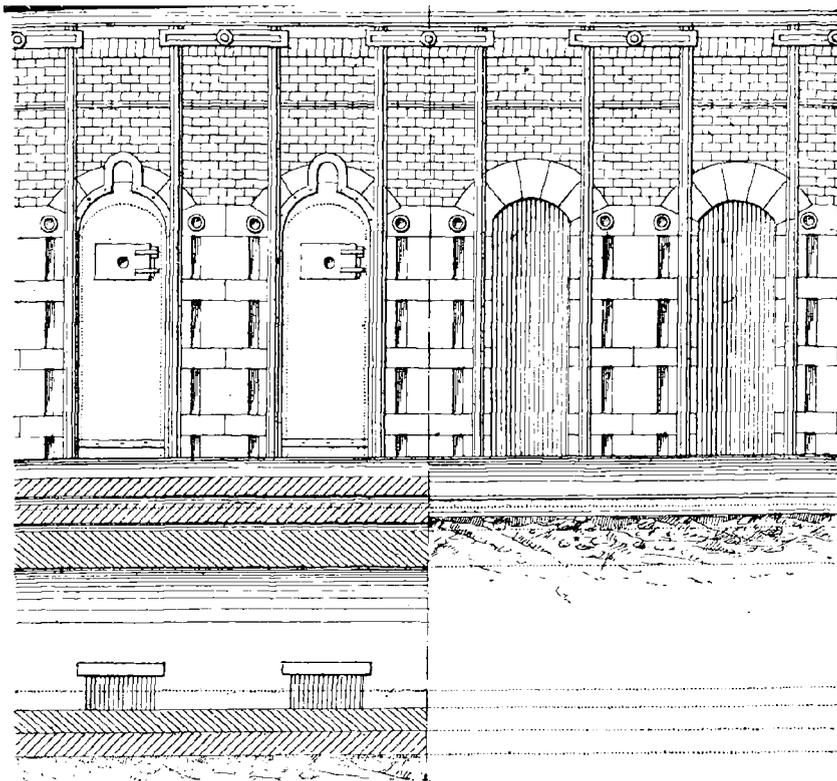


Fig. 1. — Four à coke (vue de face).

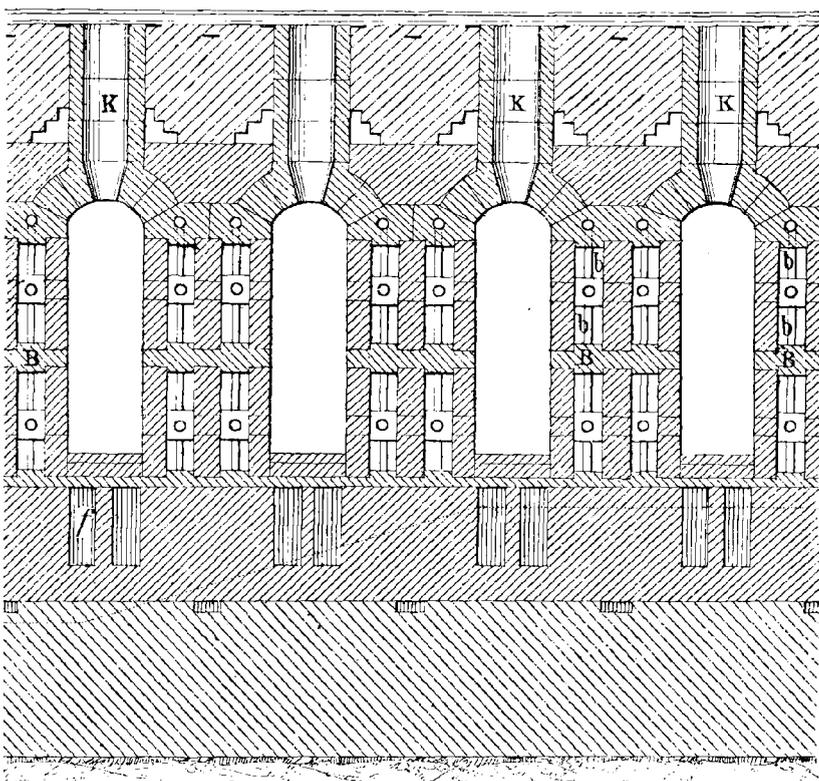


Fig. 2. — Four à coke (coupe en travers).

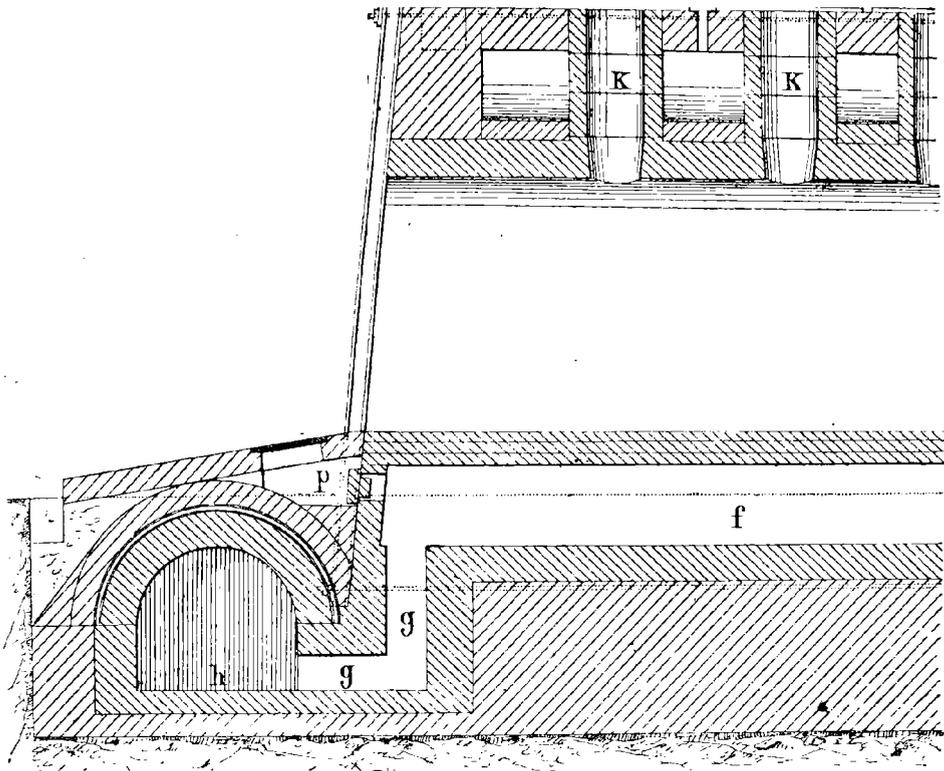


Fig. 3. — Four à coke (coupe longitudinale n° 1).

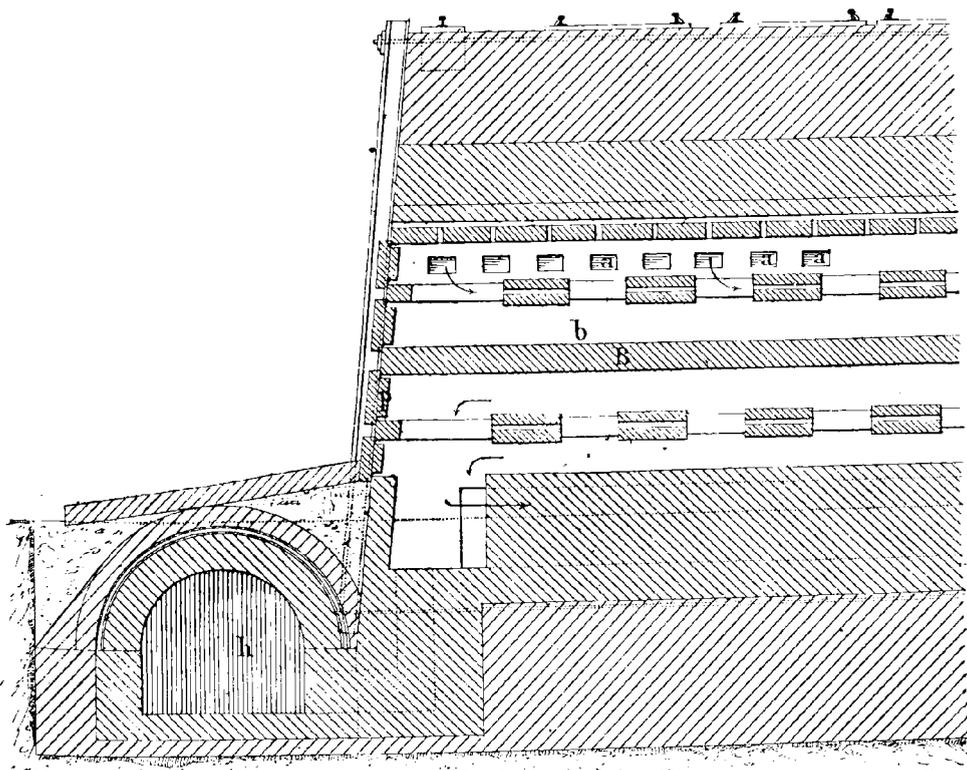


Fig. 4. -- Four à coke (coupe longitudinale n° 2).

horizontal *f* pour aller se réunir au moyen du canal *g* dans une grande galerie collectrice *h* placée au-dessous du sol, de chaque côté du massif. Ces galeries débouchent à leur tour dans une cheminée de 20 mètres de hauteur. Pour faire en sorte que cette cheminée ne reçoive que des gaz aussi bien brûlés que possible, il existe devant le massif une galerie *P* munie de regards par lesquels on peut régler l'appel de l'air dans les carnaux horizontaux.

Les ouvertures de chargement présentent une section elliptique et sont au nombre de cinq pour chaque four, sur la longueur duquel elles sont également espacées. Le charbon menu *y* est versé par des wagonnets s'ouvrant par le fond, de sorte que la charge, qui se compose de 2,500 kilog. de charbon, peut être faite très rapidement. Il est, en effet, nécessaire que ce chargement soit très prompt, car sans cela le four se refroidirait, et comme il n'est chauffé que par lui-même, on se trouverait ainsi dans l'impossibilité de continuer l'opération.

L'installation des fours est complétée par l'appareil de défournement dont nous avons parlé et qui consiste essentiellement en une crémaillère portant à son extrémité le bouclier qui pénètre dans le four et est actionnée par une machine à vapeur; celle-ci peut également produire un déplacement latéral de tout l'appareil, qui se transporte sur rails d'un four à l'autre, de sorte qu'une seule machine à défourner suffit pour plusieurs massifs. Enfin, une canalisation d'eau sous pression permet d'opérer l'extinction rapide du coke, en évitant toutefois l'inconvénient qui résulterait d'un excès d'eau pour l'emploi du combustible au haut fourneau.

Dans certaines installations dont le principe est le même que dans le four décrit ci-dessus, les carnaux sont disposés de telle sorte que le four ne se chauffe pas lui-même, mais chauffe son voisin. La construction est peut-être un peu plus simple, mais cette simplicité est compensée par l'inconvénient d'obliger à éteindre toujours deux fours à la fois. Nous préférons pour notre part la disposition qui assure à chaque four sa marche indépendante.

On carbonisait, à Reschitza, au moment où le four décrit ci-dessus a été construit, un mélange par parties égales de houilles grasses et de houilles maigres. Lorsque ces dernières dominent ou sont mêmes seules employées, on peut faciliter l'agglomération en réduisant encore la largeur des fours et en descendant jusqu'à 0^m,30. On comprend, en effet, que la chaleur étant surtout produite par le rayonnement des parois, plus ces parois seront rapprochées, mieux on évitera d'avoir au milieu du gâteau de coke une partie mal cuite, désignée dans la pratique sous le nom de *pieds noirs*, et qui augmente notablement le déchet de l'opération. On évite ainsi l'emploi du four Appolt, mais quel que soit le four employé et quelque vigoureuse que soit la cuisson, il est certaines houilles qui, chargées seules, résistent entièrement à la carbonisation. C'est ainsi que nous avons traité, dans les fours les plus chauds, des houilles menues de Kladno, en Bohême, qui, après la cuisson la plus prolongée, sortaient du four aussi pulvérulentes qu'elles y étaient entrées.

Tout ce qui a été dit ci-dessus montre que le poids d'une charge de coke est assez variable et qu'il en est de même de la durée de sa cuisson. On peut admettre comme limites extrêmes 2,000 et 5,000 kilog. et pour la durée de vingt à trente heures. Quant au rendement, il dépend nécessairement de la nature du

charbon, au double point de vue de la proportion d'éléments volatils et de la résistance du coke obtenu. Quoi qu'on fasse, celle-ci n'est jamais complète, et il se produit dans le défournement des frottements tels que plusieurs centièmes de la charge passe en coke menu et même en poussier, à peu près aussi difficile à employer que les boues du lavage. Un rendement de 70 pour 100 de coke en morceaux et de 4 à 5 pour 100 de fragments plus ou moins gros répond à peu près à la moyenne des résultats obtenus.

Production et prix de revient du coke. — Nous finissons ce chapitre en faisant un rapide examen des conditions géographiques et économiques de la production du coke employé dans la métallurgie du fer. Le chiffre total de la production est facile à établir, car une tonne de fonte exigeant aujourd'hui à peu près une tonne de coke pour sa fabrication, il suffit de prendre le chiffre de la production de la fonte au coke en y ajoutant environ 5 pour 100, représentant largement les emplois du coke à la fonderie et dans les ateliers Bessemer. Les pays qui participent surtout à cette production sont l'Angleterre, la Belgique et l'Allemagne. En France, la production du coke s'est beaucoup développée depuis quelques années dans les bassins du Nord et du Pas-de-Calais ; mais, malgré de sérieux efforts faits aussi bien par les consommateurs que par les producteurs, les groupes si importants des hauts fourneaux de Nancy et de Longwy marchent encore aujourd'hui surtout avec des coques allemands et belges. C'est à l'Angleterre que les hauts fourneaux situés sur les bords de l'Atlantique demandent à leur tour leur combustible. Quant aux usines du centre et du Midi de la France, c'est dans les houillères françaises qu'elles s'alimentent (Saint-Étienne, Aun, Decazville, Bessèges), mais le coke n'y est obtenu qu'après des lavages coûteux, et malgré cela la qualité n'en est point comparable à celle des coques de la Prusse. La France, il faut bien le dire, n'a point été favorisée de la nature dans la distribution du combustible minéral, surtout si on la compare à son proche et puissant voisin. En Autriche-Hongrie, la fabrication du coke est presque entièrement concentrée dans le bassin houiller d'Ostrau, en Silésie, sur les confins de la Prusse et de la Russie. Dans ce dernier pays, le grand bassin houiller du Donetz commence à peine à être exploité, et tout montre que ce ne sont ni le charbon ni le coke qui manqueront au développement sidérurgique de la contrée. Quant aux deux derniers nés de la métallurgie européenne, l'Espagne et l'Italie, ils trouvent en partie sur leur sol les éléments de leur nouvelle activité, et l'Angleterre est là pour suppléer à l'insuffisance de leur production.

Le prix de revient du coke dépend à peu près exclusivement du prix de la houille employée et de son rendement. Les frais de fabrication proprement dits, c'est-à-dire l'entretien des fours et des appareils, la main-d'œuvre, ne jouent ici, dans les installations bien comprises, qu'un rôle fort minime ; ils atteignent tout au plus 1 franc par tonne. La région où le coke paraît être actuellement obtenu dans les meilleures conditions est la Westphalie et la Prusse rhénane (bassins de la Ruhr et d'Aix-la-Chapelle). Des exploitants de ce pays l'offraient, vers la fin de 1886, à raison de 6 francs la tonne, et on peut admettre que ce prix de vente ne présentait, par rapport au prix de revient, qu'un écart extrêmement faible. En Belgique, il est certainement supérieur, et nous pensons qu'en France il doit

osciller entre 10 et 12 francs, lorsqu'il ne s'élève pas au-dessus de ces chiffres. Il faut, du reste, remarquer que pour le coke, comme pour le minerai, le prix de revient peut varier, dans une même exploitation, suivant de nombreuses circonstances techniques et économiques. Nous n'avons voulu donner ici qu'une indication très générale et sujette, par suite, à discussion.

CHAPITRE V

OPÉRATIONS AUXQUELLES SONT SOUMIS LES MINÉRAIS AVANT LEUR TRAITEMENT AU HAUT FOURNEAU

Concassage. — Lavage. — Grillage.

Bien que les minerais de fer soient loin d'exiger une préparation mécanique aussi considérable et aussi savante que ceux qui les précèdent ou ceux qui le suivent dans la série des composés métallifères (plomb, cuivre, zinc, etc.), on peut cependant, par certaines précautions préalables et en général très peu coûteuses, faciliter le traitement des minerais de fer au haut fourneau et lui permettre surtout d'être conduit d'une manière plus économique. Quelquefois, la nature complexe du minerai oblige à un *triage* ayant pour but d'en écarter certaines impuretés, mais le plus souvent la première opération est un *concassage* qui se fait soit sur le carreau de la mine, soit à l'usine même, et dont le but est de ramener tous les fragments à une grosseur à peu près semblable à celle du poing. Ce n'est pas là évidemment une règle absolue, et dans certains pays, en Angleterre notamment, on voit employer, surtout avec des minerais facilement réductibles, des blocs présentant jusqu'à 3 ou 4 décimètres de côté; mais cet exemple n'est pas à imiter.

Le concassage, qui se faisait autrefois péniblement au moyen de masses manœuvrées à la main, est opéré aujourd'hui presque toujours par des *concasseurs mécaniques* mus par la vapeur; ces appareils consistent en deux mâchoires verticales en acier présentant l'une sur l'autre une légère inclinaison, et dont l'une se trouve périodiquement rapprochée de l'autre par un mouvement d'excentrique. La surface de ces mâchoires étant, en outre, munie de cannelures verticales, les minerais se trouvent désagrégés: ce mode de travail a, il est vrai, l'inconvénient de donner, outre les fragments de grosseur voulue, un certain nombre de fragments plus petits et même de poussière, mais ceux-ci, lorsqu'ils ne sont pas en proportion trop forte, peuvent également passer dans le haut fourneau sans inconvénient.

En regard de cette préparation mécanique par voie sèche, il convient de rappeler que certains minerais en grains entourés d'une gangue argileuse très pauvre ou même stérile doivent être soumis à un *lavage*. Les appareils très simples employés à cet effet dans le centre de la France portent le nom de *patouillet*s et nous nous arrêterons d'autant moins à les décrire que les minerais de fer, qui forment aujourd'hui la véritable richesse de notre pays, n'exigent point ce traitement préalable.

Nous devons, au contraire, insister plus longuement sur l'opération chimique désignée ordinairement dans les usines sous le nom de *grillage*, mais qui, dans la plupart des cas, n'est qu'une calcination destinée à éliminer un élément volatil, ou même simplement à désagréger le minerai. Dans ce dernier cas, la calcination remplace en quelque sorte ou seconde le concassage, et elle en est l'utile auxiliaire lorsque le minerai renfermant, par exemple, des matières pyriteuses, celles-ci se trouvent, grâce à elle, transformées en sulfates solubles qu'une exposition prolongée à l'air et aux intempéries fait disparaître. Les fers magnétiques sont le plus souvent dans ce cas; ils sont, en outre, extrêmement compacts, de sorte que le grillage se recommande particulièrement lors de leur emploi. Quant aux fers spathiques et aux blackband, l'élimination de l'acide carbonique pour les premiers et des matières bitumineuses pour les seconds, le rend à peu près indispensable.

L'opération peut se faire en tas libres ou en fours. C'est la première méthode qu'on emploie sans se préoccuper des pertes de chaleur lorsque le minerai contient lui-même l'élément combustible : parmi les minerais de fer, le blackband seul jouit de cette propriété. Pour le grillage en tas, on étend, sur une aire plane, convenablement damée ou pavée, un lit de fagots ou de tout autre combustible facilement inflammable. Par-dessus, on répand directement le minerai disposé en pyramides rectangulaires tronquées dont la hauteur, dépendant de la grosseur des fragments, varie de 1 à 4 mètres. Dans ces conditions, la consommation de combustible atteint, en Angleterre, de 2 à 40 pour 100 du poids traité lorsqu'on calcine en tas les minerais houillers non bitumineux. C'est le double de la consommation des fours à cuve; aussi, aujourd'hui où il n'y a plus de petites économies, cette manière de procéder tend-elle de plus en plus à disparaître.

La calcination s'effectue dans de meilleures conditions lorsqu'on se sert de fours à cuve pareils à ceux que tout le monde a vu employer pour la cuisson de la chaux. On peut stratifier la matière à employer avec le combustible, ou brûler le charbon dans un four spécial, ou bien projeter dans le four à cuve un combustible gazeux. Toutes ces combinaisons ont été essayées dans le grillage des minerais de fer. C'est surtout en Styrie où l'exploitation des fers spathiques présente, comme nous l'avons vu, tant d'importance que l'imagination des ingénieurs s'est donnée libre carrière. Nous reproduisons dans les figures 5 et 6 la coupe verticale de deux de ces fours. Dans le premier, on a proposé, en utilisant le combustible gazeux, de lui faire parcourir un chemin inverse de celui du minerai. Celui-ci, en effet, est introduit par la trémie A, tandis que le gaz amené par le tuyau R brûle au moyen de l'air qui pénètre dans le four par les regards l.

Il est certain que cette disposition, surtout si on peut utiliser comme combustible les gaz du haut fourneau, est économique, mais un appareil semblable est d'un faible rendement et peut devenir d'un entretien coûteux. Dans le second

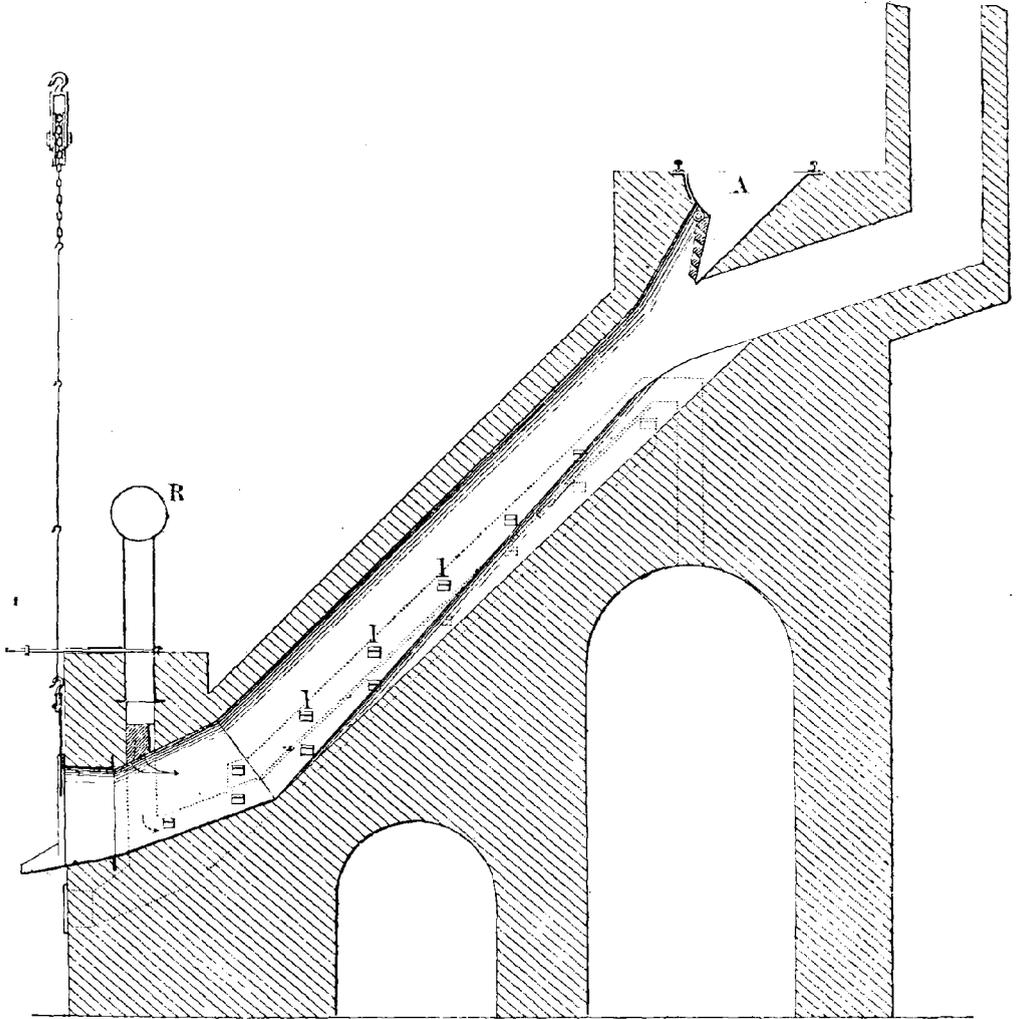


Fig. 5. — Four de grillage au gaz.

système, on a cherché à faciliter autant que possible le défournement, et les opérations qui en dépendent, en élevant le four sur des massifs en maçonnerie, formant des galeries dans lesquelles circulent les wagonnets destinés à recevoir les produits de l'opération.

Le combustible, employé dans les fours de grillage, peut être indifféremment le charbon de bois, la houille ou le coke, ou, pour parler plus exactement, les

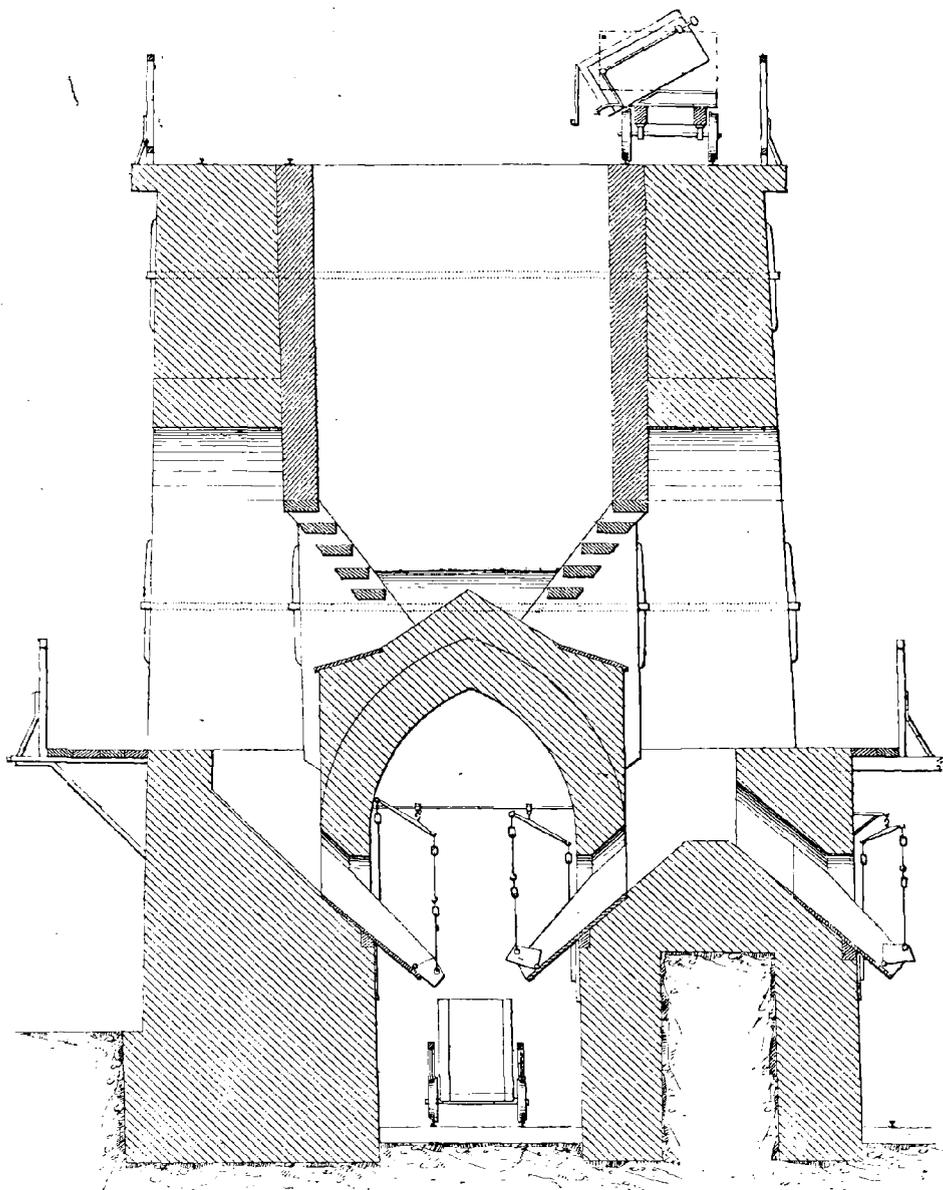


Fig. 6. — Four de grillage.

menus déchets de ces combustibles. En effet, la température n'a pas besoin d'être très élevée, et il ne s'agit pas là d'une de ces opérations qui exigent une précision telle, que, si elle vient à manquer, le produit reste sans valeur.

CHAPITRE VI

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA CONSTRUCTION DES HAUTS FOURNEAUX

Éléments constitutifs du haut fourneau. — Profils divers. — Hauts fourneaux trapus ou élancés. — Dimensions absolues et relatives des diverses parties du haut fourneau.

La fabrication de la fonte est essentiellement une opération réductrice faite soit par le carbone solide, soit par des gaz hydrocarburés. C'est en même temps une fusion, car lorsque le minerai a été désoxydé, la fusion doit intervenir pour séparer le composé ferreux des matières terreuses qui, plus légères que lui constituent les *laitiers*.

L'opération devant être réductrice, quel est donc l'appareil dans lequel elle pourra se faire de la manière la plus avantageuse ? La nombreuse série des fours à réverbères se trouve exclue *a priori*. Le vase clos chauffé à l'extérieur, comme le creuset destiné à la fusion de l'acier, ou un four vertical comme le four Appolt, destiné à la fabrication du coke, pourraient être théoriquement employés. Le système Chenot ayant en vue la production directe d'éponges de fer, en partant du minerai, utilisait des appareils de ce genre, mais la perte de chaleur absorbée par les parois rend cette manière d'opérer extrêmement coûteuse. Il ne reste donc que les fours sans chauffe distincte, divisés en fourneaux à tuyères et fourneaux à courant d'air naturel. Pour le minerai de fer il faut un courant d'air forcé, car sinon la température ne serait pas suffisante pour fondre les gangues terreuses. Le type d'appareil à employer se trouve donc ainsi nettement déterminé. C'est une cuve à tuyères renflée en son milieu et tenue constamment pleine du mélange de charbon, minerai et fondant en proportion convenable pour que tout soit brûlé, fondu ou volatilisé. La partie renflée (A) porte le nom de *ventre*, la partie reserrée vers le bas (B) est désignée sous le nom d'*étalages*; l'orifice supérieur (D) est le *gueulard*, tandis que le *creuset* (F) forme la partie inférieure de l'appareil dans laquelle la fonte et le

laitier viennent se réunir en attendant d'en être éliminés; enfin, on distingue quelquefois entre les étalages et le creuset (B), une région spéciale à laquelle on a donné le nom d'*ouvrage*. Le creuset est percé de plusieurs *embrasures* (R), dans lesquelles viennent se placer les tuyères par lesquelles le vent est introduit dans l'appareil. La figure 7 montre la coordination de ces diverses parties du haut fourneau.

On désigne sous le nom de *profil* du haut fourneau, la ligne brisée ou sinueuse qui, dans une coupe de l'appareil, se présente symétriquement par rapport au grand axe suivant lequel cette coupe a été faite. On attachait autrefois une importance considérable à ce profil, et sa détermination était le plus souvent soumise à des règles empiriques d'une valeur discutable. MM. Lowthian Bell en Angleterre, de Tunner en Autriche, Gruner en France, ont consacré de nombreux mémoires à l'étude rationnelle de cette importante question, et c'est en nous inspirant de leurs travaux que nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

Un premier point qu'il importe de bien établir, c'est que la descente des charges doit être assez lente pour que la réduction ait le temps de s'opérer jusqu'au centre des fragments de minerai, avant que la température de fusion ait été atteinte. Lorsqu'il s'agit de construire un haut fourneau, la plus ou moins grande porosité des minerais à traiter, leurs dimensions, leur composition chimique doivent donc être avant tout examinées, et pour chacun d'eux il existe des limites de dimensions dont on ne s'écarterait pas sans inconvénients plus ou moins graves.

La vitesse de descente se trouvant déterminée par la condition précédente, on peut admettre toutes les dispositions qui assureront une descente uniforme des matières solides et une ascension régulière des matières gazeuses. En effet, les matières minérales chargées dans un état identique au gueulard, doivent arriver toutes modifiées de même dans le creuset. C'est là une des conditions fondamentales de la régularité de marche des hauts fourneaux, et lorsqu'on n'y satisfait pas, des dérangements incessants en sont la conséquence.

On conçoit d'après cela que les formes simples soient les meilleures. C'est ainsi que deux troncs de cônes accolés par leur grande base, disposition employée depuis longtemps en Styrie, en Suède et dans plusieurs districts français, paraît préférable à la distinction nette des diverses parties produisant une série d'arêtes saillantes qui en peu de jours sont usées ou fondues. Le profil qu'il convient de donner à un haut fourneau est évidemment celui qu'il prendra après quelques semaines de marche et qu'il conservera pendant tout le temps où son allure est régulière.

Par conséquent, comme le dit Gruner, construire un ouvrage à parois presque verticales, surmontées d'étalages plus ou moins plats, que viennent rencontrer à angle peu obtus, presque droit, quelquefois même aigu, les parois de la cuve, c'est disposer un appareil dont le bon fonctionnement ne sera atteint qu'après atténuation de tous les changements brusques de la forme, et que la pratique conseille par suite d'éviter. »

Pour que les charges descendent d'une manière régulière, il ne suffit pas que le profil soit simple, il faut encore qu'il existe une certaine corrélation entre la hauteur et la largeur de l'appareil. Cette considération a conduit à distinguer

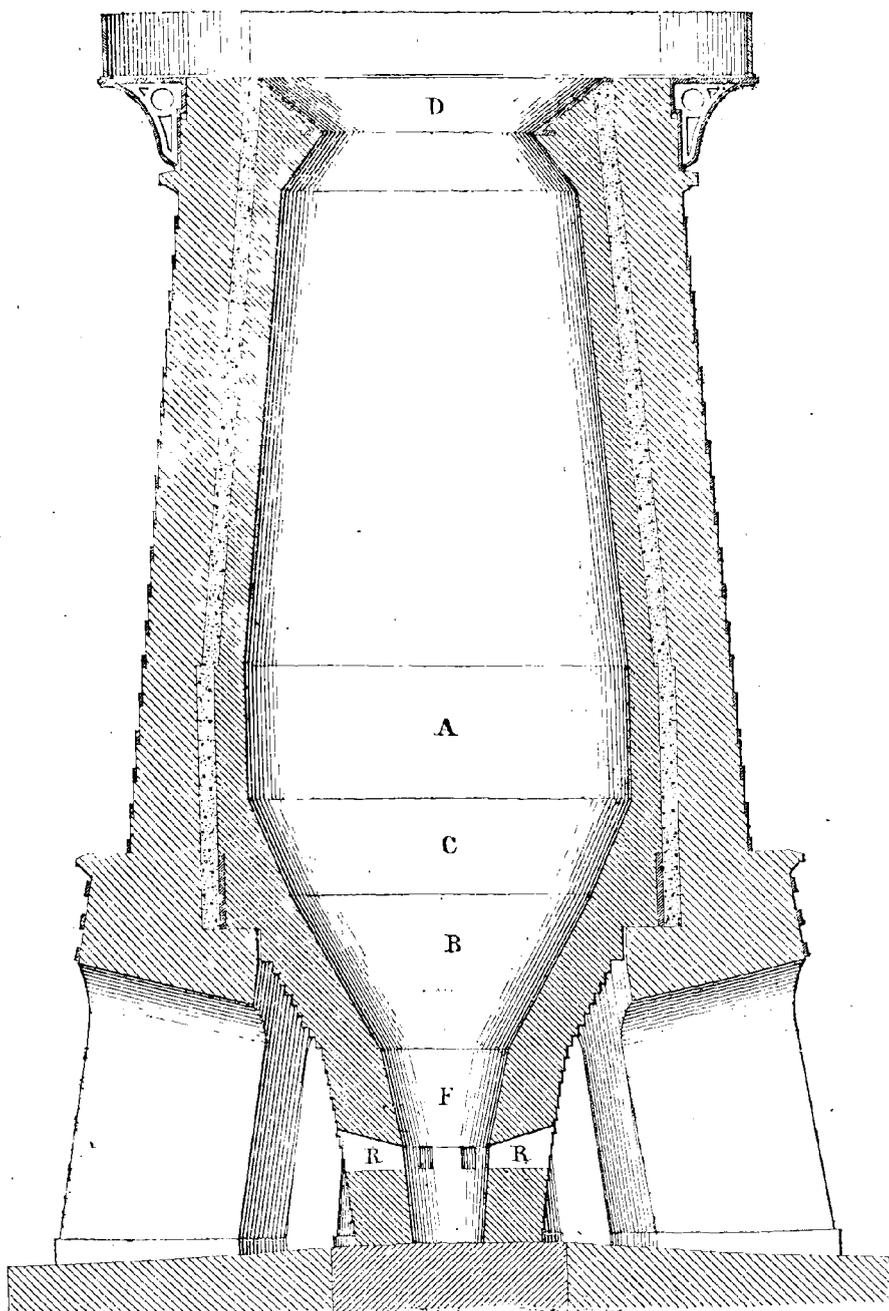


Fig. 7.

dans la pratique les hauts fourneaux en trois groupes : ceux à *profil trapu*, à *profil ordinaire* et à *profil élancé*. Après avoir comparé les profils d'un grand nombre de hauts fourneaux, Gruner a été conduit à établir à cet égard les règles suivantes :

Peuvent être considérés comme fourneaux trapus, ceux dont la hauteur est inférieure ou au plus égale au triple du diamètre. Dans les fourneaux ordinaires, ce rapport varie entre 3 et 4 et oscille principalement aux environs de 3,5. Enfin les fours élancés sont ceux dans lesquels le rapport $\frac{H}{D}$ est 4, atteint et dépasse même 5 ; mais quand la hauteur arrive à égaler et même dépasser 6 fois le diamètre au ventre, on peut dire que le but a été dépassé, et cet excès de hauteur relative n'est pas lui-même sans présenter quelques inconvénients. Les figures 8 et 9 donnent un certain nombre de profils de hauts fourneaux rentrant dans les deux types extrêmes, trapus et élancés.

Dimensions des hauts fourneaux. — Les profils des hauts fourneaux n'ont pas seuls une influence sur la marche. Les dimensions absolues pour un profil donné exercent également une influence considérable. Ici, comme dans presque toutes les industries, on a suivi une marche ascendante, et tandis que les premiers hauts fourneaux au bois présentaient une capacité de 25, 20 et même 15 mètres cubes, on rencontre maintenant des hauts fourneaux au coke dont la capacité atteint 500 mètres cubes et dépasse même ce chiffre quelquefois.

L'idée se présente naturellement de comparer pour plusieurs hauts fourneaux, le rapport entre le volume intérieur et le nombre de tonnes de fonte produites journellement. Il convient toutefois de remarquer que ce rapport ne peut jamais être envisagé d'une manière absolue, car la production dépend aussi de la richesse du minerai, de sa plus ou moins grande réductibilité, de la qualité du combustible, de la pression de l'air, de la température, en un mot, de nombreuses circonstances par suite desquelles la conduite de chaque haut fourneau exige une pratique spéciale. On peut dire toutefois qu'au point de vue de la production effective par mètre cube de vide intérieur, le maximum correspond à des fourneaux relativement petits, c'est-à-dire de 40 à 80 mètres cubes pour les fourneaux au charbon de bois, et de 120 à 150 mètres cubes pour les fourneaux au coke. Avec des appareils de cette dimension, lorsque les minerais sont faciles à réduire et riches, et quand la fonte peut être obtenue avec une allure peu chaude (fontes blanches et fontes de forge), une capacité de 2 mètres cubes par tonne à produire en vingt-quatre heures peut suffire. C'est le cas des hauts fourneaux traitant les minerais spathiques de Styrie dont il a été question au chapitre II.

Lorsque les minerais sont moins faciles à réduire ou que la fonte doit être plus chaude (fonte grise de fonderie ou fonte Bessemer), le volume par tonne produite par vingt-quatre heures doit monter à 3 ou 4 mètres cubes. C'est ainsi qu'à l'usine de Reschitza en Hongrie, on obtenait dans un haut fourneau au coke construit il y a quelques années, et dont le vide intérieur était de 250 mètres cubes, une production journalière de 60 tonnes. Enfin, dans le cas le plus défavorable de minerais pauvres, dont la teneur varie aux environs de 30 p. 100,

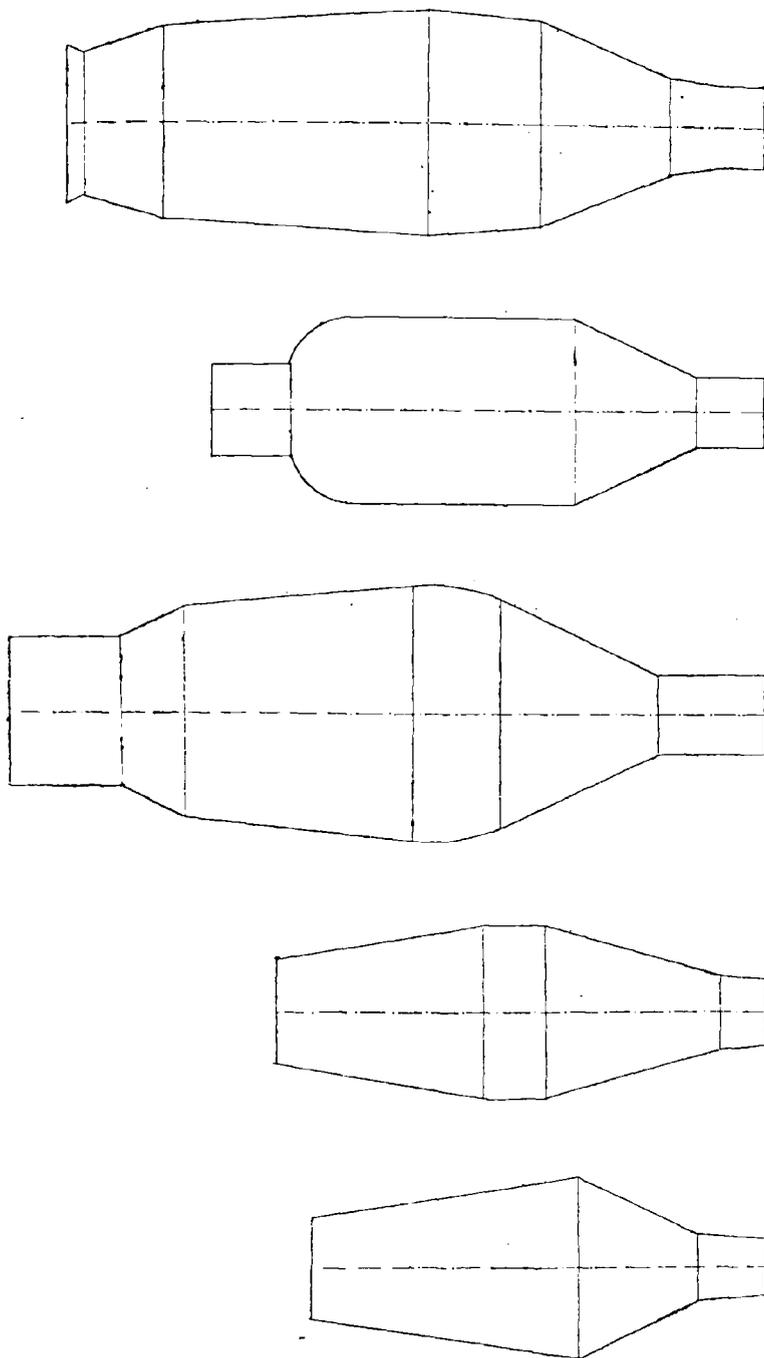


Fig. 8. — Profils de haux fourneaux trapus.

ou dans le cas de fabrication de fontes très grises pour moulages, le volume doit s'élever à 5 ou 6 mètres cubes par tonne de fonte.

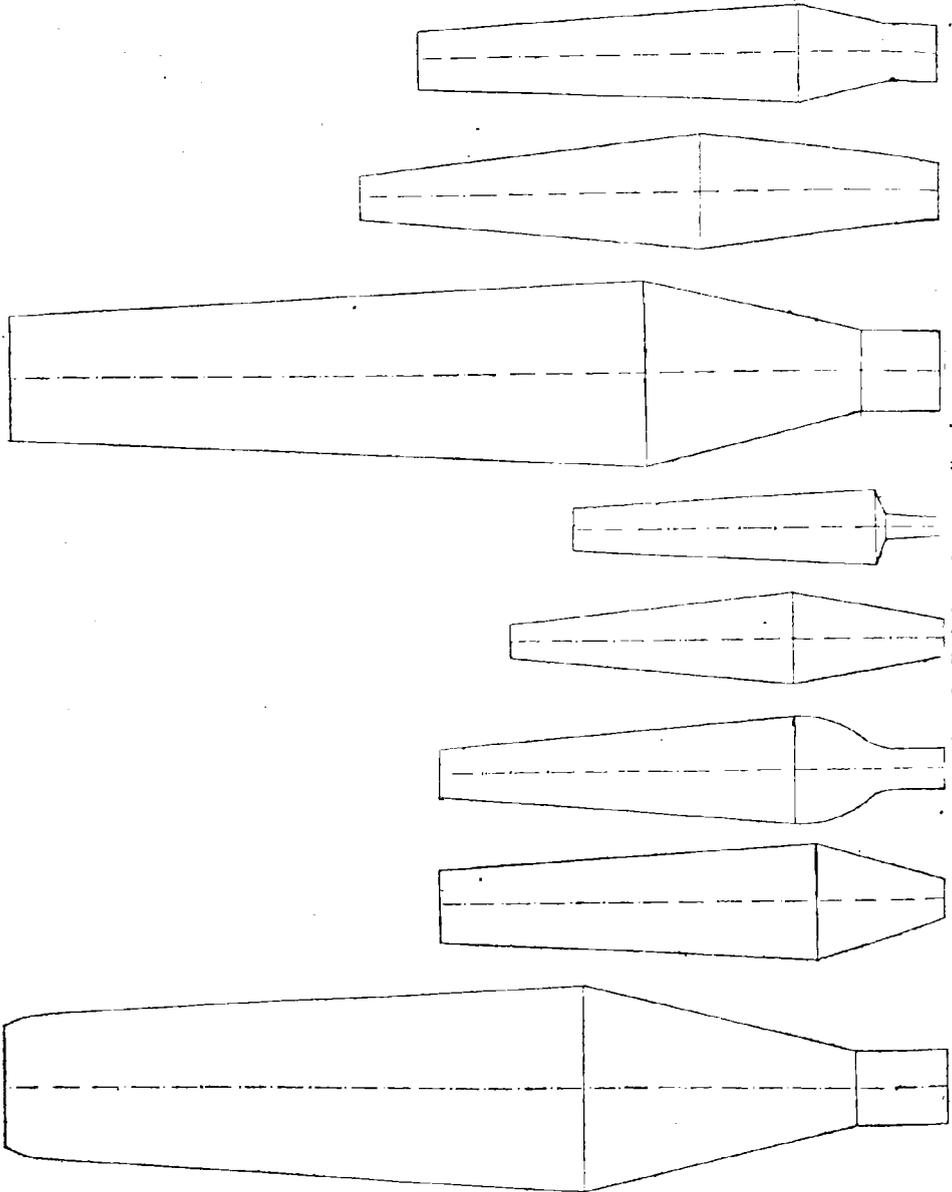


Fig. 9. — Profils de hauts fourneaux élancés.

Quelle que soit la nature des minerais, on s'accorde aujourd'hui à reconnaître que les dimensions exagérées adoptées dans certains districts, et notamment en Angleterre, ne présentent pas les avantages qu'on en attendait. Dans ces hauts

fourneaux monstres le rapport s'élève à 6, 8, et même 12 mètres cubes. Nous empruntons au *Traité de métallurgie* de Gruner, un exemple frappant de ces inconvénients. C'est ainsi qu'à Clarence Work, on a obtenu avec des hauts fourneaux de dimensions différentes, marchant en fonte de forge, les résultats suivants :

TYPE du haut-fourneau.	VOLUME TOTAL	RAPPORT de la hauteur du diamètre au ventre.	VOLUME INTÉRIEUR par tonne produite en 24 heures.	CONSUMMATION en coke par tonne.
Type de 1853	170 ^m	2.92	5.6	1430
— de 1865	330	4.70	8.6	1125
— de 1866	440	4.00	8.8	1125
— de 1870	700	3.25	11.7	1125

Ainsi le volume du fourneau de 1870 est à peu près double de celui de 1865, et on n'obtient aucune économie de combustible, mais la production relative a baissé et elle baisse d'autant plus que le volume augmente.

Les mêmes résultats ont été constatés dans les hauts fourneaux de MM. Bolckow et Vaughan, ainsi qu'aux usines de Newport, près de Middlesboro ; si bien que M. Bell, dont nous avons signalé les travaux spéciaux sur cette matière, arrive à la conclusion que nulle part dans le Cleveland, un fourneau de 700 mètres cubes ne produit deux fois autant qu'un four de 350 mètres cubes.

Ainsi que nous avons eu déjà plusieurs fois l'occasion de l'indiquer, la fabrication de la fonte dans le département de Meurthe-et-Moselle, a pris depuis la guerre de 1870 un très grand développement. De nombreux hauts fourneaux se sont élevés à côté les uns des autres, et les points de comparaison ont pu ainsi se multiplier. On est arrivé à la conclusion qu'un haut fourneau de 20 mètres de hauteur, avec un diamètre de 2 mètres au creuset, de 6 mètres au ventre et de 4 mètres au gueulard, correspondant pour les minerais traités à une production de 100 tonnes environ par vingt-quatre heures, réunissait les conditions d'une marche pratique et économique, et ces conclusions ont été approuvées par le *Congrès de la société de l'Industrie minérale* dont nous avons déjà parlé.

Ces données expérimentales qui conduisent à limiter les dimensions des hauts fourneaux sont confirmées en ce qui concerne spécialement la hauteur par la nature du combustible employé. Cette hauteur, qui doit forcément augmenter avec le cube total, si on veut éviter de tomber dans les profils trapus déjà condamnés est, pour les hauts fourneaux au bois, forcément limitée par la friabilité de ce combustible. Les charbons de bois blanc s'écrasent avec une colonne de matières dépassant 8 mètres ; avec les charbons de bois durs, on peut aller jusqu'à 12 mètres et 15 mètres au maximum, mais lorsqu'on atteint ce dernier chiffre, la proportion de fraïsil ou charbon écrasé peut devenir un obstacle au passage

régulier des gaz. Avec les hauts fourneaux au coke ces inconvénients sont moins à craindre et des hauteurs de 22 à 25 mètres peuvent à la rigueur être employées; mais l'écrasement et le tassement des matières n'en est pas moins à redouter, et de plus la descente des charges exigeant dans ces appareils de soixante à soixante-dix heures, il en résulte ainsi, lors des dérangements ou changements d'allures, des inconvénients qui peuvent être évités avec des appareils de dimensions plus modérées.

CHAPITRE VII

ÉTUDE DES DIVERSES PARTIES DU HAUT FOURNEAU ET DES APPAREILS ACCESSOIRES

Emplacement du haut fourneau. — Monte-charges. — Appareils de chargement et prises de gaz. — Chemise intérieure et extérieure. — Tuyères. — Dispositifs de coulée de la fonte et du laitier. — Machines soufflantes. — Appareils à chauffer l'air. — Halles de coulée.

Nous n'entrerons pas ici dans les diverses considérations économiques qui déterminent l'emplacement d'un haut fourneau par rapport aux gisements de minerais et de combustibles. Les lecteurs désireux d'approfondir cette question, la trouveront traitée avec les développements quelle comporte dans le chapitre premier de l'ouvrage de M. Vathaire, sur la construction et la conduite de hauts fourneaux. Nous nous bornerons à décrire dans ce chapitre le haut fourneau avec tous les appareils nécessaires à son fonctionnement.

Comme on l'a vu, il est rare que les minerais puissent être amenés directement de la mine au gueulard du haut fourneau. Ils doivent parcourir souvent plusieurs centaines de kilomètres, et les approvisionnements doivent être d'autant plus considérables que les distances à franchir sont plus grandes, et que, par suite les chances de retard dans le transport se trouvent augmentées. Les grandes usines sont le plus souvent reliées aux voies ferrées par des embranchements qui permettent aux wagons des grandes lignes d'arriver jusqu'à pied d'œuvre. Lorsque les transports se font par canal, les quais de déchargement sont autant que possible rapprochés du parc à minerais.

On recherchait autrefois les terrains accidentés pour adosser les hauts fourneaux à la montagne et arriver de plein pied au gueulard. La hauteur croissante des appareils, jointe aux développements de leurs accessoires, a rendu de plus en plus difficile l'utilisation de ces circonstances naturelles et a conduit à élever les matières à charger jusqu'au niveau du gueulard au moyen de *monte-charges* de systèmes très variés. Ce sont tantôt de simples *balances d'eau* sujettes à tous les inconvénients qu'entraîne l'emploi de l'eau exposée à l'air libre aux variations de température; tantôt des *cages* semblables à celles employées

dans les puits de mines, et munies de tous les appareils de sûreté usités pour ces dernières, ou bien encore des *cloches pneumatiques* mises en mouvement au moyen de la machine soufflante. Quel que soit le type employé, il convient d'avoir, surtout si plusieurs hauts fourneaux sont réunis, un monte-charges de réserve qui puisse fonctionner dans le cas où l'appareil mis ordinairement en marche est soumis à des réparations.

Le chargement des matières dans le haut fourneau se fait forcément d'une manière intermittente. Il ne saurait être question de ces trémies qui laissent dans

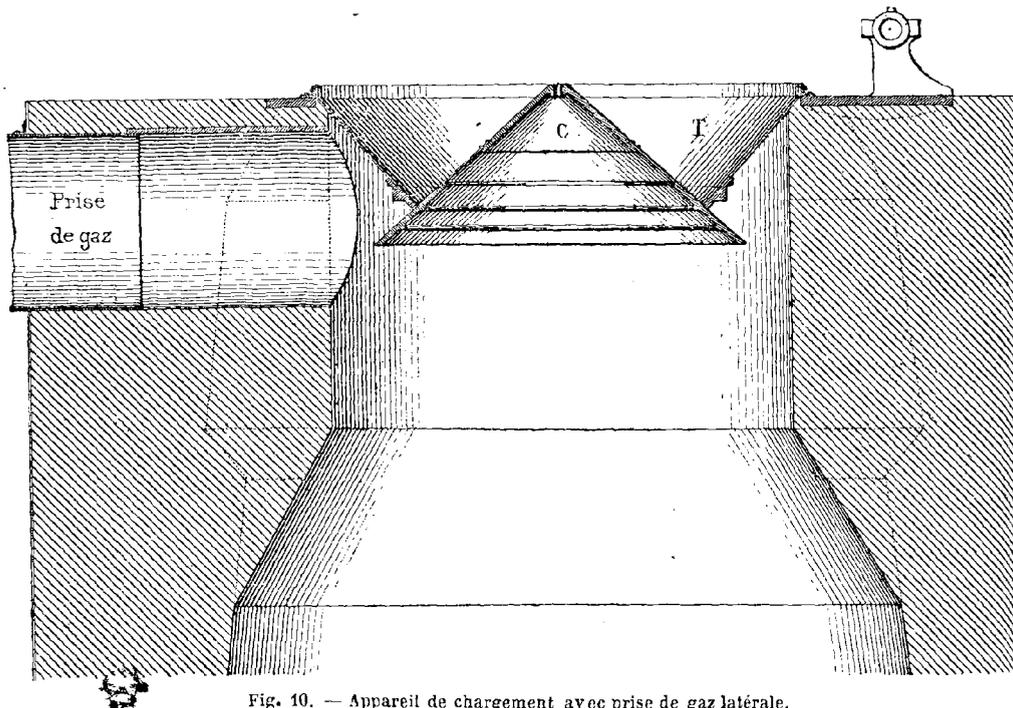


Fig. 10. — Appareil de chargement avec prise de gaz latérale.

les fours de plus petites dimensions les matières soumises au traitement métallurgique s'écouler d'une manière régulière. Les monte-charges amènent généralement au gueulard des wagnonnets contenant plusieurs centaines de kilogrammes, et autrefois on les vidait tant bien que mal, sans même prendre de grandes précautions pour leur égale distribution. Les gueulards restaient alors entièrement ouverts, et les gaz résultant de la réduction se perdaient à l'air en incommodant fortement les ouvriers occupés au chargement. On s'est préoccupé de fermer le gueulard au moyen d'un appareil permettant de ne l'ouvrir qu'au moment du chargement, de recueillir les gaz et de les conduire dans les tuyaux les amenant au point où ils peuvent être utilisés, enfin d'assurer une distribution rationnelle du minerai et du coke lors du chargement. L'appareil le plus fréquemment employé est celui qui porte le nom anglais de *cup and cone*, il est représenté en coupe sur la figure 10 ; il consiste essentiellement en une

- trémie fixe T, sur laquelle vient s'appuyer un cône mobile C. Ces deux parties de l'appareil peuvent être soit complètement en fonte, soit partie en fonte, partie en tôle. L'emploi exclusif de la tôle diminue le poids total de l'appareil, mais il présente des inconvénients à cause de la facilité avec laquelle elle se gondole, ce qui rend la fermeture peu hermétique.

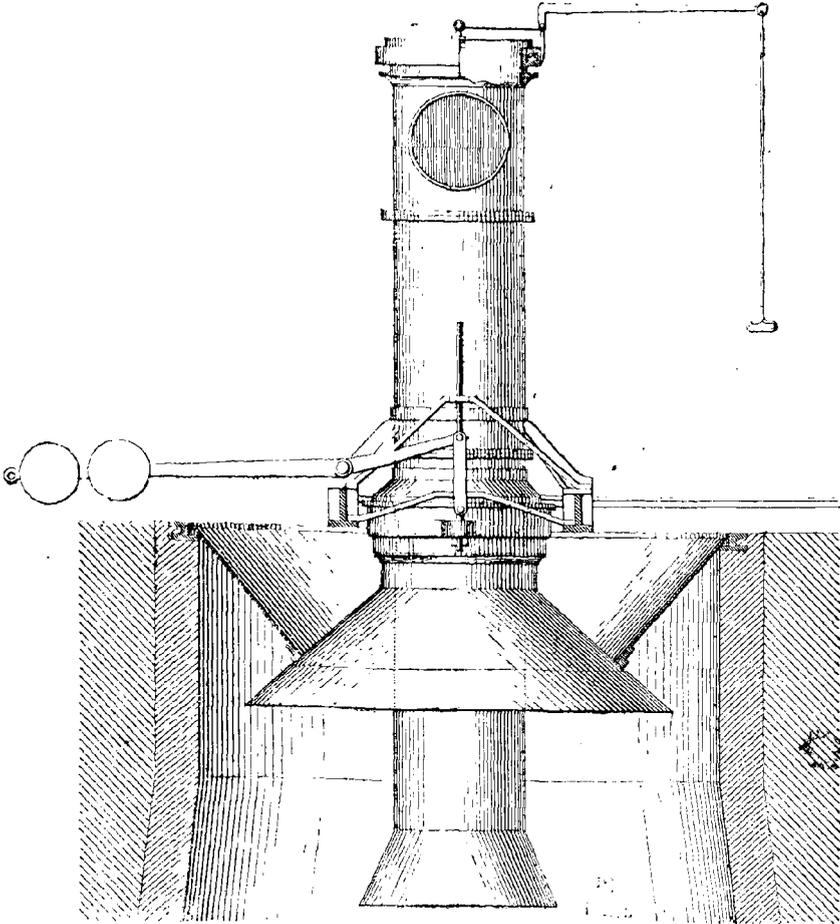


Fig. 11. — Appareil de chargement avec prise de gaz centrale.

Le rapport des diamètres du cône et du gueulard varie avec la nature des minerais; mais il y a toujours avantage à réduire le plus possible la distance du cône aux parois, de manière à assurer la projection directe du minerai contre la maçonnerie du haut fourneau.

Le mode de suspension et de guidage du cône dépend du système de chargement adopté. Lorsqu'on dispose de la pression hydraulique pour la manœuvre

du monte-charges, celle-ci peut-être aussi avantageusement employée pour la manœuvre du cône de fermeture.

La prise de gaz *cup and cone* représentée sur la figure 10, implique la sortie de gaz par deux ouvertures latérales. La figure 11 montre la disposition d'un appareil *cup and cone* avec une prise de gaz centrale. Celle-ci est en effet quelquefois préférée, et elle présente, au point de vue de la marche du haut fourneau, certains avantages que nous signalerons en étudiant le fonctionnement de l'appareil. Dans les deux cas, les gaz sont amenés dans de larges tuyaux en tôle qui les conduisent vers la partie inférieure du fourneau où ils sont employés au chauffage des chaudières ou bien des appareils à chauffer l'air. Lorsque les gaz sont abondants, ils suffisent souvent à ces deux destinations.

Lorsque la hauteur des fourneaux est considérable et que les prises de gaz latérales sont bien construites, on peut d'après quelques ingénieurs supprimer les appareils de fermeture du gueulard qui entraînent toujours une certaine complication. Les partisans de cette manière de faire ajoutent qu'on peut ainsi mieux surveiller la descente des charges, et que, d'autre part, le chargement étant plus facile à faire, est mieux fait par les ouvriers qui en sont chargés. Il peut se faire que dans certaines circonstances spéciales ce procédé puisse être employé, mais il entraîne certainement une perte de gaz combustible, et doit par suite être rejeté dans une exploitation économique.

Chemise intérieure et extérieure. — Toute la partie du haut fourneau comprise entre le gueulard et le creuset est formée d'une double maçonnerie qui porte le nom de chemise intérieure et extérieure. La chemise intérieure en contact immédiat avec les matières soumises au traitement métallurgique est toujours en briques réfractaires de premier choix, ou en matériaux naturels parmi lesquels les grès sont le plus souvent employés.

L'épaisseur de la chemise intérieure, les diverses dispositions adoptées pour rendre les étalages, le ventre, la cuve indépendants les uns des autres, le mode d'appareillage des briques, sont des questions qui doivent vivement attirer l'attention du constructeur de hauts fourneaux. La durée de l'appareil en dépend à un haut degré et les dépenses qu'entraîne une construction bien soignée, sont largement compensées par la régularité de la marche et la longueur de la campagne.

D'énormes piliers en maçonnerie ordinaire enveloppaient autrefois la chemise réfractaire des hauts fourneaux; comme le montre la figure 9, on ne pouvait accéder au fourneau que par des embrasures basses, étroites et profondes; on pensait préserver ainsi l'appareil du refroidissement et éviter les dilatactions. Le refroidissement par l'extérieur a été jugé depuis lors plus profitable que nuisible, en ce qu'il conserve les briques de la chemise intérieure; on a donc été conduit à remplacer les gros massifs qui donnaient au haut fourneau l'aspect d'une pyramide quadrangulaire, par une chemise extérieure cylindrique, blindée d'une enveloppe en tôle portant les consoles de la plate-forme du gueulard; la chemise cylindrique est elle-même portée par des colonnes en fonte qui entourent le creuset et qui, tout en le dégageant et en facilitant les diverses opérations qui sont souvent nécessaires autour de lui, donnent à la construction une élégance qui lui manquait autrefois.

Porte-vent; tuyères; buses. — Le creuset est comme le gueulard, la partie délicate du haut fourneau. Les appareils métalliques s'y retrouvent et leur construction ainsi que leur entretien exigent des soins particuliers. L'air chaud

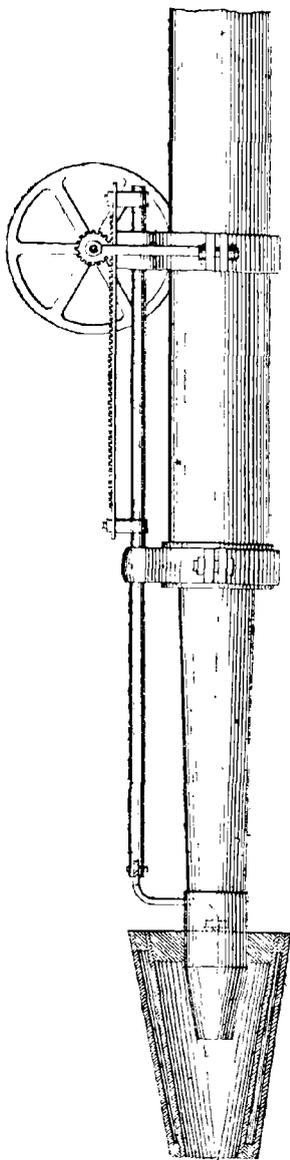


Fig. 12. — Tuyère et porte-vent (Coupe et vue latérale).

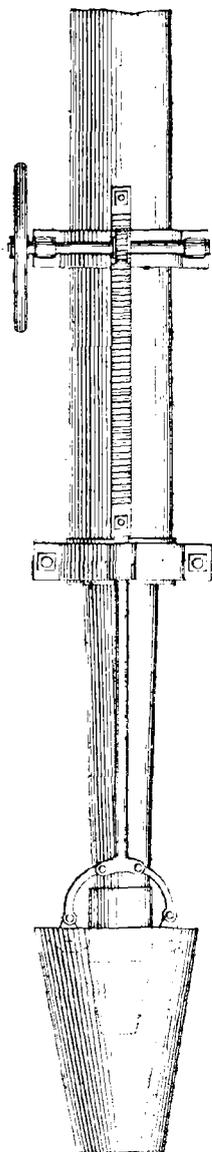


Fig. 13. — Tuyères porte-vent (Plan).

ou le vent, comme on le désigne dans la pratique, est pris aux appareils de chauffage par des tuyaux en tôle, avec enveloppe intérieure formée d'un ou de deux rouleaux de briques réfractaires destinées à éviter le refroidissement. La con-

duite de vent chaud entourant le haut fourneau se bifurque à chaque embrasure et se termine par un orifice rétréci portant le nom de *buse* ou *busillon*; celle-ci pénètre dans une sorte de tronc de cône à double enveloppe et à circulation d'eau qui se retrouve dans la plupart des fours à cuve où le vent chaud est employé et qui porte le nom de *tuyère*. Les tuyères se fabriquaient autrefois en soudant deux viroles de tôle sur deux bagues de fer; on employait également des tuyères en fonte qui avaient l'avantage de ne pas présenter de soudure. On se sert aujourd'hui le plus souvent de tuyères en bronze, ou mieux encore en cuivre rouge; fabriquées par emboutissage, elles offrent peu de chance de ces fuites qui en laissant l'eau s'écouler dans le haut fourneau peuvent être la cause d'accidents graves.

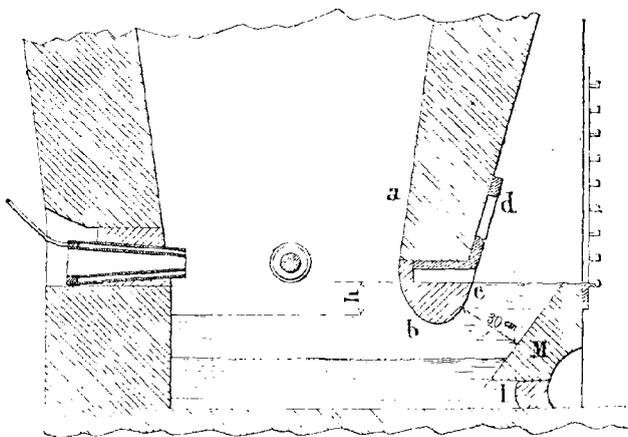


Fig. 14. — Avant creuset.

Quel que soit le système adopté, l'eau fraîche doit arriver au museau de la tuyère, c'est-à-dire dans la partie la plus rapprochée des matières en ignition. Il faut de plus que l'horizontalité de la tuyère soit bien assurée, car si elle plongeait, elle affinerait la fonte contenue dans le creuset et causerait un changement d'allure imprévu; si, au contraire, elle était inclinée en sens inverse, les gouttes de fonte et de laitier pourraient y pénétrer. Les figures 12 et 13 montrent en plan et en élévation les dispositions les plus usitées pour l'installation de la tuyère et du porte-vent. C'est dans la partie inférieure du creuset que s'opère l'évacuation de la fonte et des laitiers qui s'accumulent au-dessus d'elle. Ces opérations exigent une construction différente, suivant que le haut fourneau est à poitrine ouverte ou à poitrine fermée. Dans la disposition à *poitrine ouverte* on arrête la partie antérieure de la chemise à la hauteur des tuyères. La partie *a b c d*, désignée sous le nom de *tympe*, doit être très solide; l'avant-creuset est formé par un massif en briques réfractaires *M*, et la distance entre l'arrête de ce massif, qui porte le nom de *dame*, et celle de la tympe est d'environ 30 centimètres. La fonte s'écoule alors par l'ouverture *l*, tandis que les laitiers se déversent par-dessus la dame, et l'espace de 30 centimètres indiqué ci-dessus,

permet de les retirer au moyen de ringards et de crochets, lorsque leur trop grande viscosité rend l'écoulement naturel difficile.

La poitrine ouverte est sujette à des détériorations assez fréquentes; c'est de plus une cause de complications dans la marche de l'appareil. Elle était cependant nécessaire à l'époque où l'air n'étant chauffé qu'à une faible température, il se produisait facilement des engorgements de laitiers réfractaires, exigeant un travail dans le creuset. Aussi les fourneaux à poitrine fermée étaient surtout employés en Styrie, où la marche au charbon de bois jointe à la grande fusibilité des minerais mettait à l'abri de semblables accidents. Le chauffage de l'air à l'aide des appareils régénérateurs qui seront décrits plus loin a rendu les engorgements beaucoup moins à craindre. On a donc cherché à fermer entièrement

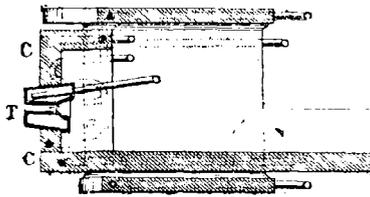


Fig. 15. — Tuyère Luermann (Coupe).

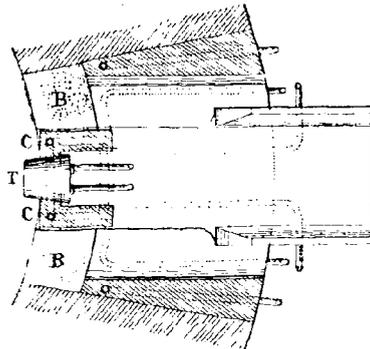


Fig. 16. — Tuyère Luermann (Plan).

le creuset, en ménageant pour l'écoulement des laitiers une ouverture spéciale. La meilleure combinaison a été proposée par l'ingénieur Luermann, qui a donné à son appareil représenté sur les figures 15 et 16 le nom de tuyère à laitier. Cette tuyère T en bronze et à courant d'eau est fixée pour assurer l'invariabilité de sa position dans une caisse en fonte à C parois refroidis par un serpentin noyé dans la masse. Cette caisse elle-même est placée dans une grande embrasure garnie d'un cadre en fonte avec serpentin; elle y est maintenue au moyen d'un bourrage en terre réfractaire B facile à percer en cas d'engorgement de la tuyère elle-même. Le centre de l'ouverture doit être à 0^m,30 ou 0^m,50 au-dessus du plan des tuyères soufflantes. On évite ainsi la perte de temps et de matériaux réfractaires dépensés presque à chaque coulée pour refaire la tympe et regarnir la dame et les parois de l'avant-creuset.

Le haut fourneau lui-même, se trouvant ainsi décrit d'une manière sommaire, il nous reste à mentionner les divers bâtiments et appareils qui l'entourent et en forment les annexes indispensables. Nous ne nous arrêterons pas longtemps aux *halles de coulée* qui, construites avec un luxe plus ou moins grand, abritent les *chantiers* dans lesquels la fonte liquide vient se répandre dans des rigoles en sable où elle se solidifie sous forme de *gueusets*. Dans les grands hauts fourneaux marchant en fonte de moulage ou d'affinage destinée au commerce, ces halles occupent des espaces considérables. Elles sont moins étendues lorsque la fonte produite est traitée dans un atelier Bessemer, situé dans le voisinage; dans tous les cas, elles sont traversées par des voies ferrées sur lesquelles des wagonnets enlèvent rapidement les produits de chaque coulée, de manière à éviter l'encombrement.

A proximité de ces bâtiments se trouvent les installations destinées à l'enlèvement des laitiers. Là où l'on traite des minerais pauvres, ces laitiers représentent un volume considérable, et il est peu d'usines pour lesquelles ils ne deviennent pas à la longue un embarras. Leur utilisation industrielle sous forme de matériaux de construction et d'entretien des routes, est absolument hors de rapport avec la quantité produite dans les divers centres métallurgiques. On cherche donc autant que possible à les rendre facilement transportables, soit sous forme de sable plus ou moins grossier ou de gâteaux rectangulaires, et à les amener dans de vastes emplacements tels que le fond d'une vallée sauvage où ils peuvent s'accumuler pendant une longue série d'années.

On a dans ces derniers temps cherché à utiliser, pour la fabrication du ciment, les laitiers obtenus dans le traitement des minerais de Meurthe-et-Moselle. Lors de la visite du Congrès de la Société de l'industrie minérale, le procédé était à l'étude aux hauts fourneaux de Saulnes, appartenant à MM. G. Raty et Cie.

Machines soufflantes. — Les appareils nécessaires pour la production du vent forcé et pour son chauffage méritent de nous arrêter plus longtemps. Le point de départ des premiers est le soufflet de forge, dont la disposition est bien connue; aspirant et comprimant l'air par un mouvement alternatif, il produit un courant à peu près régulier. Cet appareil primitif n'est plus utilisé dans les hauts fourneaux, même les plus petits, et il a été remplacé par un cylindre dont les deux couvercles sont munis de clapets et de soupapes, dont le nombre et la disposition peuvent varier de bien des manières. Le cylindre qui se meut dans le piston peut être actionné soit directement, soit au moyen d'un balancier. Lorsque la machine est à action directe, le cylindre à vapeur et le cylindre à vent peuvent être tous deux horizontaux ou tous deux verticaux. Il n'y a pas à cet égard, pas plus que pour les souffleries Bessemer, de règles précises. Toutefois aujourd'hui qu'un haut fourneau exige par minute plusieurs centaines de mètres cubes d'air à des pressions pouvant atteindre jusqu'à vingt-cinq et trente centimètres, le type vertical, est choisi de préférence par les usines de *Seraing* et du *Creusot*, qui se sont acquises dans ce genre de construction une juste célébrité.

Le bâtiment renfermant les machines soufflantes pouvant être mis en communication avec le haut fourneau au moyen d'appareils électriques ou autres, en est souvent assez éloigné. Les tuyaux de conduite qui rachètent cette distance ser-

vent alors de régulateurs du vent, et on évite ainsi l'emploi de réservoirs en-tôle qui *sinon* contribueraient à encombrer les abords du haut fourneau.

La machine soufflante d'un seul haut fourneau absorbant à elle seule une force de plusieurs centaines de chevaux, on trouve nécessairement dans son voisinage une batterie de chaudières. Les considérations sommaires que nous avons présentées dans le volume de cette *Encyclopédie* sur *Les aciers* trouvent également leur place ici, en tenant compte de ce fait déjà signalé, què les gaz recueillis au gueulard du haut fourneau doivent être utilisés pour le chauffage des chaudières lorsque les appareils à air chaud en laissent une partie disponible.

Appareils à air chaud. — On sait que la température de combustion croît.

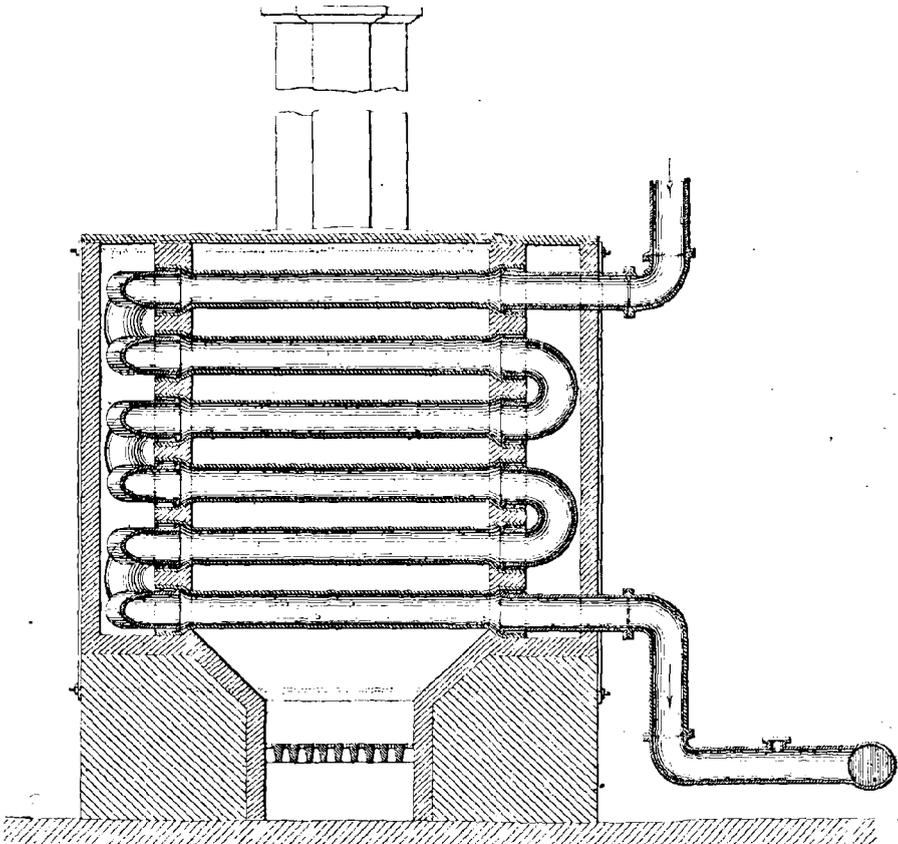


Fig. 17. — Appareil à air chaud à tuyaux en fonte.

avec la température de l'air comburant jusqu'aux limites de la dissociation. L'air chaud économise donc dans le fourneau même où il est injecté une somme de calories égales à celle qu'il apporte ; mais par cela même, comme le fait très bien remarquer Gruner, s'il fallait brûler pour chauffer le vent un combustible de même valeur que celui qui est consommé dans le haut fourneau, l'économie pour-

rait paraître douteuse. Les gaz combustibles sortant du gueulard donnent la solution économique du chauffage de l'air ; aussi l'emploi de l'air chaud pour la fabrication de la fonte est-il aujourd'hui entièrement généralisé. On croyait autrefois que la marche à l'air chaud nuisait à la qualité du produit ; mais on peut toujours avec un dosage convenable obtenir la qualité qu'on désire, quelle que soit la température du vent.

Pendant longtemps le chauffage de l'air a été obtenu par simple conductibilité en ce sens qu'on faisait passer l'air sortant de la machine soufflante dans une série de tuyaux en fonte placés dans une enceinte de maçonnerie fortement échauffée. Suivant que les tuyaux étaient horizontaux ou verticaux, suivant leur section ou leur forme, on distinguait les appareils *Calder*, *Wasseraufingen*, à pistolet, etc. C'est là un point sur lequel l'imagination des inventeurs s'est aussi donné libre carrière, mais quel que fût le type employé, on dépassait difficilement la température de 350 à 400 degrés. De plus, ces tuyaux portés constamment à une haute température étaient sujets à des détériorations rapides, et l'entretien des appareils à air chaud représentait un facteur d'une certaine importance dans les frais de façon de la fonte. La figure 17 donne une idée de ces anciens appareils, dont l'usage tend à se restreindre de plus en plus.

M. Whitwell, maître de forges du nord de l'Angleterre a eu l'idée en 1865 d'utiliser le principe de la régénération de la chaleur pour le chauffage du vent des hauts fourneaux. Son appareil consiste en un grand cylindre en tôle dans lequel l'air circule dans un long serpentín formé par des cloisons en briques réfractaires. La figure 18 représente une coupe d'un appareil semblable auquel on donne maintenant jusqu'à 20 mètres de hauteur ; la légende qui l'accompagne permet de se rendre compte du fonctionnement de toutes les parties. Malgré ces dimensions considérables, il faut au moins trois appareils pour alimenter un haut fourneau, et la dépense de construction de chacun d'eux représente une somme d'environ 30,000 francs. La possibilité de porter la température de l'air au moins à 700 degrés, et la réduction des frais d'entretien compensent cette dépense de premier établissement relativement considérable.

a Valve à gaz ; elle est, ainsi que son siège, munie d'une circulation d'eau.

a¹ Registre de sécurité, permettant de vérifier, pendant la marche, l'étanchéité de la valve a.

a² Treuil et chaîne pour manœuvre de la valve a.

b Chambre de combustion dans laquelle l'air chaud et divisé favorise la combustion des gaz.

e e e Série de carnaux dans lesquels s'effectue simultanément la première descente des gaz.

f Valve pour régler la quantité d'air qui passe dans les carnaux g g.

g g Carnaux dans la sole chauffant une partie de l'air nécessaire à brûler les gaz. Ils alimentent le bas de la chambre de combustion par les orifices g¹ g¹.

h Valve pour régler la quantité d'air qui passe dans les carnaux i i.

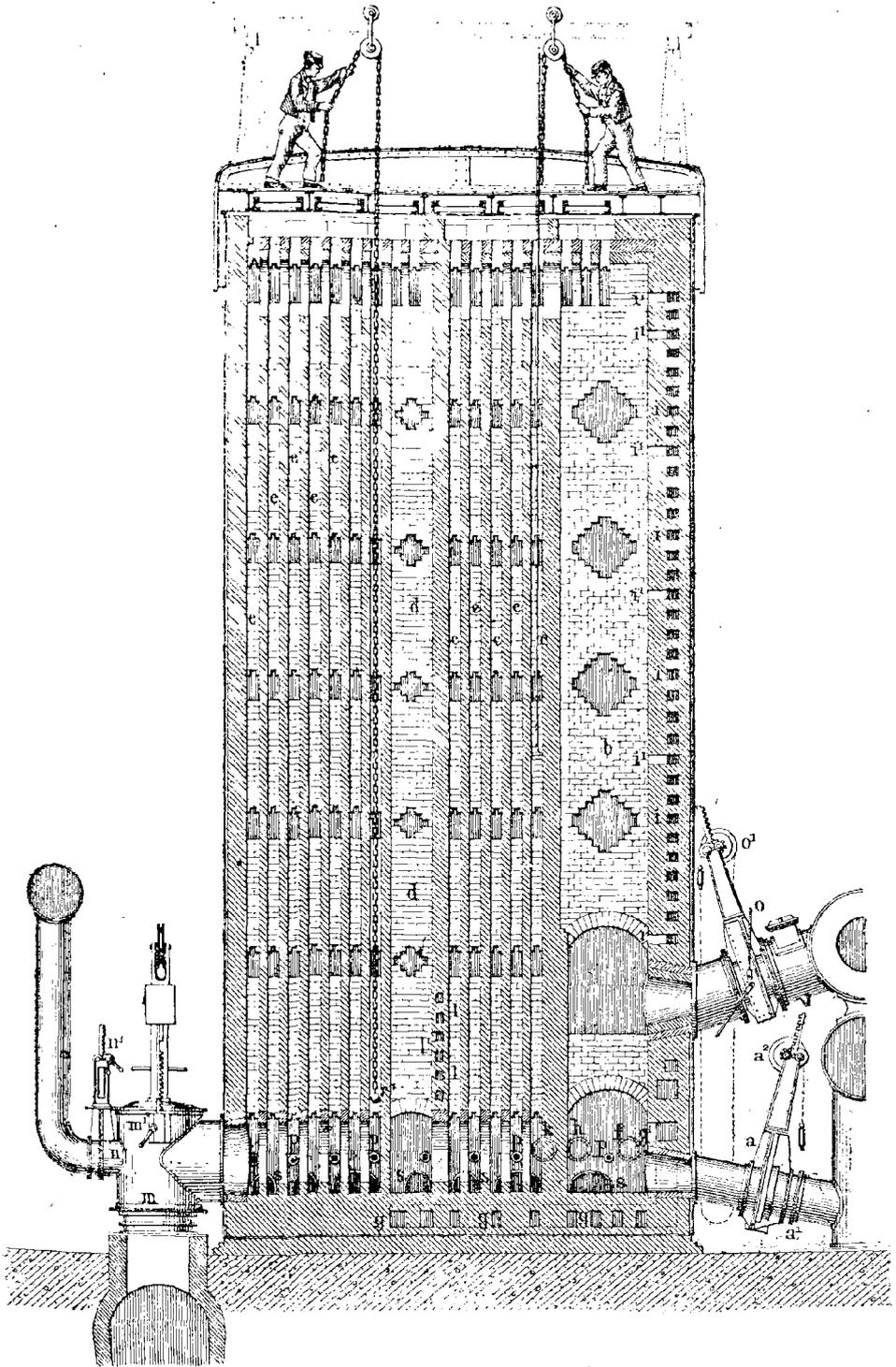


Fig. 18. — Appareil Whitwell pour le chauffage de l'air.

- i i* Carneaux dans le mur circulaire chauffant l'air de combustion qui alimente les orifices *i¹* *i²* échelonnés sur toute la hauteur de la chambre de combustion.
- k* Valve pour régler la quantité d'air qui passe dans les carneaux *l l*.
- l l* Carneaux dans le mur circulaire chauffant le complément de l'air de combustion ; ils alimentent les orifices *l¹* *l²* placée au bas de la deuxième montée.
- m* Valve de fumée manœuvrée par le treuil *m¹*.
- n* Valve à vent froid ; elle est manœuvrée par le treuil à manivelle *n¹*.
- o* Valve à vent chaud ; elle est, ainsi que son siège, munie d'une circulation d'eau.
- o¹* Treuil et chaîne pour manœuvre de la valve *o*.
- p p* Lunettes de regard permettant d'examiner la combustion, et par suite de régler convenablement les arrivées d'air et de gaz.
- q q* Portes de nettoyage du haut.
- r r¹* Racloir à tige et racloir à boulet pour gratter la surface des carneaux ; on peut les manœuvrer soit directement à la main, soit au moyen d'une poulie de renvoi.
- s s* Portes de nettoyage du bas permettant de retirer les poussières détachées par les racloirs.

Les appareils Cowper, qui sont aussi fréquemment employés, diffèrent des appareils Whitwell par les dimensions des carneaux verticaux et leur mode de garnissage.

Au lieu de cloisons verticales continues donnant des circuits longs et étroits, ayant toute la hauteur de l'appareil, les compartiments des appareils Cowper sont plus larges et sont remplis de briques réfractaires posées en forme de claire-voie, comme dans les régénérateurs des fours Siemens.

On admet que les appareils Cowper produisent plus d'effet que les précédents, mais leur nettoyage est plus difficile, et lorsque les gaz du gueulard entraînent beaucoup de poussière, il paraît préférable de renoncer à leur emploi. Dans la région de Longwy, où des études comparatives ont pu facilement être faites, les appareils Whitwell et Cowper sont à peu près en nombre égal.

Pompes et appareils hydrauliques. — La description que nous venons de faire montre que l'eau, soit comme moteur, soit comme agent refroidissant, intervient toujours dans la marche du haut fourneau. Outre les tuyères, le creuset est presque partout refroidi par des nappes d'eau qui diminuent l'usure rapide des briques dont il est composé. Un système de pompes est donc le complément indispensable d'un haut fourneau construit d'après les derniers progrès réalisés.

La figure 49 montre l'emplacement respectif d'un appareil Whitwell par rap-

port au haut fourneau qu'il dessert. Comme il sera expliqué plus loin, il faut pour un haut fourneau au moins trois appareils disposés soit sur une ligne droite, soit sur un arc de cercle.

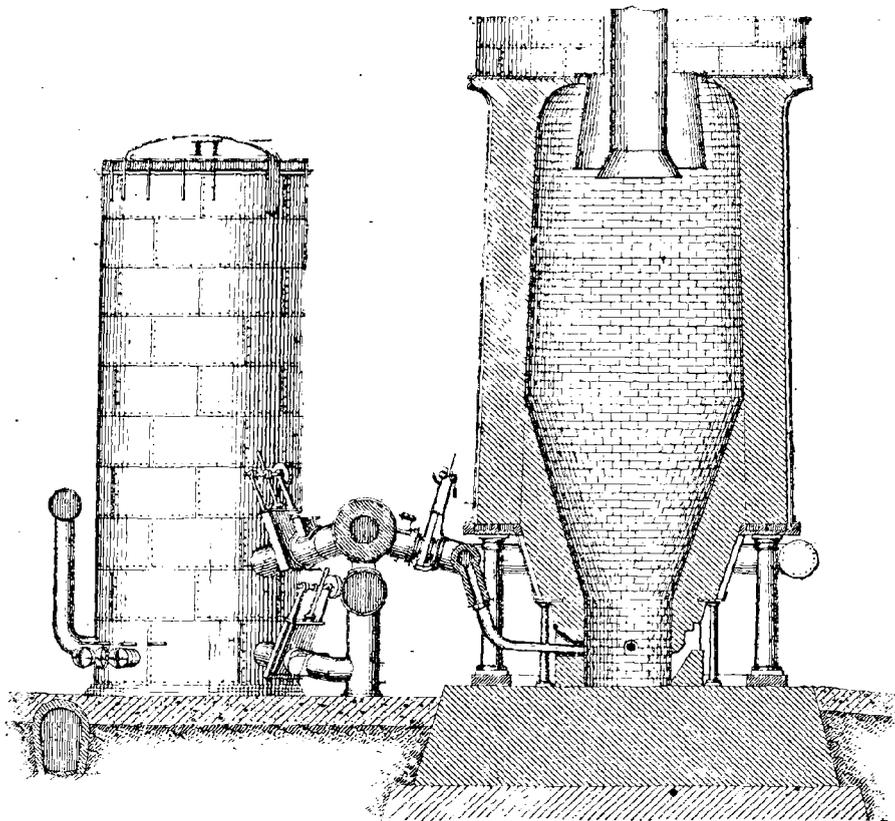


Fig. 19. — Haut fourneau avec des appareils Whitwell le desservant.

CHAPITRE VIII

ROULEMENT DU HAUT FOURNEAU

Dosage du haut fourneau; son calcul et sa vérification. — Mise en feu. — Dérangements d'allure et accidents. — Mise hors feu. — Campagne du haut fourneau.

La conduite d'un haut fourneau est, nous l'avons dit déjà, une des fonctions qui imposent à l'ingénieur la responsabilité la plus lourde et la plus constante. Un haut fourneau muni de tous les perfectionnements que nous venons de décrire représente un capital de plus d'un million. Si un accident survenu dans la marche du haut fourneau ne compromet pas entièrement la valeur de ce capital, il y porte atteinte de deux manières. D'une part, un accident grave obligeant à une mise hors feu, exige la réfection de la chemise intérieure et entraîne souvent une réparation coûteuse des appareils de chargement et de prise de gaz; mais en outre cette réfection obligeant à laisser pendant plusieurs semaines, quelquefois pendant plusieurs mois l'usine inactive, le capital tout entier reste improductif, heureux encore si des engagements de livraison pris avant que l'accident ne soit survenu ne viennent pas créer à l'exploitant des difficultés commerciales à côté desquelles les difficultés techniques sont souvent peu de chose. Nous insisterons donc particulièrement dans ce chapitre sur les moyens de prévenir les accidents et d'en atténuer les conséquences.

Calcul et vérification du dosage. — On désigne, sous le nom de *dosage* d'un haut fourneau, le calcul au moyen duquel on détermine la proportion de minerais, de fondants et de combustibles à employer pour obtenir la fonte et le laitier le plus approprié. Par extension on en est venu à désigner sous ce nom le mélange lui-même et dans ce cas, dosage est synonyme de *lit de fusion*.

Le calcul du dosage est une opération chimique fort simple, mais elle exige la connaissance de la composition des matières qui interviennent; négligeant les éléments volatils, et les autres corps existant en quantité minime, on se donne généralement a priori la composition que doit avoir le laitier réduit à la silice, la chaux, la magnésie et l'alumine, et on examine dans quelle proportion les minerais et les cendres du combustible employé peuvent fournir les éléments de ce laitier; le corps qui manque (c'est presque toujours la chaux) est alors ajouté

sous forme de castine, et la quantité totale des matières à charger se trouve ainsi déterminée.

En pratique la chose est bien moins facile qu'elle ne paraît l'être ici par suite de la variation constante des matières employées. Si on peut admettre que la composition de la castine reste assez constante, il est bien loin d'en être ainsi pour les minerais ; leur teneur en fer, surtout pour les minerais en roche, peut varier rapidement de plusieurs unités, et nous avons vu que la gangue n'est pas sujette à de moindres variations. La teneur en cendres du combustible change aussi souvent ; de plus les circonstances atmosphériques obligent à charger des matières plus ou moins humides ; enfin le manque de soin des ouvriers dans le chargement, dans le chauffage des appareils peut amener des changements d'allures qui ne peuvent être corrigés que par des changements de dosage. C'est ainsi que l'allure réagit constamment sur le dosage, et le dosage à son tour sur l'allure : c'est là un point fondamental qu'on ne doit jamais perdre de vue dans la conduite d'un haut fourneau.

La quantité totale du lit de fusion passée dans le haut fourneau en une journée de 12 heures est ordinairement fractionnée en un certain nombre de parties égales qui portent le nom de charges. C'est ainsi que la charge d'un haut fourneau peut être de 2,000, 2,500, 3,000 kilog., et on entend par là que l'on n'ouvre le gueulard que pour y introduire à la fois 2,000, 2,500 ou 3,000 kilog. du mélange de minerai et de castine. On fixe également à priori le poids de la charge de combustible, et celle-ci reste ordinairement constante, quelles que soient les circonstances qui surviennent, tandis que la charge de minerai peut être augmentée si la température du haut fourneau s'élevant, on tombe dans l'allure chaude donnant une fonte plus grise que la fonte désirée, ou bien diminuée si on arrive au contraire à une allure froide, donnant une fonte blanche qui n'est point celle qu'on a en vue.

On charge alternativement le minerai et le combustible et on juge de la marche du haut fourneau par le nombre de charges faites en 12 heures, en ne tenant compte que du nombre de charges de minerai. « Combien le haut fourneau a-t-il fait de charges cette nuit ? » tel est la première question de l'ingénieur, lors de sa visite matinale : « Dix-huit charges, mais il allait un peu vite ; à partir de la dixième, nous avons supprimé 100 kilog. de minerai. » C'est là une des réponses qu'on obtient en pareil cas, et qui permettent, jointes à un examen de la fonte et des laitiers pris à intervalles réguliers, de suivre la marche de l'appareil.

La connaissance de la teneur totale en fer des minerais telle quelle est donnée par les analyses du laboratoire et le nombre de charges passées par 24 heures, permet d'établir un rendement théorique qu'il est très utile de comparer avec le rendement réel du fourneau. Le rendement réel est généralement inférieur au rendement théorique, parce qu'une certaine quantité de fer passe toujours dans le laitier, mais il fournit un contrôle utile de l'exactitude du chargement. Il est au moins aussi intéressant de comparer le poids total des laitiers produits avec celui qui résulte des calculs faits pour la détermination des dosages. On recourt rarement à ce contrôle, parce que le laitier étant un produit sans valeur, aucune disposition n'est prise pour en permettre le pesage ; mais cette vérification peut dans certains cas avoir une réelle utilité.

Mise en feu du haut fourneau. — Quel que soit le dosage employé et la fonte à produire, la mise en marche d'un haut fourneau, *la mise en feu* suivant l'expression consacrée, exige toujours des soins particuliers. On procède néanmoins aujourd'hui d'une façon à la fois plus sommaire et plus rationnelle qu'on ne le faisait il y a quelque vingt ans. En effet les anciens hauts fourneaux, de construction très massive, appareillés avec de gros blocs réfractaires en pierre siliceuse ou en briques, devaient être chauffés très lentement. Un foyer construit à la place de la dame chauffait très doucement au début, puis activement jusqu'à ce que le creuset fût porté au rouge ; à ce moment, on versait du charbon ou du coke dont on remplissait entièrement le fourneau, et alors seulement commençaient les charges de minerai. Le foyer était enlevé et on fermait avec du sable le devant du creuset. Pour propager le feu sur toute la hauteur du fourneau, on faisait des grilles avec des barres de fer ; l'air entrait par l'ouverture de l'avant-creuset, et le combustible brûlait sur la grille. Après une heure environ, on retirait les barreaux, on bouchait les ouvertures et on attendait 12 ou 24 heures pour faire une nouvelle grille. A chaque fois on enlevait le combustible à demi consumé, le mâchefer et les cendres qui remplissaient le creuset. On continuait ainsi jusqu'à l'arrivée du minerai dans l'ouvrage ; à ce moment, on plaçait la dame, puis on donnait le vent.

Aujourd'hui on simplifie beaucoup cette procédure coûteuse et compliquée ; d'ailleurs l'emploi de la poitrine fermée ne permettrait plus le chauffage progressif au moyen des grilles. On se borne donc à jeter du bois dans le creuset et dans l'ouvrage ; puis une dizaine de tonnes de coke, puis la première charge de minerai représentant environ la moitié d'une charge normale. On achève ensuite de remplir le fourneau de charges alternatives de minerai et de combustible de telle sorte, que le poids des dernières charges représente les trois quarts de la charge normale. On continue ainsi jusqu'à ce que la fusion devant les tuyères ait indiqué si on peut faire d'autres augmentations.

Pour mettre en feu, on allume le menu bois du creuset qu'on laisse ouvert ainsi que les embrasures destuyères ; quand le feu a gagné jusqu'aux étalages on pose les tuyères, et on ferme le trou de coulée avec de la terre peu tassée ; puis on laisse couvrir le feu pendant une journée entière, en faisant entrer un peu d'air par l'œil des tuyères. Au bout de ce temps, on peut commencer à donner le vent avec des busillons de 5 à 6 centimètres de diamètre et une pression de 4 à 5 centimètres de mercure.

Le haut fourneau lui-même n'est point le seul appareil qui doive attirer l'attention dans une mise en feu. Les gaz sortant du gueulard sont, comme on sait, employés au chauffage des appareils destinés à chauffer l'air ; or, la bonne marche du fourneau dépendant à son tour de la température du vent et de la pression de l'air, il y a là un cercle vicieux, dont les conséquences se produisent lors de tous les accidents. On a quelquefois cherché à y remédier en annexant aux grands hauts fourneaux un gazogène spécial qui fournit en cas de mauvaise marche du fourneau le secours dont on a besoin.

Marche normale du haut fourneau. — La mise en feu du haut fourneau étant achevée nous voudrions faire ici un tableau rapide de l'activité dont il est

le centre. Le monte-charge apporte de son mouvement régulier les wagonnets chargés de minerai et de coke. Les chargeurs installés à poste fixe au gueulard et relevés toutes les douze heures enlèvent les wagonnets, en distribuent le contenu sur tout le pourtour de l'appareil de chargement. Enfin le cône est baissé et en un instant toute la charge est engloutie dans les flancs de l'appareil. Le bon entretien de l'appareil de chargement, le relevé de la température des gaz qui y sont recueillis, ce sont à peu près les seuls soins qu'exige la partie supérieure du haut fourneau.

Il n'en est pas de même de la partie inférieure, où l'opération de fusion s'achève. Le maître fondeur doit y vaquer, avec ses aides à des soins divers et multiples. C'est d'abord la préparation du chantier où la fonte doit venir se solidifier en gueusets, ou tout au moins de la rigole qui doit conduire la fonte à la poche de l'atelier Bessemer. Le bouchage et le débouchage du trou de coulée, la préparation des outils qui servent à ce débouchage rentrent ainsi de la manière la plus directe dans ses attributions ; mais il doit en outre par un examen fréquent des tuyères voir si la descente des charges, et le phénomène de la fusion s'opèrent d'une manière régulière. Il doit aussi, en constatant périodiquement la température et la pression du vent, tenir constamment en main les deux moyens d'action qu'il possède pour modifier la marche du haut fourneau dans le cas où cela deviendrait nécessaire.

Lorsque l'écoulement des laitiers se faisait par la poitrine ouverte, le nettoyage et l'entretien de cette large ouverture constituait une des tâches pénibles des fondeurs. Avec l'emploi de la tuyère Luermann, on se contente de déboucher de temps à autre cette tuyère et le laitier s'écoule par une rigole spéciale dans les appareils destinés à son enlèvement.

La coulée de la fonte, qui est en somme l'opération importante, se fait autant que possible à heures réglementaires ; quand le creuset a une capacité suffisante et que les chantiers abrités par des halles de coulée sont assez étendus, on cherche à ne faire que deux coulées par jour, au moment du changement de poste des ouvriers, soit à 6 heures du matin et à 6 heures du soir. Cette régularité est forcément compromise lorsqu'on prend la fonte liquide pour l'atelier Bessemer auquel cas le remplissage des poches dépend forcément des éventualités qui se produisent dans le roulement de cet atelier. Quoi qu'il en soit, on emploie pour le bouchage un tampon d'argile qu'on refoule aussi loin que possible de manière à éviter que sous la pression de la fonte liquide, le bouchage ne cède, ce qui pourrait entraîner de graves accidents. Pour percer le trou de coulée, on se sert de ringards ou de ciseaux en acier. Les ringards sont des barres rondes de 3 à 5 centimètres de diamètre, et de 2 à 3 mètres de longueur, appointées à leur extrémité. Les ciseaux ont le bout aplati et coupant, et on s'en sert souvent comme d'un fleuret de mineur, c'est-à-dire en tournant de quelques degrés après chaque coup. Ces outils sont enfoncés ordinairement à la masse, que le fondeur et ses aides manœuvrent à tour de rôle pendant quelques minutes. Si, comme il arrive quelquefois, on se heurte derrière le tampon à une croûte de fonte et de laitier durci, on enfonce le ringard et le ciseau au moyen d'un mouton, lourde barre de fer munie d'une tête plus large, et balancée par quatre hommes au moins, quelquefois dix ou douze. Malgré ces efforts, on voit quelque-

fois des trous de coulée résister pendant longtemps au débouchage et occasionner ainsi une perte de temps préjudiciable au roulement du haut fourneau.

Dérangements et accidents du haut fourneau — Il importe de distinguer dans la marche d'un haut fourneau les dérangements et les accidents. Les dérangements sont presque inévitables ; ils résultent, nous l'avons dit, des variations, dans la composition des matières traitées et des irrégularités dans les chargements ; tous les praticiens connaissent la fâcheuse influence à cet égard des dimanches et jours de fêtes. On les combat par des variations dans la composition de la charge, par une élévation de température, en forçant la marche des appareils à air chaud, et par une diminution ou une augmentation du vent donné, facilitée par un changement de diamètre des busillons.

Le dérangement résultant d'une allure trop chaude se manifeste par un rétrécissement du creuset qui s'encombre de graphite et de laitiers très pâteux et réfractaires dont l'écoulement devient difficile et s'arrête. On y remédie en diminuant la teneur en chaux du lit de fusion et en y introduisant un minerai siliceux et fusible ; les scories de forge à cet égard sont d'un emploi avantageux. Le dérangement résultant d'une allure froide est plus grave ; accompagné d'une réduction incomplète, il produit des laitiers de plus en plus ferrugineux, tellement que le fer tout entier finit par y passer et que la production de fonte s'arrête ; si la fonte continue à arriver au creuset elle y reste pâteuse et se moule difficilement, jusqu'au moment où la diminution du poids de la charge, secondée par un chauffage énergique de l'air, amènent la fusion de ce loup naissant et permettent de reprendre la marche régulière.

Lorsque le dérangement persiste, il devient accident et nécessite l'emploi de mesures exceptionnelles. La sole du creuset remontant par suite de l'accumulation des matières imparfaitement fondues, il peut devenir nécessaire de percer dans le creuset des ouvertures permettant de souffler le vent chaud à un niveau supérieur au niveau normal des tuyères. Il arrive souvent en effet en pareil cas que les charges forment au-dessus du creuset une sorte de pont qui empêche la descente ; on dit alors que le fourneau est *accroché*, et il importe de fondre le plus promptement possible cette agglomération insolite. Lorsque cette fusion a lieu, la colonne tout entière descend d'un seul coup et l'ébranlement qui en résulte peut rebouler toute la paroi du creuset, en mettant en danger la vie du personnel occupé autour du haut fourneau. C'est là un accident grave et qui malheureusement se rencontre dans les exploitations les mieux conduites.

Sans tourner à l'accident, l'*accrochage* et les sauts de charge qui en sont la conséquence sont donc des difficultés constantes de la marche du haut fourneau. C'est par un chargement régulier et par une prise de gaz centrale bien disposée qu'on peut le plus facilement les combattre sans les éviter entièrement.

Deux autres causes peuvent amener dans les hauts fourneaux des accidents graves. Ce sont les fuites de tuyères, et l'usure inégale de la maçonnerie réfractaire en contact avec les matières en fusion.

Malgré tous les soins pris pour la fabrication des tuyères, il n'est pas rare que celles-ci laissent s'écouler dans l'intérieur du fourneau une partie de l'eau qui les parcourt en vue d'assurer leur refroidissement. Si cet écoulement d'eau est

considérable, les matières fondues peuvent se figer et il en résulte un engorgement du creuset analogue à celui qui provient d'une allure trop froide ; une fuite moindre, même continue, n'arrête pas la fusion, mais elle oxyde la fonte, en attaquant d'abord le silicium ; dans certains cas, l'eau se transforme en vapeur sans réagir immédiatement sur les matières en fusion. Il peut en résulter une explosion amenant la destruction du creuset avec toutes les conséquences qu'elle entraîne.

Une autre série d'accidents peut provenir de l'usure irrégulière et anormale de la maçonnerie du haut fourneau. Cette usure peut avoir pour conséquence l'éroulement total ou partiel de la chemise. Ce sont naturellement le creuset et l'ouvrage qui sont les plus exposés, et on ne saurait croire avec quelle habileté les fondeurs, secondés par des maçons exercés, arrivent à réparer et même à remplacer entièrement un creuset de haut fourneau usé en évitant la mise hors feu de l'appareil, qui entraîne toujours, comme nous l'avons dit, de grosses conséquences. Le procédé ordinairement employé consiste à démolir la maçonnerie, devenue insuffisante, et à la remplacer par une paroi factice en argile, plus rapprochée du centre du creuset et soutenant toute la colonne des matières. A l'abri de cette paroi, la nouvelle maçonnerie se lève et, lorsque le creuset se trouve ainsi reformé, la paroi adventice fond avec les matières du lit de fusion, et le fourneau reprend sa marche ordinaire. La réparation est plus difficile à réaliser si la brèche se produit vers le ventre du fourneau, mais là encore le remède indiqué ci-dessus peut être appliqué. S'il échoue, le haut fourneau devant être mis hors feu dans tous les cas, on comprend que l'ingénieur déploie toute son intelligence et toute son énergie dans une tentative qui, si elle n'occasionne pas d'accidents de personne, ne peut avoir que de bons résultats.

Mise hors feu. — Quelles que soient les précautions prises pour la bonne marche d'un haut fourneau, il arrive un moment où la chemise s'est assez amincie pour qu'une réfection complète soit nécessaire. L'élargissement de la cuve, même lorsqu'il n'a pas pour conséquence des irrégularités de l'allure, occasionne une augmentation de la dépense de combustible, et c'est à l'ingénieur d'établir la balance entre la dépense résultant du combustible inutilement dépensé et celle provenant de l'intérêt et de l'amortissement de la chemise nouvelle. On désigne sous le nom de *campagne* le temps qui s'écoule entre deux mises hors feu, et la durée de ces campagnes est très variable ; nous avons vu fréquemment des hauts fourneaux exiger une réfection complète au bout de deux ou trois ans, d'autres durent dix, douze ou même quinze ans. Nous ne croyons pas être loin de la vérité en attribuant à la moyenne des hauts fourneaux construits en France avec des briques réfractaires de la meilleure qualité une durée moyenne de huit à dix ans.

La mise hors feu du haut fourneau consiste à le vider entièrement, ce qui doit s'obtenir naturellement en cessant le chargement ; il y a toutefois quelques précautions à prendre. Quand le niveau des charges a baissé de quelques mètres, il serait imprudent de conserver le gueulard fermé ; il reste dans la cuve une vaste chambre remplie de gaz qui pourrait faire explosion par une rentrée d'air, ou si le vent des tuyères y pénétrait directement. En outre, les gaz du haut fourneau

n'étant plus refroidis par des matières fraîches incessamment chargées au gueulard, les appareils métalliques qui les reçoivent risquent d'être portés au rouge et de subir par suite des détériorations.

On évite souvent ces difficultés en remplaçant, lors de la mise hors feu, les charges de coke et de minerai par de la pierre à chaux ; les gaz chargés d'acide carbonique cessent alors d'être explosifs avant que le fourneau soit à moitié vide, et le gueulard ne s'échauffant pas, l'enlèvement des pièces métalliques devient inutile. Ces avantages compensent amplement la dépense résultant du chargement de 50 à 60 tonnes de calcaire et de leur enlèvement.

Malgré toutes les précautions prises, la mise hors feu d'un haut fourneau laisse quelquefois dans le creuset un gros bloc formé d'un mélange de laitier, de fonte et de coke qu'on n'arrive souvent à débiter qu'à l'aide d'explosifs et dont l'enlèvement retarde la réfection de l'appareil. Avec les haut fourneaux à poitrine fermée et le chauffage de l'air à haute température, ce danger est maintenant moins à redouter.

CHAPITRE IX

CLASSIFICATION ET PROPRIÉTÉS DES FONTES BRUTES

Fonte graphiteuse, grise, truitée, blanche. — Fonte de moulage et d'affinage. — Influence des métalloïdes et des métaux sur les propriétés physiques et mécaniques des fontes.

Le haut fourneau et son fonctionnement étant aujourd'hui connus, ce chapitre sera consacré à l'examen des diverses sortes de fonte ainsi qu'à celui des laitiers qui les accompagnent et servent constamment de contrôle pour leur qualité. Cet examen peut être fait à bien des points de vue. Prend-on comme point de départ l'aspect physique, on aura les fontes *graphiteuses*, presque noires dans leur cassure, les fontes *grises*, *truitées blanches*, *lamelleuses*, *spéculaires*. Si l'usage auquel la fonte est destinée est surtout pris en considération, on distingue alors les fontes de *moulage*, *d'affinage*, les fontes *Bessemer*, *Thomas*, etc. Dans certains cas, le lieu de provenance sert à la dénomination ; nous citerons comme exemple les fontes anglaises et écossaises, et parmi celles-ci certaines marques spéciales sont particulièrement recherchées. Il convient toutefois de remarquer qu'avec les progrès de la chimie ces préférences locales tendent à disparaître. On s'inquiète moins aujourd'hui de la provenance d'une fonte que de son analyse exacte et de ses propriétés physiques, qui doivent seules servir de guide dans son emploi.

Parmi les corps associés au fer dans la fonte, il en est qui s'y rencontrent d'une manière constante et en quelque sorte inévitable. Ce sont le carbone, le silicium, le soufre et le phosphore. Leur influence doit donc être tout particulièrement étudiée avant d'examiner celle des autres métaux et métalloïdes qui se rencontrent dans les fontes accidentellement.

1° Influence du carbone. — Le carbone est introduit dans la fonte par le combustible (coke, houille ou charbon de bois) employé à la fusion : son affinité pour le fer est proportionnelle à la température ; probablement nulle à froid, elle est énergique à la température élevée du haut fourneau ; la fonte peut alors se dissoudre jusqu'à 7 pour 100 de son poids. Le refroidissement la sursature et une partie du carbone se précipite à l'état de graphite. Si ce graphite est en grand

excès, il se sépare dans le creuset du fourneau, puis à la coulée, jusqu'à ce que la fonte se fige. Il n'est pas rare, si l'on se tient au moment de la coulée près d'un haut fourneau marchant en fonte grise, de se voir couvert de minces paillettes graphiteuses. La précipitation se continue durant le refroidissement, et le graphite reste emprisonné dans la pâte métallique, s'interpose entre les molécules du fer, en donnant une coloration qui varie du gris au noir, suivant la proportion de graphite apparent. Ces deux caractères servent à classer les fontes par l'aspect de leur cassure, le n° 1 étant le plus noir et le plus riche en carbone libre. Dans les fontes truitées, le graphite n'est plus assez abondant pour colorer toute la masse, qui en est seulement mouchetée.

Lorsque la proportion de carbone passé dans la masse n'est pas assez considérable pour provoquer une précipitation lors du refroidissement, la fonte prend une coloration franchement blanche, avec des facettes et des clivages d'aspect très variés.

Il est malaisé d'indiquer quelle est d'une manière générale l'influence du carbone sur les propriétés de la fonte. Nous aurions à redire, en pareille matière, ce que nous avons déjà dit à propos de l'acier. Suivant que le carbone est accompagné d'autres corps qui agissent d'une manière analogue, tels que le silicium, le manganèse, etc., son influence se trouve atténuée ou exaltée dans de notables proportions. Il faudrait, du reste, distinguer désormais à cet égard deux grandes variétés de fontes, les *fontes de moulage* et les *fontes d'affinage*, et dans chacune d'elles le carbone spécialement peut être utile ou nuisible, suivant le but qu'on se propose d'obtenir. C'est ainsi qu'on recherche ordinairement comme fonte de moulage des fontes très grises, graphiteuses même, non point parce que cette variété donne les produits les plus résistants en présentant la surface la plus belle pour les objets moulés, mais parce qu'elle permet de recharger avec la fonte dans le cubilot une certaine quantité de débris de vieilles fontes ou de déchets de coulée désignés sous le nom de *bocages*, qui sont d'une valeur inférieure à la fonte elle-même.

Pour les fontes d'affinage, le rôle du carbone est au moins aussi complexe. L'affinage quel qu'il soit, consistant, comme nous le verrons plus loin, dans l'élimination plus ou moins complète du carbone, une forte teneur en carbone prolonge l'affinage, le rend donc plus coûteux, mais en même temps cette durée plus longue facilite l'élimination des matières nuisibles, telles que le soufre, le phosphore; on peut donc dire que la présence du carbone dans la fonte d'affinage améliore la qualité et doit par suite être recherchée. De plus, les fontes grises résultant d'une allure plus chaude et par suite exigeant plus de combustible que les fontes blanches provenant d'une allure froide, elles ont évidemment une valeur intrinsèque plus grande que les fontes blanches ou truitées.

Silicium. — La présence du silicium dans la fonte est, comme pour le carbone, le résultat d'une allure chaude du haut fourneau, et ce métalloïde agit dans le même sens en prolongeant l'affinage, mais il est à remarquer que si l'élimination du carbone se fait au moyen de produits gazeux qui ne laissent aucune trace dans le bain métallique, celle du silicium est opérée par une scorie plus ou moins liquide qui reste facilement intercalée entre les molécules ferreu-

ses et nuit à la qualité du produit. Le silicium agit donc dans les fontes, d'affinage, soit qu'on emploie le four à puddler ou la cornue Bessemer, comme un auxiliaire du carbone, mais comme un auxiliaire moins estimé que lui.

Tableau des expériences de M. Thomas Turner.

Teneur en silicium calculée.	DENSITÉ relative. Eau à 20° c. = 1		DURETÉ RELATIVE	RÉSISTANCE A LA TRACTION en kilogrammes, par millimètre carré.	MODULE D'ELASTICITÉ	RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT par millimètre carré.	RÉSISTANCE TRANSVERSALE kil.	ANALYSES CHIMIQUES						
	En masse.	En copeaux.						Carbone total	Graphite	Carbone combiné	Silicium	Phosphore	Manganèse	Soufre
0 0	7 560	7 719	72	15 97	25 750 000	117.48	1225	1 98	0 38	1 60	0 19	0 32	0 14	0 05
0 5	7 510	7 670	52	19 28	28 670 000	143.98	1487	2 00	0 10	1 90	0 45	0 33	0 21	0 05
1 0	7 641	7 630	42	20 02	31 180 000	144.74	1528	2 09	0 24	1 85	0 96	0 33	0 26	0 04
1 4	7 555	7 473	47	22 11	33 500 000	129.27	1586	2 21	0 50	1 71	1 37	0 30	"	0 05
2 0	7 518	7 350	22	24 62	23 560 000	94.53	1502	2 18	1 62	0 56	1 96	0 28	0 60	0 03
2 5	7 422	7 388	22	23 00	25 450 000	120.45	1602	1 87	1 19	0 68	2 31	0 26	0 75	0 05
3 0	7 258	7 279	22	19 26	21 150 000	89.38	1292	2 23	1 43	0 80	2 96	0 34	0 70	0 04
4 0	7 185	7 218	27	17 76	15 640 000	75.08	1333	2 01	1 80	0 20	3 92	0 33	0 84	0 03
5 0	7 167	7 170	32	16 00	17 750 000	62.50	1063	2 03	1 66	0 37	4 74	0 30	0 05	0 05
7 5	7 128	7 138	42	8 30	14 750 000	77.93	682	1 86	1 48	0 38	7 33	0 29	1 96	0 03
10 0	6 978	6 924	57	7 47	13 950 000	52.70	565	1 81	1 12	0 69	9 80	0 21	1 95	0 04

M. Thomas Turner, préparateur de chimie au Mason College, de Birmingham, a spécialement étudié l'influence du silicium sur les propriétés physiques et mécaniques de la fonte, et il a fait part du résultat de ses études au meeting

de l'Iron and steel Institute de mai 1886. La série de fonte soumise aux essais avait été obtenue en fondant dans un creuset du fer du Staffordshire avec des quantités variables de charbon de bois et de ferro silicium. Le dernier échantillon (n° 10 du tableau ci-dessus) est le ferro silicium qui a servi à faire les mélanges intermédiaires.

Ce tableau donne lieu aux observations suivantes. Le chiffre indiquant la dureté représente le nombre de grammes dont il a fallu charger un diamant à couper le verre pour strier une surface rabotée de la fonte. Cette méthode ingénieuse peut donner des résultats absolus en comparant des échantillons avec les types de dureté minéralogiques. Les Américains emploient dans le même but un outil dont la pointe pyramidale s'appuie sur la fonte, et sur lequel on exerce une pression de 5,000 kilogrammes. Le volume dont la pointe s'enfoncé sert à déterminer la dureté de la fonte. Dans leurs essais, les duretés varient comme $\frac{1}{3,9}$; dans ceux de M. Turner, elles varient comme $\frac{1}{3,3}$; la coïncidence est à peu près complète.

Le tableau donne d'ailleurs lieu aux quelques observations suivantes :

La densité en masse de l'échantillon n° 2 est évidemment trop basse; l'échantillon a été reconnu défectueux dans la suite.

La résistance à l'écrasement de l'échantillon n° 6 est exceptionnellement élevée. La position de l'échantillon dans la série ne faisait prévoir qu'une résistance de 92^{kil},50.

Le maximum de résistance à la traction, qui est de 24 kilogrammes, correspond à une teneur en silicium de 2 p. 100 environ. Le module d'élasticité est maximum pour une teneur moins élevée, qui varie aux environs de 1 p. 100. C'est pour la même teneur que la résistance à l'écrasement est la plus grande, tandis que la résistance transversale croît avec l'augmentation en silicium jusqu'à 2^{kil},50.

Pour que ces résultats fussent absolument concluants, il faudrait que la proportion des autres corps restât absolument invariable, ce qui n'a pu évidemment être obtenu; ces expériences présentent néanmoins un réel intérêt, et il serait à désirer qu'elles fussent reprises en faisant varier, par exemple, le manganèse et le phosphore, et en maintenant cette fois aussi constante que possible la teneur en silicium.

On a remarqué que la présence du silicium avait également une influence notable sur les soufflures qui se rencontrent dans les objets moulés. Cette observation a conduit M. Gautier, dont nous avons déjà eu l'occasion de signaler les travaux à propos des aciers, à recommander le mélange de ferrosilicium avec les fontes de moulages, qui n'en renferment point assez, comme les fontes gris clair, par exemple. Celles-ci ayant, en général, un prix de revient moins élevé que les fontes graphitiques, cette manière de faire peut être avantageuse dans bien des cas.

Soufre. — Les minerais de fer contiennent fréquemment, comme nous l'avons vu, des pyrites de fer ou de cuivre; il en est de même des combustibles minéraux. Le soufre se rencontre dans toutes les fontes et il y est nuisible, quel que

soit leur emploi. C'est heureusement un ennemi facile à saisir, soit dans le haut fourneau, soit dans le four d'affinage lui-même.

L'élimination du soufre repose sur son affinité à haute température pour les laitiers basiques. L'emploi de l'air fortement chauffé dans les appareils Whitwell et Cowper, permettant de rendre fluides des laitiers très chargés de chaux, a rendu le soufre beaucoup moins nuisible qu'il ne l'était autrefois. On peut, à l'odeur bien caractéristique d'acide sulfureux et d'hydrogène sulfuré que répandent ces laitiers, se rendre compte de l'importance de cette élimination.

Aux très hautes températures du convertisseur Bessemer et du four Siemens, le soufre est aussi partiellement éliminé et passe dans la scorie. Au puddlage, il faut un travail chaud et un bain abondant pour en débarrasser le fer. Dans les fontes de moulage, le soufre augmente le retrait, les fait relasser en produisant des cavernes et des soufflures. Sa présence dans ces fontes doit donc être particulièrement évitée.

Phosphore. — Le phosphore se rencontre, comme le soufre, dans toutes les fontes, au moins à l'état de traces. Tous les minéraux sont plus ou moins phosphoreux, et on n'a trouvé jusqu'à présent aucun procédé pratique pour éliminer le phosphore au haut fourneau. Nous avons dit, dans le volume de cette encyclopédie consacré aux aciers que le procédé Thomas était venu résoudre la question de l'élimination du phosphore non seulement dans les aciers, mais encore dans les fers fondus, si bien que le puddlage tend de plus en plus à disparaître. Le phosphore dans les fontes d'affinage n'est donc plus nuisible que là où il n'existe pas en quantité assez considérable pour permettre franchement l'application du procédé Thomas, c'est-à-dire lorsqu'il se rencontre dans les fontes dans la proportion de quelques dix millièmes.

Dans les fontes de moulage, le phosphore nuit à la ténacité, mais augmente beaucoup la fluidité; les fontes phosphoreuses sont donc recherchées pour les moulages d'ornement, mais sont mauvaises pour les moulages mécaniques exigeant de la résistance.

Arsenic. — Parmi les autres métalloïdes, l'arsenic est le seul qui puisse se rencontrer dans certaines fontes en proportions notables; il agit dans le même sens que le phosphore, mais il se dégage ordinairement dans la partie supérieure de la cuve du haut fourneau à l'état d'acide arsénieux ou d'hydrogène arsénié.

Manganèse. — Parmi les métaux, il en est un qui joue dans la composition des fontes un rôle particulièrement important. Les affinités du manganèse sont en général plus énergiques que celles du fer; lorsqu'il se trouve associé à celui-ci, il agit donc comme épurateur, et comme ses propriétés sont très semblables à celles du fer, le manganèse qui reste uni au fer, l'épuration terminée, ne nuit en rien à ses qualités essentielles. De là tout le secret de l'importance du manganèse dans la métallurgie du fer et de l'acier.

Le manganèse n'existe pas comme le soufre et le phosphore dans la plupart des minerais et des combustibles. Il est amené dans les fontes par des additions

de minerais spéciaux. On a vu dans le volume des Aciers qu'il existe toujours dans la proportion d'au moins 1 p. 100 dans les fontes Bessemer et Thomas, ainsi que dans celles destinées au four Martin. Comme nous le dirons plus loin, le manganèse est aussi dans le puddlage un utile auxiliaire; enfin, lorsque sa teneur atteint 8 ou 10 p. 100, il constitue toute une série de fontes spéciales qui sous le nom de *fontes miroitantes*, de *fontes spéculaires* interviennent d'une manière très utile dans la fabrication de l'acier; lorsque cette teneur arrive à 30 p. 100 pour atteindre jusqu'à 80 p. 100, on a le *ferromanganèse*. On sait maintenant obtenir au haut fourneau le ferromanganèse au moyen d'une allure extra chaude, grâce à laquelle on limite le passage du manganèse dans le laitier. C'est surtout dans cette fabrication que les appareils chauffant l'air à haute température peuvent être utilement employés.

Dans les fontes de moulage, le manganèse est utile à faible dose. Il augmente leur fluidité et leur ténacité, mais dès que la tendance à la cristallisation se fait sentir, ces fontes deviennent impropres au moulage, à moins de les employer en mélange pour carburer les bocages et les fontes froides.

Métaux divers. — Les minerais de plomb et de zinc sont quelquefois associés aux minerais de fer. Ces deux métaux ne sont pas directement nuisibles en ce sens qu'ils ne se retrouvent pas dans la fonte sortant du haut fourneau, mais ils troublent la fabrication. Le plomb par les fumées qu'il donne peut compromettre la santé des fondeurs et des chargeurs qui servent l'appareil; de plus, ce métal étant beaucoup plus subtil que les fontes, pénètre dans les joints des briques et nuit à la solidité du haut fourneau. Le zinc agit d'une manière analogue et forme des cadmies qui, lorsqu'elles sont abondantes, encombrant le gueulard et pénètrent jusque dans les conduites de gaz au point de les obstruer.

Chrome et tungstène. — Ces deux métaux pénètrent facilement dans la fonte et y sont utiles dans certains cas. Des expériences récentes ont montré que le chrome augmente notablement la résistance à la flexion des aciers sans les rendre cassants; l'emploi des tôles chromées tend donc de plus en plus à se généraliser. Le tungstène donne des aciers très durs, très propres à la fabrication des outils. Il y a donc lieu de le rechercher dans certaines fontes d'affinage. Quant aux fontes de moulage, elles ne paraissent pas jusqu'à présent acquérir par la présence de ces deux métaux de nouvelles propriétés.

Le cuivre, malgré son peu d'affinité pour le fer, se rencontre souvent dans les fontes, surtout manganésées. Dans les fontes d'affinage il est particulièrement nuisible, en ce sens qu'il rend le fer et l'acier rouverins, c'est-à-dire cassants à chaud. La même quantité laisse les fontes de moulage encore utilisables, mais si la proportion augmente, ces fontes deviennent cassantes et doivent également être rejetées.

Nous réunissons ci-dessous les analyses d'un certain nombre de fontes de moulage et de puddlage. Le volume de cette Encyclopédie consacré à l'étude des aciers présentant un grand nombre d'analyses de fontes Bessemer, Thomas et Martin; nous ne reviendrons pas sur ces dernières.

1° Fontes noires et grises de moulage.

	ÉCOSSE		WESTPHALIE		SILÉSIE		HONGRIE
	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2	
Graphite	3.15	2.64	3.28	2.45	2.91	2.80	1.93
Carbone combiné	1.35	1.04	0.26	0.51	0.68	0.77	6.36
Silicium	2.74	3.06	2.45	4.58	3.40	2.99	2.75
Manganèse	2.40	0.83	0.48	1.90	traces	3.22	1.01
Phosphore	0.84	0.93	0.97	0.44	2.18	0.46	0.06
Soufre	1.27	1.14	0.01	traces	0.01	0.01	0.02
Cuivre	»	»	0.06	»	»	»	»
Fer	dosé par différence						

Comme on le voit, sauf la teneur en phosphore, ces fontes diffèrent peu de celles employées dans la fabrication de l'acier. Ces dernières peuvent en effet être employées dans la plupart des cas comme fontes de moulage; mais il est à remarquer que la réciproque n'est point vraie.

2° Fontes truitées et blanches d'affinage.

	CLÉVELAND		SAINT-LOUIS (FRANCE)	
	Truitée.	Blanche.	Truité blanc.	Truité rayonné
Graphite	2.70	1.06	1.59	0.56
Carbone combiné	0.85	0.90	1.90	1.98
Silicium	0.56	0.11	0.58	0.46
Manganèse	0.79	0.11	1.67	1.70
Phosphore	1.05	0.26	0.02	0.06
Soufre	0.35	0.96	0.02	0.03
Cuivre	»	»	»	»
Calcium	0.25	0.15	»	»
Magnésium	0.07	0.06	»	»

Comme le montrent ces analyses, les fontes blanches et truitées sont surtout caractérisées par leur faible teneur en silicium. La teneur en manganèse et en phosphore peut varier dans d'assez larges limites, l'un servant de correctif à l'autre dans certains cas.

Nous terminerons ce chapitre par quelques indications sur les propriétés physiques de la fonte qui restent à peu près indépendantes de sa composition chimique. La densité de la fonte est en moyenne pour la fonte blanche de

7,200; la fonte grise contenant plus de carbone et de silicium que la blanche, doit être forcément plus légère.

On admet 1100° pour point de fusion de la fonte blanche, 1200° pour la fonte grise, les températures variant d'ailleurs naturellement avec la composition de la fonte soumise à la fusion.

La fonte résiste bien à la compression, mais sa résistance à la rupture et par suite sa limite d'élasticité sont très réduites. On admet pour les bonnes fontes une résistance à la compression de 75 à 80 kilogrammes par millimètre carré, et les expériences de M. Turner, que nous avons fait connaître, montrent que ce chiffre peut même être notablement dépassé; la résistance à la traction, qui, couramment, s'abaisse de 8 à 10 kilogrammes pour les fontes ordinaires, peut atteindre jusqu'à 16 et 18 kilogrammes pour les qualités supérieures. Ajoutons que les efforts de traction directs, ainsi que ceux de flexion et de cisaillement, si fréquents pour le fer et l'acier, s'exercent rarement sur les pièces en fontes employées dans les machines ou dans les constructions. L'étude des propriétés mécaniques de la fonte présente donc un intérêt beaucoup moindre que pour l'acier ou pour le fer.

CHAPITRE X

FABRICATION DE LA FONTE (*suite*).

Considérations économiques sur le roulement des hauts fourneaux. — Prix de revient.
— Statistique de la production de la fonte.

Le prix de revient de la fonte se compose de quatre éléments principaux : 1° le minerai et le fondant ; 2° le combustible ; 3° la main-d'œuvre ; 4° les frais divers de la fabrication (entretien des machines appareils et bâtiments, fournitures diverses de magasin, salaires du personnel de direction et de surveillance, etc.). Les matières consommées représentent ici la grosse part de la dépense ; il importe donc d'en tenir un compte exact. Il existe à cet effet dans chaque usine, pour chaque haut fourneau, un grand livre de la fabrication qu'on désigne ordinairement sous le nom de *roulement du haut fourneau*.

On y inscrit dans une série de colonnes et sur la même ligne horizontale par chaque poste de douze heures, le nombre de charges avec leur composition, et le total de ces chiffres donne à la fin du mois la comptabilité des matières de l'appareil, avec la mise au mille du combustible, c'est-à-dire la consommation de coke ou de charbon de bois par 1,000 kilogrammes de fonte produite.

Cette mise au mille varie nécessairement avec la teneur du minerai et la qualité de la fonte, mais l'emploi des appareils chauffant l'air à très haute température a beaucoup contribué à l'abaisser. Tandis qu'autrefois, avec un coke de qualité moyenne et un lit de fusion rendant encore 35 à 40 p. 100, on n'obtenait 1,000 kilogrammes de fonte Bessemer qu'en dépensant de 1,400 à 1,600 kilogrammes de coke, cette consommation varie aujourd'hui de 1,000 à 1,200 kilogrammes et, pour la fonte blanche, elle descend sensiblement au-dessous de ce chiffre.

Les dépenses de main-d'œuvre et les frais divers de la fabrication ont aussi beaucoup diminué avec l'accroissement des dimensions des hauts fourneaux et leur concentration dans de grandes usines. Il y a vingt ans, on admettait que l'ensemble de tous ces frais représentait une dépense variant de 12 à 15 francs par tonne de fonte ; nous connaissons des usines dans lesquelles ces dé-

penses sont à peine le quart de ce qu'elles étaient, à l'époque dont nous parlons. Tout a donc contribué à abaisser le prix de revient de la fonte d'une manière notable et, sans entrer ici dans des détails qui seraient hors de propos, on peut admettre que ce prix s'établit comme il suit dans les régions les plus favorisées et pour les espèces de fontes les plus ordinaires (1) :

Minéral et castine (teneur moyenne du lit de fusion), 3 tonnes à 3 francs.	9 francs.
Coke, 1 tonne à 20 francs.	20 —
Frais de fabrication.	6 —
Total du prix de revient	<u>35 francs.</u>

Ce prix de revient ne comprend pas l'intérêt et l'amortissement du capital engagé, qui peut dans certains cas majorer de 15 p. 100 et même plus le prix de revient de la matière sortant de l'atelier, mais c'est un fait bien connu que certaines fontes se vendent en France aujourd'hui, au-dessous de 50 francs la tonne à l'usine. Ce prix ne laisse, il est vrai, qu'une rémunération à peu près nulle au capital engagé dans un grand nombre d'établissements. Nous rappelons encore une fois que quand il s'agit de fontes spéciales graphitiques, manganesifères ou autres le prix de revient augmente notablement.

La production totale de la fonte a été en France, en 1885, de 1,630,648 tonnes, dont 1,257,074 tonnes pour la fonte d'affinage, fontes Bessemer, Thomas et Martin comprises, et 373,574 tonnes pour la fonte de moulage. Il est un département qui occupe dans ce chiffre une part vraiment exceptionnelle, c'est celui de Meurthe-et-Moselle avec 706,761 tonnes. Cette situation est la conséquence naturelle de cette formation oolithique d'une exploitation si avantagée que nous avons signalée au chapitre des minerais; vient ensuite le département du Nord avec 217,595 tonnes. Le département de Saône-et-Loire, dont la production a été dans la même année de 114,310 tonnes et celui du Pas-de-Calais donnant 93,231 tonnes, viennent au 3^e et 4^e rang. Au total, vingt-sept départements interviennent dans cette production qui, malgré tout, ne représente guère plus du quart de celle de l'Angleterre, évaluée à 6 millions de tonnes.

Sur les 1,630,000 tonnes de fonte produite, la fonte au bois figure pour 29,000 tonnes seulement et la fonte mixte, c'est-à-dire celle résultant d'un mélange de

(1) Il est intéressant de rapprocher du chiffre du prix de revient que nous donnons ci-dessus celui qu'indique M. Wolters dans une publication récente sur les conditions de fabrication en Belgique. Il arrive à peu près exactement au même chiffre de la manière suivante :

Minerais et scories.	18 fr. 17
Coke	12 84
Main-d'œuvre	2 57
Castine.	» 49
Objets divers de consommation.	0 59
Frais généraux.	0 47
Service financier.	0 78
Réserve pour grosses réparations	0 33
Total.	<u>36 fr. 25</u>

Les minerais reviennent ici notablement plus cher; mais le coke est, en revanche, meilleur marché.

combustible pour 16,000 tonnes. Les fontes au bois tendent à devenir une véritable rareté. On verra plus loin que les fers au bois, qui en provenaient et jouissaient d'une réputation justement méritée, tendent de plus en plus à être remplacés par les aciers doux ou homogènes qui possèdent les mêmes propriétés.

Il est intéressant de comparer les données statistiques présentées ci-dessus avec celles qu'on a pu recueillir lors des premiers développements de notre métallurgie française. Nous empruntons au *Traité de la fabrication de la fonte et du fer* de MM. Flachet, Barrault et Petiet, publié en 1846, quelques indications sur cet objet.

Sur 587 hauts fourneaux exploités en France en 1843, 88 seulement marchaient à l'air chaud, tandis que le chauffage de l'air est aujourd'hui universellement employé.

La production totale de la fonte avait été, dans la même année 1843, de 422,621 tonnes, soit environ le quart de ce qu'elle est aujourd'hui. La production moyenne par haut fourneau était donc de 7 tonnes environ seulement, tandis qu'elle est aujourd'hui presque le décuple de ce chiffre. La comparaison de ces données montre les progrès réalisés dans l'industrie qui nous occupe. D'après l'ouvrage déjà cité, la production de la fonte en 1819 n'était que de 112,500 tonnes, dans lesquelles la fonte au coke figurait pour 2,000 tonnes seulement. Il n'est pas un seul haut fourneau, employant le combustible minéral, qui accepterait aujourd'hui pour son roulement annuel un pareil chiffre de production.

La comparaison du prix de la fonte dans la période indiquée ci-dessus n'est pas moins instructive. D'après les mêmes sources, les coussinets en fonte pour les voies de chemins de fer atteignaient encore en 1837 le prix de 385 francs la tonne; ce prix était tombé en 1843 à 200 francs environ. Les derniers marchés passés en 1887 ont été traités à raison d'environ 85 francs. Ainsi, tandis que la production de la fonte a quadruplé depuis quarante ans, les prix de vente ont suivi une marche à peu près inverse.

De quelle manière cette situation se trouvera-t-elle modifiée après quarante nouvelles années, c'est ce qu'il est difficile de dire, mais il paraît peu probable que les écarts soient aussi grands qu'ils l'ont été dans la période précédente.

CHAPITRE XI

MOULAGES EN FONTE

Propriétés des fontes de moulages. — Appareils de fusion; cubilots et modèlerie réverbères. — Divers procédés de moulage : sable vert, sable séché; moulages en terre et en coquille. — Organisation du travail des fonderies.

La fonte de fer unit, comme nous l'avons vu, à un prix de revient peu élevé, des propriétés qui la rendent susceptible d'un très grand nombre d'emplois. Entrant en fusion à la température relativement basse de 1200 degrés, elle reste fluide assez longtemps pour être transportée, en masse peu considérable, et coulée dans des récipients de forme très variée, dont elle épouse facilement les contours. Elle peut prendre ainsi les formes les plus diverses; de plus, elle possède une résistance inférieure, il est vrai, à celle du fer affiné, mais supérieure à celle que donnerait à volume égal un grand nombre de matériaux naturels. On désigne sous le nom de *moulage en fonte*, les produits métallurgiques ainsi obtenus. Ils interviennent dans la construction des bâtiments et des machines de toute sorte dans une proportion au moins égale à celle du fer lui-même. L'étude de leur fabrication doit donc nous arrêter quelque temps.

On a vu aux chapitres précédents, quelles qualités doivent présenter les bonnes fontes de moulage et quelle doit être leur composition chimique. Ces fontes peuvent être prises directement au haut fourneau, et c'est là évidemment la solution la plus économique; cependant à moins qu'il ne s'agisse d'objets d'une forme simple et fabriqués en grande quantité à la fois, cette manière de faire est rarement employée. En effet, les moules dans lesquels la fonte liquide est versée sont souvent pratiqués dans le sol de la fonderie lui-même, ou dans tous les cas reposent sur lui avec une large base et peu de hauteur; ils exigent donc un emplacement considérable qu'on rencontre rarement autour d'un haut fourneau, et on ne saurait d'autre part, transporter la fonte liquide à de grandes distances sans s'exposer à la voir devenir froide, pâteuse, et à manquer ainsi les pièces à fabriquer. D'autre part lorsque les moulages doivent présenter des résistances spéciales, on n'est jamais certain que l'allure du fourneau, si difficile comme on sait à maintenir régulière,

donnera exactement la fonte qu'on a en vue. On préfère donc le plus souvent employer de la fonte dite *de seconde fusion* provenant de gueusets triés avec soin et refondus dans des fours spéciaux qui portent le nom de *cubilot*s ou de *fours à réverbère*.

Cubilot. — Le cubilot n'est pas autre chose qu'un haut fourneau en miniature; comme il s'agit non plus de réduire et de fondre, mais de refondre seule-

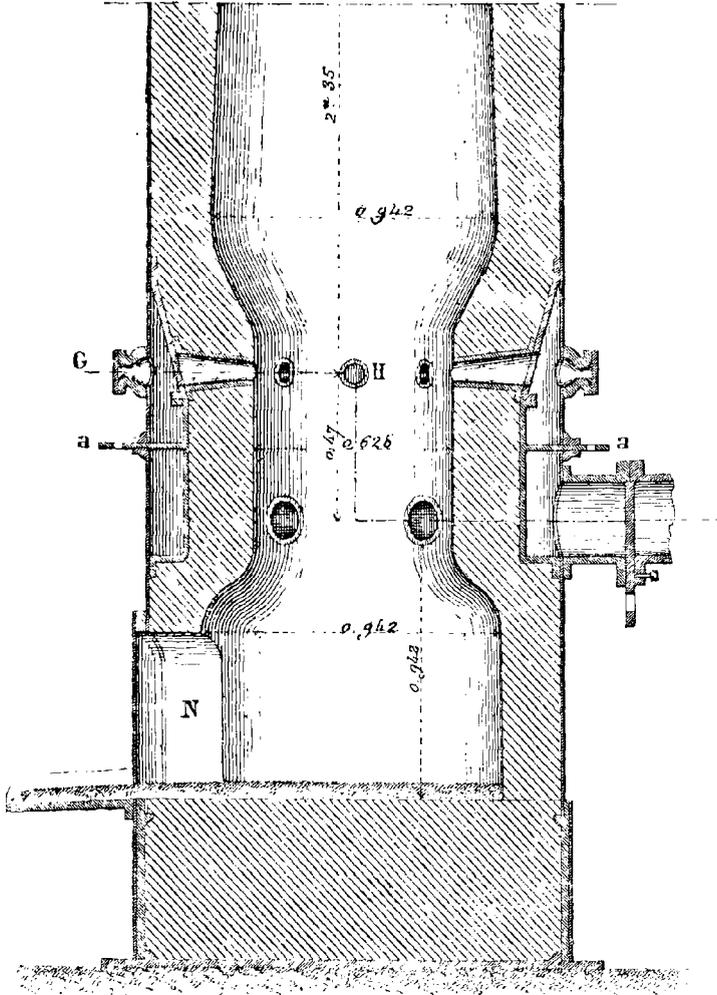


Fig. 20. — Cubilot de fonderie (Coupe verticale).

ment, les dimensions peuvent être beaucoup moins considérables; une hauteur de 4 à 5 mètres avec un diamètre de 1 mètre à 1^m,50 représentent déjà des cubilot>s de forte production. Une pression du vent, de quelques centimètres

seulement, suffit sans qu'il soit nécessaire de chauffer ce vent. De plus, la faible proportion du combustible employé, qui dépasse rarement 10 p. 100 du poids de la fonte, fait que le volume des gaz est peu considérable : on ne se préoccupe donc pas ici de les utiliser ; les matières sont chargées par une ouverture latérale et les gaz s'échappent par une cheminée qui prolonge la maçonnerie du cubilot et vont brûler librement dans l'atmosphère.

On donnait autrefois aux cubilots une forme absolument cylindrique. La nécessité de réaliser des économies dans la marche des fonderies qui, étant très nombreuses, se font une vive concurrence, a conduit à examiner si des profils renflés ou étranglés en certains points n'amèneraient pas une moindre consommation de combustible. En outre, au lieu de donner le vent par 2 ou 3 tuyères placées au même niveau, on a cherché à augmenter le nombre des tuyères et à les placer à des étages différents. Nous empruntons au *Traité de métallurgie* de Gruner, le dessin en coupe verticale d'un cubilot employé à la fonderie de Borsig, à Berlin (*fig. 20*), et caractérisé par le rétrécissement de la zone de combustion et par l'emploi d'une caisse à vent qui enveloppe complètement la zone de fusion. Par cet arrangement, on opère à la fois le rafraîchissement de la chemise réfractaire et le chauffage partiel du vent. De plus, ce cubilot est muni d'une double rangée de tuyères qui peuvent fonctionner séparément ou simultanément, grâce aux tiroirs *a a*. Les tuyères supérieures (HH) sont au nombre de 8, les tuyères inférieures au nombre de 4 ; chacune d'elles est pourvue d'un regard à plaque de cristal et de mica G, et N indique l'ouverture de défournement. Celle-ci est habituellement close par un mur provisoire en briques réfractaires, vers le bas duquel se trouve le trou de coulée. On démolit ce mur après chaque opération pour visiter l'intérieur du cubilot qui peut fondre dans ces conditions de 2 à 3 tonnes par heure, en consommant de 10 à 12 p. 100 de coke (mise en feu comprise) et en occasionnant un déchet de 4 1/2 à 5 p. 100.

La question des cubilots a été étudiée récemment par M. Gouvy, ingénieur de la Société autrichienne-hongroise des chemins de fer de l'État, dans un mémoire présenté par M. Jordan, en avril 1886, à la Société des ingénieurs civils. Il résulte de ce travail que certains cubilots, parmi lesquels il convient de citer celui de MM. Greiner et Erpf, ont permis de réduire à 3 p. 100 (non compris l'allumage), la proportion de coke employé à la fusion. C'est là un progrès bien sensible, surtout si on songe qu'il y a une trentaine d'années on considérait encore 20 kilogrammes de coke pour 100 kilogrammes de fonte comme un chiffre normal.

Four à réverbère. — Quel que soit le soin apporté dans le choix du coke chargé au cubilot, le contact avec le combustible dénature toujours un peu la fonte. Il faut fondre les cendres du coke et ajouter à cet effet un peu de castine, d'où résulte la formation d'un laitier, entraînant forcément une certaine proportion de manganèse lorsque la fonte en contient.

On voit également par la refonte au cubilot des fontes graphitiques devenir simplement grises et perdre ainsi de leur qualité. On évite en grande partie cet inconvénient, en opérant la refonte dans un four à réverbère ; les gaz provenant

de la chauffe spéciale du four peuvent, il est vrai, produire encore certaines altérations, mais elles sont beaucoup moins sensibles.

Le four à réverbère est trop employé dans les arts chimiques pour que nous revenions ici sur une description qui a déjà été faite plus d'une fois dans cette *Encyclopédie*. Dans les fours à réverbère des fonderies, on cherche surtout la rapidité de la fusion ; on admet que cette condition se trouve réalisée au mieux si l'on établit la surface de la sole 3 fois plus grande que celle de la grille, et si l'aire du vide laissé entre les barreaux de la grille est à celle de la section du rampant, comme $3 \frac{1}{2}$ est à 1. Ici, du reste, comme dans tous les fours à réverbère, la marche est puissamment influencée par la manœuvre du registre à bascule placé au sommet de la cheminée. L'usage de ce registre est indispensable lorsqu'il s'agit d'augmenter ou de diminuer le tirage suivant les besoins du chauffage. Les figures 21 et 22 donnent d'ailleurs les dispositions principales d'un four à réverbère qu'on rencontre assez fréquemment dans les fonderies anglaises.

Le temps que dure la fusion dans un four à réverbère est assez variable ; il dépend beaucoup du combustible employé. Selon sa qualité et la nature des fontes, il faut de deux à cinq heures pour fondre de 700 à 3,000 kilogrammes, avec une consommation de 400 à 500 kilogrammes par tonne de fonte chargée. Le déchet de feu est à peu près le même que dans le cubilot et varie de 4 à 5 p. 100.

Le four à réverbère présente, par rapport au cubilot, l'inconvénient de ne pouvoir donner toute sa charge qu'en une fois ; on l'emploie donc de préférence pour les grosses pièces qui, du reste, exigent le plus souvent de la qualité. Les fonderies de canons (Rueil en France, Mariazell en Autriche, Reschitza en Hongrie) possédaient de belles installations de fours à réverbère. La substitution de l'acier à la fonte pour les moulages devant présenter une grande résistance a diminué dans de notables proportions l'emploi que les grandes fonderies faisaient de cet appareil.

Modèlerie. — Le principe de la fabrication des moulages consiste, nous l'avons dit, à introduire la fonte liquide dans un moule présentant exactement la forme de l'objet qu'on veut obtenir. Le choix de ce moule, c'est-à-dire de la matière qui sert à le composer, constitue la partie la plus délicate de l'art du fondeur ; mais quelle que soit cette matière, elle reçoit presque toujours sa forme au moyen d'un modèle reproduisant exactement l'objet à mouler. Lorsque ces modèles ne doivent être employés qu'un nombre de fois limité, on les fait en bois ; si, au contraire, il doivent servir à donner la forme à toute une série de pièces, on les fait en métal et le plus souvent en bronze, de manière à résister à la destruction qu'amènerait forcément un long usage. On désigne sous le nom de modèlerie l'atelier dans lequel se fait la préparation des modèles.

Dans les grandes usines, cet atelier possède toutes les machines à travailler le bois les plus perfectionnées, et est accompagné de vastes magasins dans lesquels les modèles doivent être conservés dans un ordre parfait de manière à pouvoir être promptement remis à la fonderie à toute réquisition.

Quelle que soit la matière employée pour la fabrication des modèles, il est nécessaire de leur donner un certain évasement pour faciliter leur sortie du

sable; cet évasement a reçu dans la pratique le nom de *dépouille*. Il est bien difficile d'établir des règles fixes pour la dépouille qui dépend principalement de la forme des objets; mais bien qu'on ait l'habitude d'ébranler les modèles dans le sable pour les aider à en sortir, il est nécessaire de leur donner à tous, dans le sens où ils doivent se démouler, l'évasement dont nous avons parlé.

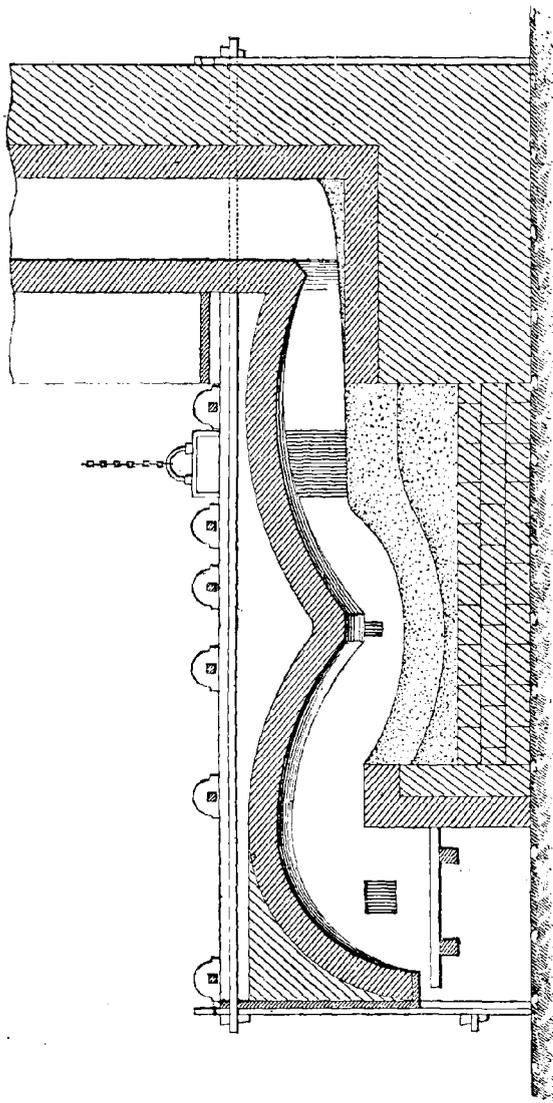


Fig. 21. — Four à réverbère de fonderie (Coupe longitudinale).

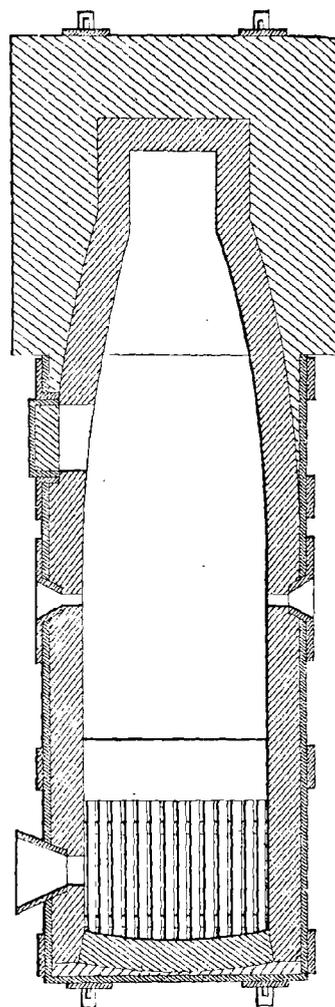


Fig. 22. — Four à réverbère de fonderie (Coupe horizontale).

Matériel des fonderies. — Il est peu d'industries qui exigent un outillage aussi considérable qu'une fonderie de fer grandement installée et qui puissent en même temps être organisées aussi facilement lorsqu'on n'a pas en vue des

commandes importantes. Un cubilot placé dans un hangar et soufflé par un ventilateur mû à bras d'homme. Quelques châssis de dimensions diverses, une petite grue remplacée même au besoin par une paire de *moufles* suspendue à l'un des traits de la toiture, une *étuve* servant au besoin de fosse pour le moulage, un tas de sable vert convenablement séché, enfin les outils indispensables, mais peu coûteux, qui servent pour la confection des moules et l'achèvement des objets coulés; telle est l'installation qui se rencontre encore dans certaines régions reculées. Nous allons mettre en regard ce que doit être l'installation d'une fonderie répondant aux progrès les plus récents.

Une grande fonderie doit posséder plusieurs cubilots de manière à en avoir toujours un en réparation pendant que les autres sont en marche. Ils diffèrent de grandeur, de manière à ne traiter les fontes spéciales ou coûteuses que dans des appareils de dimensions appropriées.

La fonte sortant du cubilot est reçue dans une ou plusieurs *poches* qui la conduisent dans les divers moules de l'atelier.

Les *grues* constituent une partie importante de l'outillage d'une fonderie. Elles doivent être assez nombreuses pour pouvoir se correspondre et se reprendre les fardeaux de manière à desservir tous les points de l'atelier. Elles doivent être pourvues d'une bonne direction permettant de transporter facilement et sans secousse la charge, depuis le centre jusqu'à l'extrémité de la volée, ce qui facilite beaucoup l'opération délicate désignée sous le nom de *renmoulage*, et qui sera décrite plus loin. Les grues hydrauliques présentent à cet égard des avantages spéciaux, et il conviendrait d'installer des grues hydrauliques à pivot contre les piliers ou les colonnes qui soutiennent la toiture sans préjudice d'une grande grue roulante prenant son point d'appui sur les murs de la halle.

Châssis. — Les châssis sont la partie la plus encombrante, sinon la plus coûteuse du matériel des fonderies. Ce sont des caisses en fonte à claire-voie dans lesquelles on tasse les matières plastiques formant les moules lorsque ceux-ci ne sont point faits dans le sol de la fonderie elle-même. Leurs formes et leurs dimensions dépendent donc des pièces à couler. Mais on cherche autant que possible à les ramener à des formes rectangulaires et à les juxtaposer les uns aux autres pour arriver aux pièces de grandes dimensions. Ce sont ces châssis qui, mangés par la rouille, s'entassent malgré tout dans les cours des usines et qui permettent de reconnaître de loin l'emplacement de la fonderie.

Confection des moules. — Il est difficile de classer d'une manière bien nette les différents modes de moulage usités dans les fonderies. La fabrication des moules se présente sous tant d'aspects différents que les procédés à mettre en œuvre se ressentent de cette variété. On pourrait cependant distribuer les opérations du moulage en cinq classes principales, savoir :

- 1° Le moulage en sable vert ou sable non séché;
- 2° Le moulage en sable vert séché, qui tient le milieu entre le moulage en sable vert et le moulage en sable d'étuve;

3° Le moulage en sable d'étuve ;

4° Le moulage en terre ;

5° Le moulage en coquille, c'est-à-dire le moulage qui se pratique au moyen de creux en métal, qui servent plusieurs fois à la coulée.

Toutes les espèces de sable ne sont pas propres à la confection des moules de fonderie. On recherche de préférence un sable quartzéux, fin et un peu argileux, auquel on donne du liant en l'humectant légèrement. Le sous-sol même de Paris en fournit aisément. Le sable de Fontainebleau peut également servir, pourvu qu'il ne soit point trop calcaire, car le carbonate de chaux aurait l'inconvénient de causer lors de la coulée de petites explosions.

Suivant la qualité des sables et suivant le volume des modèles, on ajoute au sable vert depuis 5 jusqu'à 25 p. 100 de houille broyée ou tamisée. Dans les grandes fonderies, le mélange est fait au moyen de *broyeurs* et de *malaxeurs* qui assurent à la masse une homogénéité parfaite très nécessaire pour la bonne réussite des pièces.

Moulage en sable vert.— On entend par moule en sable vert celui qui reçoit le métal aussitôt après sa confection, sans qu'il soit nécessaire de le sécher ou de le torréfier. Les conditions à remplir pour obtenir un bon moulage dans ces conditions consistent à serrer le sable de manière qu'il ne présente pas assez de dureté pour résister à la pression des doigts, mais possède cependant assez de solidité pour ne pas s'ébouler au moment de la coulée ; il faut en outre lier toutes les couches entre elles de manière qu'elles offrent des parois uniformément serrées, ou autrement dit éviter la réunion d'endroits mous à côté d'endroits durs, ce qui amènerait des bosses à la surface des pièces ; il faut enfin placer les ouvertures destinées à l'introduction du métal dans les moules de façon à ce que celui-ci ne tombe pas de trop haut, sur des parties qui pourraient être facilement endommagées. Il faut en un mot prendre toutes les précautions nécessaires pour maintenir en bon état le fragile édifice qui doit recevoir un liquide dont la densité est considérable et qui se comporte d'une manière assez tumultueuse au moment de la coulée.

Parmi ces précautions, il en est une qui ne doit jamais être négligée et qui consiste à percer de petites ouvertures au moyen de longues et minces aiguilles dans le moule tout entier. C'est à cette précaution de *tirer de l'air*, comme disent les fondeurs, qu'est due la réussite du moulage en sable vert ; car autrement les gaz qui se dégagent au moment de la coulée ne trouvant qu'une issue insuffisante refouleraient le sable peu compact qui forme le moule dont la solidité se trouverait compromise à la dernière heure.

Lorsque le moule en sable vert est terminé, on prend soin d'en saupoudrer toutes les parois avec du poussier de charbon de bois bien sec. La couche de poussier unit les sables, bouche les pores, et fait décaper la fonte en lui donnant une belle couleur bleue. L'ouvrier la répand ordinairement en secouant au-dessus du moule un sac formé d'une étoffe d'un tissu peu serré et qui laisse passer la fine poussière entre ses mailles.

Moulage en sable vert séché. — Lorsqu'on a des moules d'une certaine di-

mension et lorsqu'on veut obtenir des pièces d'une surface plus unie que celles en sable vert, sans faire la dépense du chauffage à fond qu'entraîne le sable d'étuve, on pratique le moulage en sable vert séché. Les moules sont serrés un peu plus fortement qu'en sable vert, mais beaucoup moins qu'en sable d'étuve. Le serrage n'a pas besoin d'être confié à des mains aussi habiles que celui des moules coulés à vert ; enfin on ne lisse pas les moules au poussier comme pour le sable vert, mais on emploie pour faire dépouiller les pièces une couche ou badigeon qui s'étend au pinceau. Elle se compose habituellement d'environ trois quarts de poussier de charbon de bois mêlé avec un quart de terre argileuse ou de boue de rivière bien grasse, auxquels on ajoute une petite quantité d'amidon cuit, le tout délayé dans de l'eau. Après que le badigeon a été étendu, on lisse avec soin toutes les parties du moule afin d'éviter les traces du pinceau de la brosse ou de la queue d'étoiles dont on s'est servi pour passer la couche.

Moulage en sable d'étuve. — On désigne ainsi tous les moulages pour lesquels le moule une fois terminé est porté dans une étuve pour y subir une sorte de cuisson. On choisit naturellement à cet effet les sables les plus argileux et au lieu de les mêler, comme on le fait toujours dans les précédents, avec une assez forte proportion de vieux sable, on les emploie pour la plus grande partie à l'état naturel. Le travail du moulage lui-même se distingue par le soin qu'on doit apporter à serrer les parties de châssis bien solidement de manière qu'elles puissent subir sans dégradations les manœuvres que nécessite la mise à l'étuve, et la sortie de l'étuve.

Les étuves consistent ordinairement en grandes chambres en maçonnerie. On les ferme par de larges portes en tôle et les gros moules y sont introduits sur un chariot en fonte, dont les galets glissent sur les rails d'un chemin de fer qui communique avec les grues. Les moules plus petits se placent sur les côtés et dans le fond, et sont soutenus par des barres transversales en fer fixées dans la maçonnerie.

La houille ou le coke employés au chauffage brûlent dans un foyer qui garnit le milieu de l'étuve et qui est alimenté par un courant d'air venant de l'intérieur. L'inconvénient qui résulte de cette disposition, c'est que la fumée venant de la grille, s'attachant aux moules et aux noyaux, nuit à ces derniers. On l'évite en chauffant l'étuve avec des gaz provenant d'un générateur spécial situé à proximité.

Moulage en terre. — On emploie pour ce moulage des terres assez grasses pour qu'elles se lient parfaitement, mais ne contenant pas toutefois une trop grande quantité d'argile qui ferait fondre les parois des moules, tout en les rendant trop compacts et occasionnerait un séchage très dispendieux. On y ajoute une certaine proportion variant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ de crottin de cheval, de bourre hachée ou d'une autre matière analogue dont la présence est utile pour empêcher le moule de se crevasser et faciliter le passage des gaz. Le séchage exige en effet dans ce cas un soin tout particulier ; il faut commencer par chauffer à très petit feu, puis augmenter graduellement la température quand les parois sont suffisamment entrées en dessiccation pour qu'on n'ait pas à craindre de les voir se fendiller.

Travail du mouleur. — Tous les procédés décrits ci-dessus comportent un certain nombre de précautions et d'artifices dont la connaissance constitue l'art du mouleur. Ce n'est pas ici le lieu de donner des renseignements sur le moulage de toutes les pièces qui peuvent se présenter, et sur les moyens qu'on emploie pour le simplifier. C'est ainsi que dans bien des cas on peut supprimer la dépense d'un modèle toujours coûteux, et pratiquer ce qu'on appelle *le moulage à découvert*. S'agit-il par exemple de couler une plaque de fonte, on commence par établir dans le sol de la fonderie une surface bien unie qui prend le nom de *couche*, et limitée par deux *chantiers* parallèles posés horizontalement et dans le même plan. L'ouvrier peut alors au moyen de règles et d'équerres former les angles et les côtés du moule de la plaque. L'épaisseur voulue s'obtient à son tour en établissant sur les bords du moule des *dégorgeoirs* par lesquels la fonte s'écoule dès qu'elle a atteint le niveau qui ne doit pas être dépassé. Le moulage à découvert peut s'appliquer à la confection de marteaux de forges, d'enclumes, de plaques de dallage, de tous les châssis de fonderie, en un mot de toutes les pièces dont la surface supérieure n'a pas besoin d'être parfaitement unie.

Toutes les pièces qui doivent avoir des plans bien lisses et qui présentent des reliefs sur tous leurs côtés ne peuvent être faites qu'en les recouvrant d'un châssis qui reproduit l'empreinte exacte des surfaces qui ne font pas partie du moule fait sur la couche. C'est ainsi que sont coulés les engrenages, les volants, les roues et galets de diverses sortes. Nous signalerons ici un artifice permettant à un ouvrier habile de faire le moule d'une roue d'engrenage, par exemple, en se servant d'une portion de la jante, d'un seul bras et du moyeu. Il lui suffit de mouler à plusieurs reprises ce morceau de modèle en lui faisant parcourir une circonférence dont il peut retrouver tous les points au moyen d'un compas placé au centre du moyeu.

Toutes les fois que les pièces à mouler présentent la forme d'une surface de révolution à génératrice plus ou moins compliquée, on emploie ce qu'on appelle *le moulage à la trousse*, et qui consiste à faire tourner sur un pivot un volet découpé suivant la surface de la pièce à obtenir. On coule ainsi les cylindres de laminoirs et les pièces de même forme, à moins qu'ils ne soient coulés en coquille, ce qui est fréquemment le cas.

La confection des pièces creuses ne peut être réalisée qu'en suspendant dans le moule des pièces spéciales destinées à occuper momentanément le vide qui devra exister dans la pièce finie. Ces pièces portent le nom de *noyaux*; leur préparation et leur pose dans les moules exigent les plus grands soins; on les fait ordinairement en tassant le sable dans des moules spéciaux désignés sous le nom de *boîtes à noyau*, et on emploie pour les façonner du sable d'étuve de la meilleure qualité. On désigne sous le nom de *lanternes* les tubes qui servent à soutenir la terre ou le sable qui composent les noyaux de grosses dimensions. On les fait de toutes les formes suivant la disposition des noyaux, mais celles qu'on retrouve le plus souvent dans les fonderies sont cylindriques ou coniques. Elles sont montées sur des tourillons et percées d'une certaine quantité de petits trous pour laisser échapper les gaz qui se produisent au moment de la coulée. Lorsque les noyaux sont d'un très petit diamètre, on remplace les lanternes creuses par des axes pleins en fer ou en fonte.

Parmi les moulages qui exigent l'emploi de noyaux, nous citerons les tuyaux de conduite et les obus en fonte. Ces articles sont d'une forme extérieure relativement simple, mais il est certains moulages qui unissent à la difficulté des noyaux intérieurs, celle d'une surface compliquée présentant des saillants et des rentrants. On emploie dans ce cas des modèles démontables composés de plusieurs pièces qui habilement juxtaposées et maintenues ensemble, peuvent sortir par morceaux du moule qu'elles ont produit. On peut ainsi compléter le moule au moyen de *pièces de rapport* préparées séparément à la manière des noyaux et qu'on rapporte dans le moule principal. Les lecteurs, qui désireraient avoir des détails plus complets sur cette matière un peu trop spéciale pour être traitée ici avec un plus grand développement, les trouveront dans un ouvrage spécial intitulé : « *De la fonderie telle qu'elle existe aujourd'hui en France*, par A. Guettier. Bien qu'étant de date déjà ancienne, cet ouvrage renferme un grand nombre de renseignements utiles sur la matière qui nous occupe.

Machines à mouler. — Lorsqu'une fonderie doit livrer un grand nombre d'objets en même temps, on a intérêt non seulement à se servir des modèles métalliques, mais à employer encore des moyens mécaniques pour introduire et serrer les divers sables dans les châssis ; les machines vont généralement par paire, l'une étant employée à la fabrication des moules et l'autre à celle des noyaux ; elles peuvent être manœuvrées à main ou à la vapeur. Nous en avons vu fonctionner avec un succès complet à la fonderie d'Anina, en Hongrie, appartenant à la Société autrichienne-hongroise des chemins de fer de l'État, servant à fabriquer des boîtes à graisse de wagon, et de projectiles pour l'artillerie de terre de la monarchie.

Quelle que soit la manière dont le moule a été préparé, on réserve toujours dans le châssis supérieur une ouverture par laquelle la fonte est introduite. Lorsqu'on est conduit à employer des fontes se figeant rapidement et qu'on tient néanmoins à obtenir des pièces bien saines, il importe de donner à ce châssis une grande hauteur, de manière qu'une colonne assez haute de fonte non utilisée vienne presser sur celle qui constitue le moulage. On désigne cette fonte en excédent destinée à *abreuver* le moule selon l'expression des fondeurs sous le nom de *masselotte*. La masselotte doit être d'autant plus forte que la pièce est plus compliquée, et que la fonte doit par suite parcourir un plus grand chemin dans le moule. Sinon ce moule n'étant qu'imparfaitement rempli, la pièce présente des soufflures intérieures qui la font rebuter même lorsque son aspect extérieur ne laisse rien à désirer.

Le châssis supérieur présente une autre ouverture à peu près semblable comme forme à celle de la coulée, et qui porte le nom d'*évent* ; c'est par là que la fonte remonte en source après avoir rempli le moule. Sa présence dans l'évent indique que ce moule est bien rempli, et elle contribue comme celle de la coulée à abreuver le moulage pendant son refroidissement.

Moulage en coquille. — On désigne sous ce nom le procédé de moulage dans lequel on substitue, aux moules en sable ou en terre, des moules en métal. Ce métal est ordinairement la fonte elle-même, et on comprend que dans ces con-

ditions la confection des moules est considérablement simplifiée ; mais le moulage en coquille présente cette propriété caractéristique de donner à l'objet moulé une propriété désignée sous le nom de *trempe* ; les surfaces en contact avec le moule en métal blanchissent sur une certaine épaisseur et acquièrent une dureté extraordinaire, mais malheureusement aussi une certaine fragilité. Cette fragilité est d'autant moindre que la transition entre la partie du moulage devenue blanche par la *trempe* et celle restée grise est plus insensible, et c'est à ménager cette transition que l'on s'applique particulièrement dans les fonderies. On peut influencer la trempe par l'épaisseur de la coquille, par la température à laquelle on la porte avant d'introduire la fonte dans le moule, enfin par la composition de la fonte elle-même, car toutes les fontes ne trempent pas. Nous avons vu obtenir surtout de beaux résultats avec des fontes au bois de nuance gris clair refondues dans des fours à réverbère, ou mieux encore dans des fours Siemens.

D'après ce que nous venons de dire, on comprend que le moulage en coquille s'emploie avec succès pour toutes les pièces qui doivent résister à l'usure provenant de frottements violents ou répétés. Les cylindres de laminoirs, les roues de wagons, enfin les obus cylindro-coniques destinés à traverser les plaques de blindages, sont dans ce cas. Parmi les usines qui se sont acquises dans cette fabrication une réputation méritée, nous pouvons citer, en France, celles de Saint-Jacques à Montluçon, appartenant à la Société des forges de Châtillon et Commentry, et celle de Terre-Noire ; en Allemagne, l'usine de Gruson près de Magdebourg a longtemps joint aux articles mentionnés ci-dessus, les croisements de voie de chemin de fer qui, tout en présentant une forme assez compliquée doivent résister au passage répété des roues des véhicules.

Les moulages en fonte trempée présentaient comme nous l'avons dit l'inconvénient de résister difficilement à des chocs, comme la fonte elle-même quelle que soit son origine et son mode d'élaboration. Aussi l'acier fondu est-il venu peu à peu se substituer à la fonte trempée, dont l'usage tend à disparaître de plus en plus.

Finissage des produits moulés. — A leur sortie des moules, les objets coulés conservent encore, quel que soit le soin apporté pour les faire dépouiller, des parties de sable qui s'attachent de préférence aux environs des jets et dans les endroits où la matière est arrivée avec pression. Les objets en sable vert dépouillent ordinairement moins bien que ceux en sable d'étuve, mais ils retiennent moins les sables, parce que ceux-ci sont plus maigres et plus friables. Dans les grandes usines, le nettoyage des pièces coulées est confié à des *râpeurs* qui se chargent de l'effectuer au moyen de *râpes*, de *couteaux*, de *racloirs* et de *grattebosses* en fil de fer. Les *ébarbeurs*, dont le travail consiste à buriner et à limer les coutures, les trous de jets et les événements, reçoivent les pièces à leur sortie de la râperie. Enfin les pièces en fonte trempées sont souvent soumise à un *meulage* c'est-à-dire qu'on les applique contre de grandes meules en grès, qui font disparaître leurs aspérités. Le finissage des pièces en fonte peut comporter dans certains cas des réparations consistant à faire disparaître autant que possible les défauts, tels que *soufflures*, *dartres*, *bosses*, *reprises*, *gouttes froides*, etc., dont

nous avons eu l'occasion de parler à propos du moulage des pièces : ces moyens ne doivent toutefois être employés qu'avec une grande réserve, et les mouleurs ne doivent jamais réparer les défauts de leurs pièces sans y être autorisés ; c'est à ceux qui surveillent la fabrication et reçoivent les pièces à juger s'il convient d'apporter un remède aux accidents qu'ont éprouvés les objets coulés. Quand les défauts ne nuisent pas à la solidité des moulages, quand ils ne s'opposent pas à leur emploi, quand ils ne les rendent pas d'un aspect tellement désagréable que les acheteurs ne voudraient pas les accepter, on peut les réparer. On peut à cet effet remplacer une partie entièrement défectueuse par une pièce encastrée à queue-d'aronde ou maintenue par une goupille dans la paroi des objets coulés. On peut aussi couler de la fonte sur les parties ou dans les cavités qui ont manqué de matière ; on recouvre alors l'endroit malade d'un côté de moule qui est percé d'un trou de coulée et d'un évent ; puis on coule le métal en le faisant dégorger jusqu'à ce qu'il se soit établi entre lui et la pièce un échange de température tel qu'il adhère bien, sans que son retrait soit trop visible. Si l'on fait dégorger longtemps, et si on a eu soin d'échauffer auparavant la pièce à réparer, on peut arriver à faire des soudures d'une grande solidité.

Lorsqu'on a à faire à des trous ou soufflures superficiels, on peut employer pour les boucher divers mastics composés comme il suit : une partie de cire jaune, cinq parties de résine, une partie d'ardoise ou de marbre pilé, ou bien encore six parties de soufre et quatre parties de limaille tamisée. Un mélange de huit parties de poix noire, deux parties de cendre de bois donne aussi de bons résultats ; mais, nous le répétons, ces palliatifs ne doivent être employés que du consentement des intéressés, car on s'exposerait sinon à des difficultés qui rendraient le remède pire que le mal lui-même.

Organisation du travail des fonderies. — La nomenclature des articles fabriqués dans les fonderies serait interminable et nous nous bornons à indiquer ici les plus importants. On fabrique, pour les usages domestiques, les poêles, marmites et chaudrons de toute sorte, les grilles, plaques, foyers et chenêts de cheminées ; les poids à peser, les fers à repasser constituent à eux seuls une spécialité de certains établissements. Les bancs rustiques, les vases, les statuettes en fonte se rencontrent dans les jardins les plus modestes, et les promenades publiques empruntent à la fonderie les fontaines monumentales et les statues qui les décorent.

Les constructions civiles absorbent une quantité énorme de tuyaux de conduite et de tuyaux de descente. C'est par centaines de kilomètres que les distributions d'eau des grandes villes consomment des tuyaux en fonte dont le diamètre atteint 1 mètre et au delà. Ces tuyaux sont coulés verticalement et soumis, au point de vue de la résistance à la pression, à des épreuves sévères. De grandes usines se sont vouées uniquement à leur fabrication.

Les chemins de fer emploient la fonte sous forme de coussinets pour les voies dont le rail est à double champignon, de plaques tournantes, de grues hydrauliques pour l'alimentation des locomotives, enfin, de colonnes de formes les plus diverses, supportant les toitures métalliques des bâtiments nécessaires au service des voyageurs et des marchandises.

Les mouleurs sont payés presque toujours à la tâche, au moyen d'un tarif qui renferme dans un certain nombre de classes tous les articles qui peuvent être demandés. Ce tarif varie nécessairement suivant la loi naturelle de l'offre et de la demande. Nous avons sous les yeux le tarif d'une fonderie du centre de la France, dans lequel le prix de 5 francs par tonne est employé pour la classe la plus basse, laquelle ne comprend guère que les moulages à découvert sans noyau avec un poids supérieur à 20 kilogrammes. La classe la plus élevée est fixée à 50 francs la tonne; elle comprend entre autres les engrenages, d'un poids supérieur à 500 kilogrammes, toutes les pièces à noyau d'un poids inférieur à 200 kilogrammes, enfin toutes les petites pièces d'un moulage compliqué et d'un poids inférieur à 10 kilogrammes. Nous ne donnons bien entendu ces indications qu'à titre de renseignement général; l'établissement d'une bonne classification suivant les lieux et les circonstances doit être le premier soin d'un directeur de fonderie.

FONTE MALLÉABLE

Nous avons pour terminer ce qui concerne la fonderie à nous occuper d'un produit qui, sous le nom de fonte malléable, forme en quelque sorte un intermédiaire entre la fonte et le fer. Le procédé qui permet de l'obtenir consiste à couler de petits objets de forme délicate et compliquée et à les affiner ensuite de manière à leur donner une ténacité approchant de celle du fer. Cet affinage spécial, qu'on réalise sans atténuer la forme de l'objet, consiste à le chauffer à haute température dans une matière oxydante. Comme il n'y a pas ici de fusion et que l'action oxydante ne peut s'exercer dans la matière solide que de proche en proche, on ne peut affiner ainsi que des objets de faible épaisseur. De plus, comme on ne peut éliminer que les matières dont les produits sont volatils, on ne peut employer pour cette fabrication que des fontes très pures et ne contenant pour ainsi dire que du carbone, et même à condition que celui-ci soit tout entier à l'état de carbone combiné.

En pratique, les objets coulés sont introduits dans des creusets en fonte ayant le plus souvent de 25 à 30 centimètres de diamètre avec 25 centimètres de profondeur. Ils y sont entourés de minerais ocreux pulvérisés, mêlés de battitures, et avec des creusets ayant les dimensions indiquées, le chauffage au rouge doit être prolongé pendant cinq jours et trois nuits. Il se fait ordinairement dans un four de galère formé de deux grilles avec une banquette intermédiaire sur laquelle les creusets sont empilés. Comme ce chauffage énergique est quelquefois accompagné d'une agglomération de la matière oxydante, on facilite le décapage en enduisant les petits moulages d'un lait de chaux ou d'une couche de chlorhydrate d'ammoniaque en dissolution.

Parmi les nombreuses industries qui emploient principalement la fonte malléable, nous citerons la sellerie (mors de brides, embouchures de mors, étriers, éperons, boucles, etc.); la carrosserie (bouts de timons, crapauds, douilles, garde-crottes, portes-lanternes, etc.); la serrurerie (clefs, pièces de

serrures, verrous, charnières, etc.); enfin l'armurie (pièces de revolvers, culasses de fusils, sous-gardes, moules à balles, etc.). Mais ici, comme pour les moulages en coquilles, l'extension qu'a pris la fabrication de l'acier fondu menace cette petite industrie, qui s'est surtout développée dans les Ardennes et dans quelques fonderies de Paris et des environs.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE XII

AFFINAGE DE LA FONTE ET FABRICATION DU FER SOUDÉ

Divers procédés d'affinage. — Fer fondu et fer soudé. — Bas foyers. — Puddlage. — Fours à puddler. — Allures diverses du puddlage. — Puddlage mécanique. — Organisation des usines à puddler.

Nous avons indiqué au chapitre XVI du volume de cette Encyclopédie consacré à l'étude des aciers (page 130 et suivantes), que tous les produits provenant de l'affinage de la fonte pouvaient être renfermés dans les quatre dénominations de : fer soudé, acier soudé, fer fondu, acier fondu.

Nous avons indiqué également que le fer fondu étant obtenu aujourd'hui par les mêmes procédés que l'acier fondu (procédé Bessemer, procédé Martin-Siemens), l'étude de ses propriétés et de sa fabrication ne pouvait guère être faite que conjointement avec celle de l'acier, et nous l'y avons en effet annexée. Il ne nous reste donc plus à étudier ici que le fer soudé, c'est-à-dire celui qui permet de pratiquer d'une manière absolument indiscutable l'opération désignée sous le nom de soudure. Le fer soudé est obtenu par un affinage spécial qui porte le nom de puddlage; il était aussi produit autrefois par la méthode des bas foyers, dont nous avons parlé à propos de la fabrication de l'acier, et qui tend du reste à disparaître à peu près complètement. Le puddlage, bien qu'ayant aussi perdu de son importance par suite du grand développement que prend l'emploi des fers fondus, est encore aujourd'hui un important procédé de fabrication, et nous devons traiter ici toutes les questions que soulève son application en théorie comme en pratique.

Pour bien saisir la théorie du puddlage, il importe de reproduire ici quelques considérations générales sur l'affinage des métaux, en ayant principalement en

vue le cas qui nous occupe. Ici, le métal brut à affiner est la fonte, c'est-à-dire un alliage dans lequel le fer domine de beaucoup, et est accompagné, en prenant les autres éléments, par ordre décroissant, de carbone, de silicium, de soufre, phosphore, manganèse, etc. Supposons un pareil mélange à l'état fondu dans un bassin peu profond, tel que la sole d'un réverbère et exposé à l'action oxydante de l'air. Les éléments les plus avides d'oxygène absorberont d'abord directement ce gaz, mais l'oxygène se portera aussi, et souvent de préférence, à cause de l'influence des masses, sur le métal dominant. Cette oxydation du métal principal est d'autant plus énergique que le courant d'air sera plus rapide et plus abondant, mais elle n'est jusqu'à un certain point que temporaire. A mesure que le métal principal absorbe l'oxygène, l'oxyde formé cède ce gaz aux éléments plus oxydables qui se trouvent disséminés dans le bain métallique. Le métal dominant ne sert donc en quelque sorte que de véhicule pour transporter l'oxygène de l'air aux éléments étrangers qu'il s'agit d'éliminer. Toutefois, pour que cette réaction se produise réellement, il faut un contact intime entre l'oxyde du métal dominant et les parties de la masse qu'il s'agit d'affiner. Or, comme l'oxyde est plus léger que le métal, il restera en général à la surface du bain et cela dans le cas surtout où l'oxyde formé peut se transformer en silicate, c'est-à-dire lorsque le métal impur renferme lui-même du silicium ou lorsque les parois du fourneau dans lequel on opère sont formées d'éléments siliceux, tels que le quartz, les briques, le pisé réfractaire, la brasque argileuse, etc. Il faut donc, pour favoriser l'affinage, éviter autant que possible la présence de la silice et, d'autre part, mêler sans cesse l'oxyde formé au métal à affiner. On réalise la première condition en adoptant des parois métalliques pour l'appareil d'affinage, la deuxième en brassant la masse à affiner.

Nous venons de dire que l'affinage s'opère surtout d'une façon indirecte par l'oxyde du métal dominant. On peut donc hâter l'épuration et diminuer le déchet en mêlant au métal une certaine dose de l'oxyde en question ou des silicates basiques du même oxyde. Lorsque des oxydes se dissolvent dans le métal dont ils proviennent, le brassage s'en trouve diminué d'autant, et l'opération est plus rapide et dans tous les cas moins pénible pour l'ouvrier qui la conduit.

L'oxydation des matières étrangères étant achevée, il reste à séparer le métal affiné des matières oxydées. La chose est facile lorsque la température est suffisamment élevée pour maintenir en fusion les deux produits, comme nous l'avons vu réaliser dans les procédés Bessemer et Martin-Siemens. Lorsqu'au contraire le métal est spongieux, on en expulse les scories par pression ou par percussion ; cette opération quel que soit l'appareil employé est désignée sous le nom de *cinglage* ; il peut arriver que le métal cinglé renferme encore une certaine quantité de parcelles scoriacées ; on le reporte alors au four et après un court réchauffage, qui porte le nom de *corroyage*, on l'amène encore une fois aux appareils de cinglage, qui achèvent la purification.

Four à puddler. — Avant d'entrer dans le détail du puddlage, il est nécessaire de connaître les dispositions particulières que prend le four à réverbère pour cette opération. Il faut avant tout que l'ouvrier puisse atteindre avec son

outil de brassage toutes les parties du four. Cette condition peut être réalisée de diverses façons. La solution la plus simple serait de munir le four de plusieurs ouvertures où l'ouvrier viendrait travailler successivement, mais le puddlage exige une température élevée et ces nombreuses portes seraient une cause de refroidissement. Pour ce motif, la plupart des fours à puddler n'ont qu'une seule porte de travail, et il faut alors que la paroi antérieure soit à pans coupés et que la paroi opposée ait à peu près la forme d'un arc de cercle, tracé du milieu de la porte de travail comme centre. Pour favoriser d'ailleurs l'uniformité de température dans le laboratoire, on donne à l'autel du côté du rampant une longueur moins grande qu'au pont, et on abaisse quelque peu la voûte depuis la chauffe jusqu'à la cheminée. Ces conditions motivent la forme irrégulière des fours de puddlage dont les figures 23, 24, 25, 26, indiquent les principales dispositions.

Le puddlage étant une opération coûteuse par la dépense de combustible qu'elle occasionne, on a cherché à com-

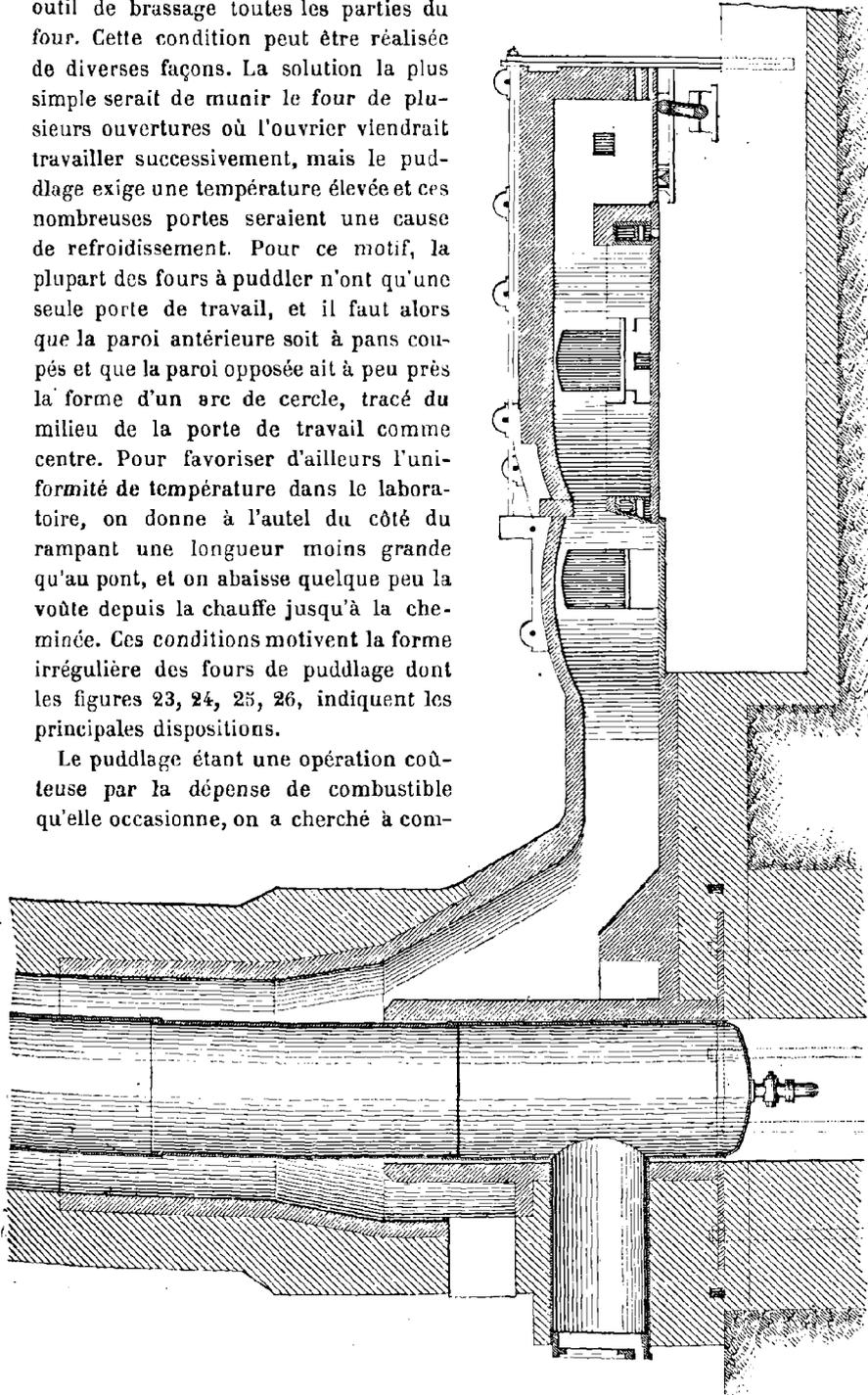


Fig. 23. — Four à puddler avec chaudière verticale (Coupe en long).

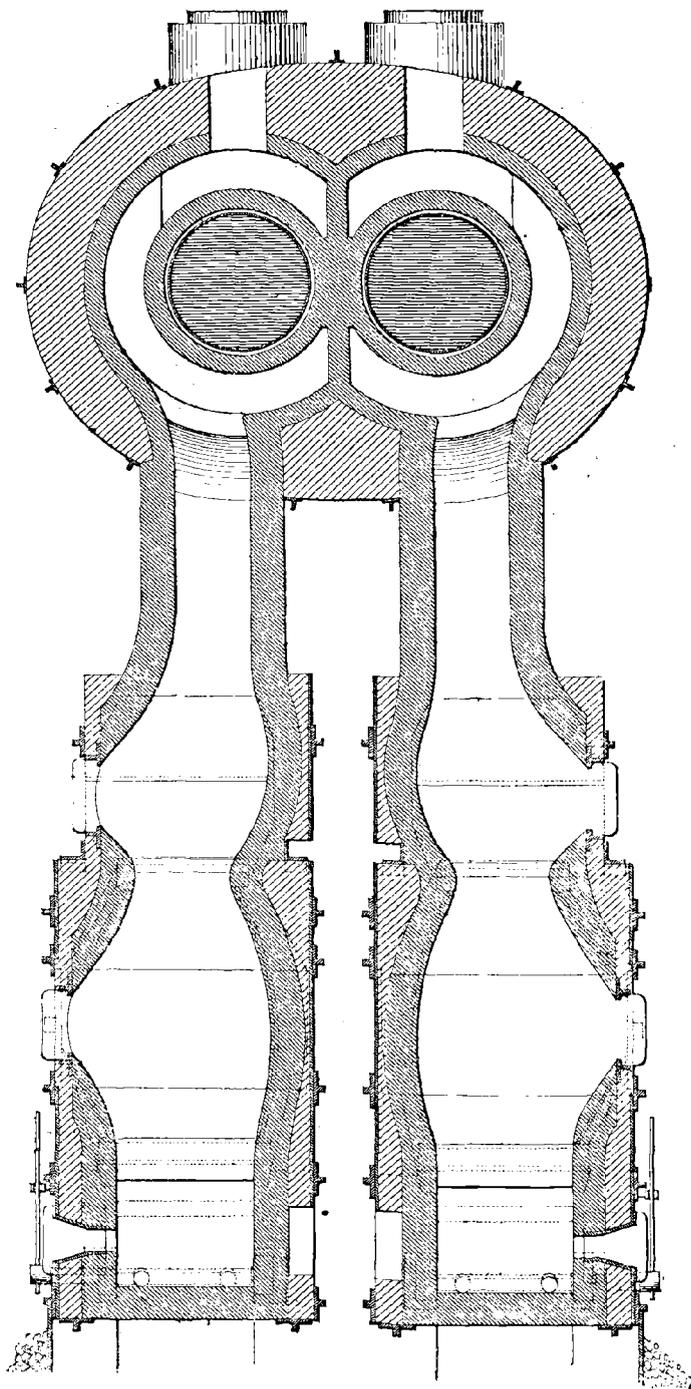


Fig. 24. — Four à puddler accolés desservant deux chaudières verticales (Coupe horizontale).

pléter les fours par des dispositions spéciales permettant d'utiliser la chaleur perdue après l'affinage proprement dit.

Une disposition, assez généralement adoptée, consiste à faire suivre le four à réverbère dans lequel s'opère cet affinage, par une sole plus petite sur laquelle

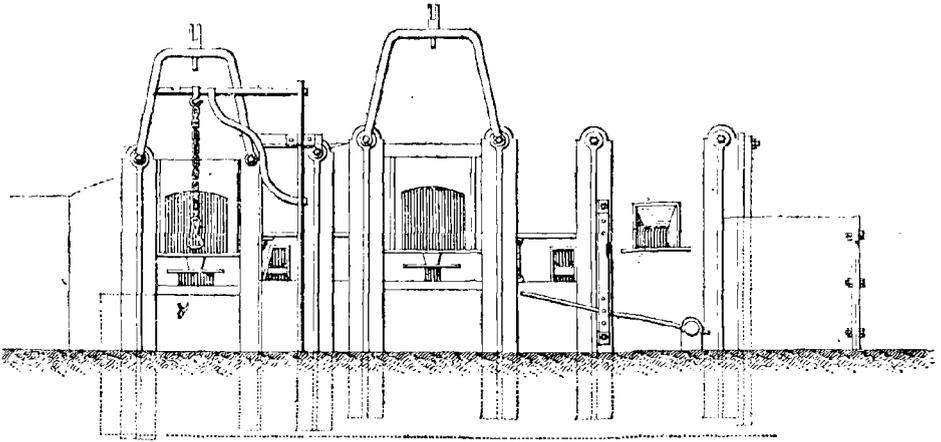


Fig. 25. — Four à puddler (Vue latérale).

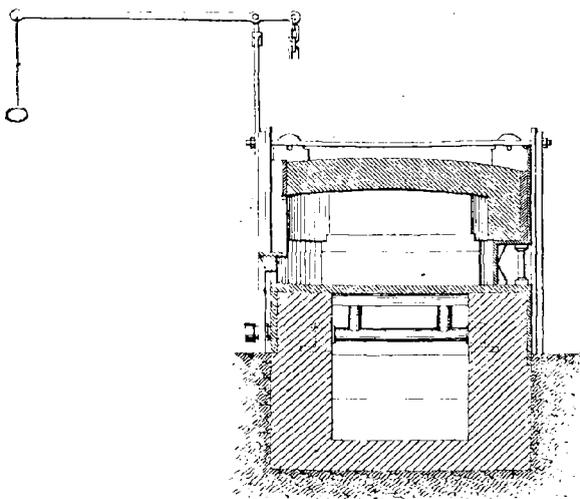


Fig. 26. — Four à puddler (Coupe en travers).

sont portés au rouge les gueusets de fonte qui doivent servir à l'opération suivante. Le four dont le dessin est ci-joint est construit d'après ce système. En outre, les flammes qui ont passé sur ces gueusets sont fréquemment employées à chauffer des chaudières à vapeur; ces chaudières sont générale-

ment verticales, mais il en est aussi d'horizontales, et elles sont même quelquefois placées au-dessus du four. Les figures 23, 24, 25 et 26 indiquent la manière dont les chaudières verticales sont disposées par rapport au four.

Le mode de chauffage du four peut aussi donner lieu à diverses combinaisons. La disposition la plus simple, mais aussi la plus coûteuse, consiste à brûler de la houille en fragments plus ou moins gros sur la grille du réverbère. Les combustibles menus étant toujours, comme nous l'avons vu, d'un prix moins élevé que le gros ou moyen charbon, on a cherché à les employer en activant le tirage au moyen du vent soufflé. Au lieu de puddler à la houille, on peut aussi puddler au bois, à la tourbe, au lignite, mais comme ces combustibles sont aquifères et renferment en outre beaucoup d'oxygène, ils chauffent moins et oxydent davantage; il faut donc autant que possible les employer, sinon torréfiés, au moins fortement desséchés; il faut aussi rapprocher les barreaux de la grille et modérer l'afflux de l'air: cependant, même dans ces conditions, il est difficile d'obtenir une marche bien régulière. Lorsque les combustibles sont de qualité tout à fait inférieure, il vaut mieux les transformer en gaz; nous aurons l'occasion de mentionner des applications intéressantes de ce procédé. Dans ce même ordre d'idées, quelques maîtres de forges, parmi lesquels nous citerons M. de Langlade, copropriétaire des usines de Savignac-Lesdrier, dans la Dordogne, ont cherché à utiliser les gaz des hauts fourneaux pour le puddlage de la fonte. Nous avons vu, dans la partie de ce travail consacré à l'étude des hauts fourneaux, que ces gaz ont une utilisation toute naturelle dans le chauffage énergique de l'air et des chaudières qui fournissent la force motrice. Aussi, sauf dans quelques usines, où les minerais sont réductibles et les fontes qui en résultent faciles à traiter, ce procédé ne s'est point répandu.

Les fers à puddler tels que nous venons de les décrire, ne peuvent avoir comme on le verra plus loin, qu'une faible production journalière. On a cherché à y remédier en y construisant des *fours doubles*, c'est-à-dire des fours munis d'une porte de travail sur chacun de leurs côtés. On a même cherché à construire des *fours quadruples*. On a construit il y a peu d'années dans plusieurs usines de Westphalie, un four de cette sorte, breveté par M. l'ingénieur Karl Kuepper. Ce four marche au gaz et un ventilateur lance l'air sur la grille du gazogène et à l'entrée du laboratoire. La sole est à circulation d'eau et d'air. Elle mesure 4^m,45 de long sur 2 mètres de large; la grille a 1^m,17 sur 1^m,20. Les dimensions extérieures du four sont de 2^m,30 sur 6^m,50. Nous n'avons pas connaissance que ces appareils se soient propagés en France, tandis que les fours doubles y sont assez répandus.

Quelles que soient les dispositions des fours à puddler, il est un point qui mérite une attention toute spéciale; c'est leur mode de garnissage intérieur. On a vu plus haut l'influence fâcheuse des garnissages siliceux; aussi a-t-on été peu à peu conduit à remplacer les briques ordinaires, dans lesquelles la silice et l'argile dominant, par des plaques en fonte, recouvertes d'oxyde de fer ou de scories basiques. On avait essayé, dès 1825, de remplacer le sable de la sole par des scories pilées, fortement battues sur un massif en briques, mais ces scories non refroidies fondaient bientôt et corrodaient elles-mêmes les briques. On a remédié

à cet accident en les étalant sur une plaque en fonte librement supportée le long des bords ou reposant tout au plus sur de faibles piliers ou sur des poutres en fer et fonte, de telle sorte que l'air puisse circuler sous la plaque et constamment la rafraîchir.

Après avoir réalisé ce premier perfectionnement on a songé à modifier également les parois latérales du four. Lorsque la température est peu élevée, on se contente de munir le bas de ces parois d'un revêtement basique appelé cordon. On se sert pour cela de minerais riches, de battitures, c'est-à-dire des pellicules fortement oxydées qui se détachent lors du cinglage ou des réchauffages successifs et parfois aussi de calcaire; mais lorsqu'on veut puddler à haute température, il faut remplacer les briques inférieures des parties latérales, ainsi que celles de la sole par des plaques de fonte de 0^m,30 à 0^m,35 de hauteur, convenablement refroidies. Comme elles sont encore plus exposées que la sole, elles doivent être refroidies plus énergiquement par un courant d'air ou courant d'eau, ou encore par un filet d'eau qui agit par évaporation. La coupe du four de la figure 26, montre l'agencement des tuyaux qui amènent cette eau.

Diverses sortes de puddlage et phases diverses de l'opération. — On distingue ordinairement, d'après la nature des fontes et celle des produits qu'on veut obtenir, deux sortes de puddlage : celui qu'on désigne par les divers qualificatifs de *gras, chaud et bouillant*, et le puddlage *sec et froid* ou puddlage *ordinaire*. Le premier, qui est moins rapide et plus coûteux, emploie ordinairement des fontes plus ou moins grises ou bien des fontes blanches mais manganésées; il dure par conséquent plus longtemps et donne des fers supérieurs ou des aciers puddlés. Le second a pour point de départ des fontes blanches rayonnées; il marche vite, mais il ne peut donner que des fers communs.

Quel que soit le mode de puddlage qu'on a en vue, chaque opération se compose de trois périodes : la fusion, le brassage et la confection des loupes. On a vu que la fonte est ordinairement introduite rouge dans le laboratoire du four. On l'y charge au moyen d'une spatule, et on y ajoute une certaine quantité de battitures de scories riches. En général on en met d'autant plus que les fontes sont plus carburées et plus impures. Le chargement fait, on abaisse la porte de travail, on ouvre le clapet de la cheminée et on pousse activement le feu de manière à hâter la fusion de la charge. Le temps nécessaire est de vingt à trente minutes; mais, dans le puddlage sec que nous avons en vue en ce moment, on ne cherche pas à opérer la fusion complète : on se contente de ramollir la fonte en une sorte de masse pâteuse ou sableuse facile à désagréger à l'aide d'un ringard. Pour éviter l'excès de température et ralentir l'appel de l'air, on doit même à ce moment fermer presque entièrement le clapet de la cheminée. C'est l'ouvrier laboure la fonte et les scories au moyen d'un fort ringard recourbé à angle droit à son extrémité. Pour opérer ce brassage, on n'ouvre pas la porte de travail elle-même; l'ouvrier éprouverait une chaleur trop vive et le four lui-même serait refroidi; le crochet est introduit par une ouverture carrée de 0^m,10 environ de côté, pratiquée dans le bas de la porte, et facile à clore au

moyen d'une simple plaque, en dehors des moments où l'ouvrier travaille la charge.

Pendant le brassage, le silicium et le manganèse, puis le phosphore passent dans la scorie; le soufre est éliminé sous forme d'acide sulfureux, et le carbone à l'état d'oxyde de carbone et d'acide carbonique. En même temps les particules métalliques, au lieu de glisser les unes sur les autres comme des grains de sable, commencent à se réunir en grumeaux, puis à se souder en masses plus fortes. Les puddleurs disent alors que le fer *prend nature* et cette transformation de la matière constitue la fin du brassage qui, dans le puddlage sec, dure de vingt à trente minutes suivant la nature de la fonte.

A ce moment la masse ferreuse se présente dans le fourneau sous la forme d'une grosse éponge plate, fortement imbibée d'une scorie plus liquide. Pour la sortir du four, on la divise *en loupes*, pesant chacune de 30 à 40 kilogrammes. A cet effet, il faut favoriser le sondage des particules ferreuses et faciliter l'écoulement des scories hors des pores de la matière. Pour cela on donne un dernier coup de feu; au bout de cinq à six minutes la masse spongieuse est suffisamment ramollie pour que la division en loupes puisse avoir lieu et celles-ci sont alors portées aux appareils de cinglage. L'opération entière dure de une heure à une heure un quart, et dès que la dernière loupe est sortie du four, on fige avec de l'eau les scories qui restent sur la sole; on répare celle-ci ainsi que le cordon s'il en est besoin, et on procède immédiatement à un nouveau chargement.

Le puddlage chaud peut comme le puddlage froid être divisé en trois périodes, et il ne diffère du précédent que pendant celle du brassage. Avant de commencer ce brassage, on doit arriver à une fluidité complète de la fonte qui forme sur la sole du four une nappe liquide de 0^m,02 de profondeur. Dans ces conditions, l'affinage suivant son cours régulier, au moment où le carbone commence à former de l'oxyde de carbone, le bain tend à bouillonner; il *monte*, suivant l'expression des puddleurs. Les bulles de gaz soulèvent la masse, des jets de flamme bleuâtre sortent du bain; la scorie fondue, mêlée de globules de fonte, s'élève jusqu'à 30 centimètres au-dessus de la sole; elle atteint souvent même le seuil de la porte et en déborde sous forme de nappe fluide. La période de brassage offre donc dans le puddlage chaud deux périodes bien distinctes; une première phase tranquille comprenant surtout la *scorification* du silicium et du manganèse; la seconde agitée, celle de *bouillonnement*, qui correspond à la décarburation. On remarque tout naturellement que ces deux périodes sont celles qu'on rencontre dans l'opération Bessemer, qui est un puddlage chaud au premier chef.

A mesure que le carbone disparaît, il faut élever la température afin de maintenir le métal en fusion aussi longtemps que possible. Il arrive cependant un moment où le fer plus ou moins décarburé se fige en grumeaux solides, qui bientôt se soudent les uns aux autres. C'est le moment de faire les loupes qui, extraites du four à une température plus élevée, laissent plus facilement s'écouler la scorie dont elles sont imprégnées.

On voit en résumé, qu'à part la nature et la consistance de la masse, le puddlage chaud ne diffère du puddlage sec que par la température. Le principe

du travail est le même, mais sa durée est plus considérable à cause de la fluidité plus grande de la masse, due tout à la fois à la surélévation de la température et aux proportions plus fortes du carbone et du silicium dans la fonte.

Puddlage mécanique. — Dans le puddlage froid comme dans le puddlage chaud, l'affinage s'opère par un brassage prolongé de la masse. Ce travail est un des plus fatigants qui soient imposés à l'ouvrier d'usine; le moyen de le supprimer et dans tous les cas de le faciliter a constamment préoccupé les métallurgistes. On a cherché à obtenir ce résultat soit en laissant le four fixe et en opérant le brassage par un outil mis en mouvement par un moteur spécial; soit en rendant le four mobile et en brassant ainsi la matière par le mouvement du four lui-même. Parmi les nombreuses inventions ayant pour but le puddlage mécanique, il n'en est aucune qui ait pris franchement le pas sur les autres. Nous en indiquerons le principe, sans entrer dans des détails qui ne sauraient trouver leur place ici.

Le procédé fondé sur l'emploi d'outils mécaniques fut appliqué vers 1862, par M. Lemut, aux forges de Clos-Mortier, dans la Haute-Marne. Nous l'avons vu employé sur une grande échelle en 1869, par MM. de Wendel, dans leurs usines d'Hayange. Le procédé peut s'appliquer aux fours simples ordinaires, mais il convient surtout aux fours doubles pourvus de deux portes de travail opposées. Le mécanisme destiné à mouvoir les crochets est établi au-dessus de chaque porte et se compose d'un axe horizontal mis en mouvement par une poulie. Au bout de cet axe se trouve un plateau manivelle, auquel sont attachées deux bielles qui impriment un mouvement horizontal de va-et-vient aux crochets brasseurs. De plus, pour permettre à ces crochets d'atteindre successivement tous les points de la sole, l'axe porte un système d'engrenages et de leviers articulés, donnant à tout l'appareil un mouvement alternatif de rotation extrêmement lent. Le bain se trouve ainsi brassé dans tous les sens sans autre travail de la part de l'ouvrier, que celui qui consiste à remplacer de temps en temps les crochets trop chauds par des crochets nouveaux. La fin du brassage s'opère à la main comme dans le puddlage ordinaire.

Le brassage mécanique a été réalisé également par l'ingénieur Dormoy : son procédé consiste à suspendre le bout extérieur du crochet au moyen d'une courroie sans fin à un petit tambour auquel on imprime un rapide mouvement de rotation, tandis que le crochet tourne autour de l'axe à la vitesse de trois cents à quatre cents tours par minute; l'ouvrier le promène dans la fonte à la manière ordinaire. Malgré ce double mouvement qui brasse la fonte d'une façon très vive, le puddleur Dormoy ne s'est que peu répandu.

Comme dernier type d'outils mécaniques de puddlage, nous citerons celui que nous avons vu fonctionner en 1876, aux usines de Firminy, dans la Loire, d'après les données de M. Lespinasse. Ici, la sole du four étant circulaire, le brassage est obtenu par un arbre vertical en fer, pourvu à son extrémité inférieure de deux palettes horizontales, légèrement déversées en forme de bras d'hélice. L'arbre pénètre dans le four par le sommet de la voûte; lorsque la fonte est fondue, on l'abaisse et on lui imprime une vitesse de douze à quinze tours par minute; le brassage mécanique dure dix minutes environ. On relève

l'arbre à palettes lorsque le métal commence à s'épaissir, et dès lors le travail s'achève à la façon ordinaire.

Comme nous l'avons dit, le second mode de puddlage mécanique consiste à mettre en mouvement le four lui-même ou tout au moins la sole; dans le premier cas, les fours sont *rotatifs* ou *oscillants*; dans le second, ils sont à *sole tournante*. Le principe de tous ces systèmes (Ménélaus, Danks, Crampton, Sellers, etc.), consiste à intercaler entre une chauffe et une cheminée fixe, un laboratoire qui a le plus souvent la forme d'un ellipsoïde mobile autour de son axe horizontal. La difficulté principale consiste à trouver pour ce laboratoire tournant, un garnissage capable de résister au roulement des masses à demi affinées. Dans le four Crampton, on a employé deux enveloppes concentriques entre lesquelles on fait circuler l'eau. Ce système, qui refroidit énergiquement, maintient mieux la garniture.

Dans les fours à sole tournante, au lieu de donner le mouvement à la masse entière du four, on se borne à mouvoir la sole autour de son axe, les parois latérales et la voûte restant immobiles. Si, de plus, on incline de 6 à 7 degrés, l'arbre vertical qui porte la sole, on comprend que ce mouvement combiné puisse opérer le brassage de la matière qui repose sur elle. Le type le plus satisfaisant des appareils de ce genre est le four Pernot, dont nous avons déjà eu l'occasion de citer l'inventeur à propos des fours pour la fabrication de l'acier. Le four se compose, comme tous ceux déjà décrits, de trois parties : la chauffe, le laboratoire et la cheminée. La chauffe et la cheminée ne présentent rien d'extraordinaire; quant au laboratoire, la voûte et les parois sont également fixes, tandis que la sole circulaire est mobile et, de plus, installée sur un chariot, ce qui facilite les réparations. Elle consiste en une sorte de cuvette en forte tôle qui roule sur des galets coniques. Le mouvement de rotation est communiqué à la sole au moyen d'un pignon agissant sur une roue dentée qui est boulonnée sur la face inférieure de la cuvette. La force motrice nécessaire pour donner le mouvement à la sole est de deux à trois chevaux.

La cuvette est garnie comme la sole des fours de puddlage ordinaires de minerais riches et purs, cimentés par fusion au moyen de battitures et de scories de cinglage. Une difficulté pratique du four à sole tournante est le joint entre la cuvette et la plaque fixe qui supporte les pieds droits de la voûte. Ce joint détermine sous l'action de la cheminée un énorme appel d'air qui tendrait à oxyder et refroidir outre mesure le bain métallique. Aussi est-on obligé de recourir à un foyer soufflé, tout en évitant un excès de pression qui gênerait le travail du puddleur et pourrait fondre le four. Cet inconvénient de la sole tournante fait que le four Pernot ne s'est pas plus répandu que les autres appareils énumérés avant lui. En résumé, le puddlage mécanique nous paraît attendre encore sa solution entièrement pratique, et comme nous l'avons déjà dit, il est probable que l'opération du puddlage elle-même, tombera en désuétude avant que de nouveaux progrès aient été réalisés.

Roulement des fours à puddler. — Comme la description du procédé le fait voir, le four à puddler est un appareil intermittent. Il procède par charges, et plus le nombre de ces charges sera grand dans une journée, plus le poids de la

charge sera en même temps considérable, plus les résultats économiques de l'appareil seront avantageux, car si la consommation de combustible et la main-d'œuvre augmentent avec la production totale du four, cette augmentation n'est pas directement proportionnelle; malheureusement, la qualité du produit est ici en raison inverse de la production journalière, car le puddlage chaud, qui donne des produits de qualité, exige des charges plus longues que le puddlage sec.

Dans les fours à puddler ordinaires, le poids de la charge varie de 200 à 300 kilogrammes par douze heures; elle est le plus souvent de 225 ou de 250 kilogrammes. Le nombre de charges par douze heures varie de six à sept avec les fontes ordinaires; avec les fontes blanches de Styrie, l'opération est beaucoup plus rapide, et on arrive jusqu'à dix et même douze opérations dans le même temps. Ces fontes sont comme nous l'avons vu d'une grande pureté, le carbone s'y trouve à peu près entièrement à l'état de carbone combiné; l'allure du puddlage peut donc être avec elles très rapide, et les usines qui traitent encore au haut fourneau des minerais spathiques au charbon de bois regagnent ainsi en partie par l'affinage le prix de revient élevé de la fonte.

La consommation de combustible dépend naturellement de ce combustible et de la qualité de la fonte obtenue. La rareté de la houille, l'abondance du bois et des lignites ont conduit un certain nombre de forges austro-hongroises à employer le puddlage au gaz dont les résultats sont aujourd'hui très satisfaisants. C'est l'usine de Salgo-Tarjan non loin de Pesth qui, arrivant difficilement à obtenir dans ses fours à puddler la chaleur nécessaire avec les lignites de médiocre qualité dont elle disposait, a donné dès 1877 l'exemple de cette transformation. Cet établissement avait, il y a peu d'années, douze fours doubles construits d'après le système de l'ingénieur Borbely. Une équipe de cinq ouvriers y faisait en douze heures sept charges de 600 kilogrammes avec une perte au feu de 3 p. 100 avec une consommation de 1100 kilogs de lignite aux générateurs par tonne de fer produit.

Comme type d'usine faisant le puddlage au gaz en employant le bois comme combustible, nous citerons celle de Brezova, appartenant à l'État hongrois, et où fonctionnaient, à la même époque, cinq fours doubles faisant en douze heures au moins six charges de 550 kilogrammes avec une dépense en combustible d'environ 0^m^c,300 de bois de hêtre tandis qu'elle était autrefois de 0^m^c,600 à 0^m^c,700. Le déchet y est aussi très faible, et dépasse rarement 2 p. 100.

Si nous revenons maintenant au chauffage des fours à puddler au moyen de la houille, qui est de beaucoup le plus répandu, nous nous trouvons en présence de chiffres de consommation différents, suivant qu'on emploie la houille en morceaux ou la houille menue. On avait cru pendant longtemps cette dernière impropre au chauffage des grilles des fours à puddler, mais on l'utilise aujourd'hui, à condition qu'elle ne soit pas trop cendreuse, soit en soufflant de l'air sous les grilles horizontales, soit en la chargeant sur des grilles à gradins, qui augmentent la surface, donnent un tirage plus actif, et ont l'avantage de se nettoyer plus facilement. A l'usine de Reschitza appartenant à la Société austro-hongroise des chemins de fer de l'État, où ces grilles étaient employées, la consommation de houille menue était de 1,130 kilogs, par tonne de fer, et le déchet

résultant de l'opération de 10 p. 100, en partant de fonte grise destinée à des produits de choix. La charge des fours était de 300 kilogs et on en faisait en moyenne six par douze heures.

En regard de ces résultats nous placerons ceux obtenus également dans le puddlage à la houille dans une forge importante du centre de la France traitant un mélange de fonte blanche et de fonte grise pour la production du fer ordinaire. Le nombre des charges par douze heures variait de huit à neuf avec un poids de 225 kilogs. La consommation de combustible variait de 6 à 700 kilogs, et le déchet ne dépassait pas de 7 p. 100 du poids chargé. Dans les usines belges fabriquant du fer puddlé pour rails, on aurait trouvé des résultats plus favorables encore.

Le nombre des ouvriers desservant un four à puddler varie avec les dimensions et la construction du four. Pour les petits fours à la houille ne chargeant pas plus de 300 kilogs, un puddleur, un aide puddleur faisant en même temps fonction de chauffeur et un gamin leveur de porte sont suffisants. Dans les fours doubles, dont la charge s'élève à 500 ou 600 kilogs, le nombre des ouvriers se trouve doublé ; c'est tout au plus si le gamin supplémentaire peut être économisé. Ce personnel est toujours payé à la tâche, en vertu de tarifs assez compliqués qui font entrer à la fois en ligne de compte la quantité produite, la qualité du produit et l'économie réalisée sur la quantité de fonte et de combustible alloués pour chaque opération. La somme ainsi obtenue est alors partagée entre le puddleur, l'aide et le leveur de porte suivant un certain coefficient qui est par exemple de 50 p. 100 pour le premier, de 32 p. 100 pour le second et de 18 p. 100 pour le troisième. Nous mettons ci-dessous en regard pour divers pays, le gain moyen d'un puddleur par journée de douze heures, avec la production correspondante :

	SALAIRES	PRODUCTION
	FR.	KILOG.
Belgique.	5 50 à 6 »	1450
France	7 » à 9 »	1900
Allemagne.	6 » à 8 »	1700
Cleveland	8 » à 9 »	1500
Staffordshire.	9 » à 10 »	1200
Pays de Galles	5 » à 6 »	1500
Amérique	25 » à 30 »	1200

Le salaire journalier s'est élevé à 43 francs à Pittsburg, pendant la guerre américaine de la sécession ; en 1873, ce salaire est monté aussi en Amérique à 38 francs, tandis qu'il n'a pas dépassé 17 francs dans le Staffordshire, et 8 francs en Belgique.

Corroyage et cinglage. — La loupe sortant du four à puddler se présente sous forme d'une masse spongieuse d'une forme irrégulière et fortement imprégnée de scorie. On désigne sous le nom de cinglage l'opération, qui tout en expulsant la scorie donne à la loupe une forme à peu près géométrique, facilitant son emploi dans les opérations ultérieures. Le cinglage peut être opéré par pression ou par

percussion, et quel que soit le procédé employé, le *lopin* ou *massiau* résultant de ce premier travail retient encore des particules scoriacées peu fluides, spécialement riches en oxyde de fer. Aussi dans les forges où on veut obtenir du fer de qualité, on soumet bien souvent les *balles* à un nouveau coup de feu avant de donner au *massiau* sa forme définitive. Le déchet est légèrement accru. L'opération est allongée de cinq à dix minutes, mais l'expulsion des scories est rendue plus complète.

Les appareils opérant le cinglage par pression sont les presses et les *cingleurs rotateurs* employés en Amérique. Ce sont des sortes de moulins à axe vertical, formés d'une roue centrale en fonte d'environ 1^m,20 de diamètre et 0^m,20 de hauteur, qui donne une vitesse de cinq révolutions dans une enveloppe fixe également en fonte et courbée en spirale. La circonférence de la roue et la surface intérieure de l'enveloppe sont cannelées; la loupe engagée entre ces deux surfaces est comprimée de plus en plus, car leur intervalle qui est d'abord d'environ 50 centimètres, décroît jusqu'à 10 centimètres, dimension de la première cannelure du train à loupe. L'opération dure de dix à quinze secondes et elle n'exige qu'une main-d'œuvre insignifiante, tandis qu'on estime en Amérique à 4 francs environ par tonne le cinglage par le marteau-pilon. L'inconvénient de ce procédé est qu'il ne peut s'appliquer qu'à des loupes de fer de qualité, car sinon le métal se désagrège.

Le cinglage par percussion s'opérait autrefois au moyen de marteaux à queue nus le plus souvent par des roues hydrauliques, mais depuis que le marteau-pilon a pénétré dans la pratique des usines, c'est ce dernier qu'on rencontre pour le cinglage des loupes dans toutes les usines de puddlage. On emploie en général des marteaux à simple effet pesant de 2,000 à 3,000 kilogrammes. Un poids plus considérable serait nuisible en ce sens que le marteau travaillant avec tout son effet utile écraserait la loupe avant que l'expulsion de la scorie ait pu être complète.

Dans certains cas au lieu de laisser au *lopin* sa forme prismatique, on profite de la chaleur qui lui reste pour lui donner la forme de barres plates désignées sous le nom de *millbars*. Cette dernière façon du fer brut est donnée au moyen de laminoirs à cannelures plates dont la construction ne présente rien de particulier à signaler.

Classification des fers bruts. — La grande variété des usages auxquels le fer brut est destiné oblige à une classification rigoureuse des produits de puddlage : c'est par les soins apportés à cette classification que certaines usines ont acquis la réputation dont elles jouissent. Chaque charge du four à puddler doit être soumise à un examen, et nous avons même vu pousser quelquefois la minutie jusqu'à prélever un échantillon de chaque *millbar* pour en déterminer la qualité.

On distingue avant tout le fer brut en *fer à grain* et *fer à nerf*. Cette distinction repose sur l'aspect de la cassure de la barre. Tandis que le fer à grain présente une cassure nette, avec un grain homogène et brillant qui rappelle beaucoup le grain de l'acier doux ; le fer à nerf montre une cassure fibreuse, un peu terne et caractérisée par ce qu'on désigne dans les usines sous le nom d'*arrachement*. Il résulte d'une décarburation plus complète que le fer à grain, qui

dans les variétés à grain fin (*Feinkorneisen* des Allemands) ne se distingue plus guère de l'acier puddlé.

Outre ces deux variétés essentielles, le puddlage peut produire, certains fers bruts destinés à des emplois spéciaux. C'est ainsi qu'à l'époque de la fabrication des rails en fer, on cherchait à obtenir pour en former le champignon, un fer phosphoreux à gros grain, qui résistait particulièrement bien à l'usure résultant du frottement, tandis que le fer à nerf était spécialement employé dans le patin et dans l'âme du rail. L'emploi du métal fondu homogène est venu mettre fin à toutes ces recherches de fabrication.

Dispositions générales des usines de puddlage. — Ainsi qu'on l'a vu un four à puddler arrive difficilement à produire dans les meilleures conditions plus de 2,000 kilogrammes de fer par vingt-quatre heures, soit en comptant trois cent journées de travail, six cents tonnes par an; et encore par suite des réparations qui sont souvent importantes, ce chiffre ne peut guère être atteint. Une forge faisant 50,000 tonnes de fer brut (chiffre qui n'avait rien d'excessif à l'époque de la grande fabrication des rails en fer) devait donc posséder au moins cent fours à puddler. La disposition la plus avantageuse de ces fours par rapport aux marteaux et aux laminoirs était une des préoccupations de l'ingénieur. Tantôt on les disposait sur une rangée unique, les appareils mécaniques formant une seconde ligne parallèle; tantôt au contraire les fours à puddler formaient une sorte de fer à cheval autour des pilons et des laminoirs. Si l'on envisage que chaque four ou tout au moins deux fours accolés étaient pourvus d'une chaudière, que des voies nombreuses devaient être disposées pour le transport de la fonte et de la houille, pour le classement et le dépôt de massiaux et de millbars, on comprendra l'espace considérable que devait occuper une grande forge de puddlage, et l'activité extraordinaire qui devait y régner. Où trouver aujourd'hui cent fours à puddler en activité? Deux cornues Bessemer mues par une seule main, et desservies par un petit nombre d'ouvriers, font aujourd'hui le même travail. On voyait autrefois dans nos rades des vaisseaux de cent vingt canons. Des centaines de matelots et de canonniers étaient nécessaires pour les mettre en mouvement et les disposer au combat. Que pourraient-ils aujourd'hui contre un cuirassé armé seulement de quelques canons monstres pouvant à l'abri de leurs tourelles menacer tous les points de l'horizon? La même transformation s'est, produite dans l'industrie métallurgique. L'atelier Bessemer avec ses puissants moteurs hydrauliques, ses souffleries représentant une force de plusieurs milliers de chevaux, s'est substitué aux longues rangées de four à puddler, qui n'existent plus guère que dans notre souvenir.

CHAPITRE XIII

FERS LAMINÉS

Confection des paquets. — Fer de ferraille. — Fours à réchauffer. — Fabrication des divers produits laminés obtenus par l'emploi du fer paqueté. — Fers marchands et fers profilés.

Le puddlage exige, comme on l'a vu, le fractionnement de la charge du four en plusieurs loupes dont le poids ne peut guère dépasser 200 kilogrammes et varie le plus souvent de 50 à 60 kilogrammes. Les millbars qui en proviennent peuvent être laminés directement en barres fines lorsqu'il s'agit de petits échantillons, tels que des petits ronds, des petits carrés, en un mot de profils minces. Lorsque la barre au contraire doit atteindre, comme cela arrive à tout moment, un poids de plusieurs centaines et même de plusieurs milliers de kilogrammes, il est nécessaire de réunir un grand nombre de millbars, pour arriver à un demi produit de dimensions convenables ; la soudabilité du fer intervient ici de la manière la plus précieuse pour permettre à ces millbars juxtaposés de former une nouvelle masse homogène, mais qui pourtant ne mérite jamais autant cette dénomination que les lingots fondus, tels que les procédés Bessemer et Siemens-Martin les donnent si facilement aujourd'hui.

On désigne sous le nom de *paquet* la pièce de forme presque toujours parallélobipédique résultant des millbars juxtaposés. La forme et la composition des paquets constitue une des parties importantes du travail de la forge. Leur section doit naturellement être toujours supérieure à la section de la barre finie : en dehors de la question de forme, on doit tenir compte de mille circonstances destinées à assurer la bonne confection du paquet et la soudure des mises. Nous en indiquerons quelques-unes en examinant les diverses fabrications.

Il est rare que la longueur du paquet ait exactement la longueur des millbars ; ceux-ci doivent donc être découpés à froid au moyen de *cisailles* qui sont l'outil essentiel d'une *halle de paquetage*. Ce paquetage est tantôt concentré dans un point unique de la forge, tantôt dispersé derrière chaque train de laminoirs auquel les paquets sont destinés. La première disposition a l'avantage de mieux utiliser les cisailles et les balances qui servent à peser les mises et les paquets, et

de rendre aussi la surveillance plus facile; mais elle multiplie les transports et les rend par suite plus coûteux.

Les millbars, désignés aussi sous le nom de fer brut, n'entrent pas seuls dans la composition des paquets. On y fait entrer quelquefois des fers plats ou carrés provenant eux-mêmes d'un paquetage et d'un laminage antérieur, et désignés sous le nom de *fers corroyés*. On emploie aussi les fers corroyés lorsqu'on veut avoir comme enveloppe extérieure du paquet de larges plaques qui portent le nom de *couvertes*, comme par exemple dans la fabrication des tôles. Ces plaques maintiennent les mises intérieures qui sont de dimensions plus petites, mais elles contribuent en même temps à augmenter la qualité du produit fini. On constate en effet qu'à chaque corroyage, le fer acquiert de la qualité, c'est-à-dire prend un grain plus serré, il résiste mieux aux essais de traction qui pour le fer comme pour l'acier sont aujourd'hui le critérium de la qualité. Aussi emploie-t-on souvent du fer corroyé même pour les petits échantillons dont le laminage n'exigerait que du fer brut, si on n'avait uniquement en vue que les facilités de la fabrication et l'abaissement du prix de revient.

Fer de ferraille. — Il est une autre variété de demi-produit qui entre dans la composition des paquets et qu'on désigne sous le nom de *fer de ferraille*. L'emploi des objets en fer donne lieu à de nombreux remplacements par suite de l'usure plus ou moins complète de ces objets, ou de la démolition des bâtiments dans lesquels le fer intervient. Les grandes villes fournissent des quantités considérables de ferrailles qui, mises sur la sole d'un four à réverbère, peuvent surtout lorsqu'ils sont de petites dimensions se ramollir et se souder de manière à former des loupes semblables à celles qui résultent du puddlage de la fonte. Ces loupes cinglées et laminées donnent des millbars dont la qualité varie nécessairement avec la nature de la ferraille employée. Lorsque cette ferraille provient de menus objets auxquels on demande ordinairement de la qualité, tels que de vieux fers à cheval, articles de boulonnerie, etc., le fer qui en résulte est le plus souvent de bonne qualité et est recherché à l'égard des meilleurs fers puddlés.

Fers platinés. — Lorsque les vieux fers rentrant dans la fabrication sont de gros profils, et pourraient par suite difficilement se prêter au travail décrit ci-dessus, on peut employer pour les faire entrer dans la composition des paquets un autre artifice, qui consiste à ramener leur forme trop accentuée à une forme plus avantageuse pour la composition du paquet. C'est ainsi que nous avons vu souvent en Allemagne de vieux rails en fer, portés au rouge sombre, puis passés à plat par une série de cannelures qui aplatissaient successivement la tête et le patin de manière à les ramener à peu près à la forme d'un plat ordinaire. Dans d'autres établissements le passage par une seule cannelure séparait la tête, l'âme et le patin; les deux derniers fragments entraient facilement dans la composition d'un paquet, tandis que la tête formée généralement, comme nous le verrons plus loin, d'un fer de qualité, était laminée en vue de la fabrication des petits ronds ou du fil de fer.

On peut faire rentrer dans le même ordre de fabrication le procédé qui consiste à transformer directement un objet hors d'usage en un autre profil de forme

plus simple. C'est ainsi que de vieux essieux de chemin de fer dont la section est ronde, mais le diamètre variable, peuvent après une simple chaude être laminés en barres rondes ordinaires susceptibles de nombreux emplois.

L'abaissement des prix de vente a bientôt conduit à une nouvelle simplification qui consiste à introduire, dans les paquets, les rails et autres profilés avec leur profil intact. Cette manière de faire ne peut évidemment s'appliquer que pour des produits qui ne sont soumis à aucune épreuve de qualité. Nous l'avons vu employer d'une manière très courante pour la production des éclisses de chemin de fer, ainsi que des fers  et  destinés aux constructions ordinaires, et qui se vendent sans conditions spéciales de résistance.

Fours à réchauffer. — Quelle que soit la forme et la composition des paquets, ils doivent toujours être portés au blanc soudant avant d'être soumis sous le marteau ou le laminoir à un corroyage qui assure la soudure des diverses mises. Les fours à réverbère dans lesquels cette chaude est donnée portent le nom de *fours à réchauffer*. Leur forme et leurs dimensions varient dans des limites considérables, suivant la forme des paquets et le nombre de paquets que l'on veut réchauffer dans un même four. Il est du reste à remarquer que les fours servant au réchauffage des paquets de fer soudé peuvent être employés également au réchauffage des lingots d'acier ou de fer fondu. Lorsqu'il s'agit d'acier véritable c'est-à-dire de métal prenant la trempe et ne pouvant guère supporter une chaleur dépassant le rouge-cerise, on pousse moins le four, et on n'utilise toute son action que pour les métaux doux qu'ils soient homogènes ou paquetés. Nous retrouvons encore ici cette transition insensible entre l'acier et le fer, qui est la caractéristique de l'industrie du fer actuel.

Les figures 27 et 28 représentent en coupe longitudinale et verticale un four à réchauffer à grille inclinée, qui peut être utilisé pour le réchauffage d'un grand nombre de paquets.

La construction des fours à réchauffer a été, dans ces dernières années, principalement en Amérique, l'objet de nombreux travaux. Au lieu de la grille ordinaire, telle que l'indiquent les figures 27 et 28, on trouve fréquemment employé le générateur Bicheroux. On rencontre à Bethléem, dans la région de l'anthracite, un four soufflé de l'invention de W. Stubbleine. Le vent est introduit dans une chambre en maçonnerie placée sur la voûte du foyer; de là il se rend en partie sous la grille, où il brûle l'anthracite menu, et en partie dans les gaz venant de la grille, dont il achève la combustion; à cet effet, des ouvreaux sont ménagés dans la voûte du four, au-dessus de la grille et à l'entrée du laboratoire. Le même système, appliqué aux fours à puddler, a donné des résultats satisfaisants.

Depuis une dizaine d'années on emploie en Amérique, pour le chauffage des fours à réverbère des usines à fer situées aux environs de Pittsburg, le gaz naturel que produit en abondance cette singulière région. Le gaz est amené par des canalisations qui ont jusqu'à trente kilomètres de longueur; il présente l'avantage d'avoir un pouvoir calorifique plus élevé qu'aucun autre combustible industriel; il est, en outre, exempt d'éléments nuisibles à la qualité du fer. Appliqué également au chauffage des chaudières, il produit de la vapeur plus régulièrement que

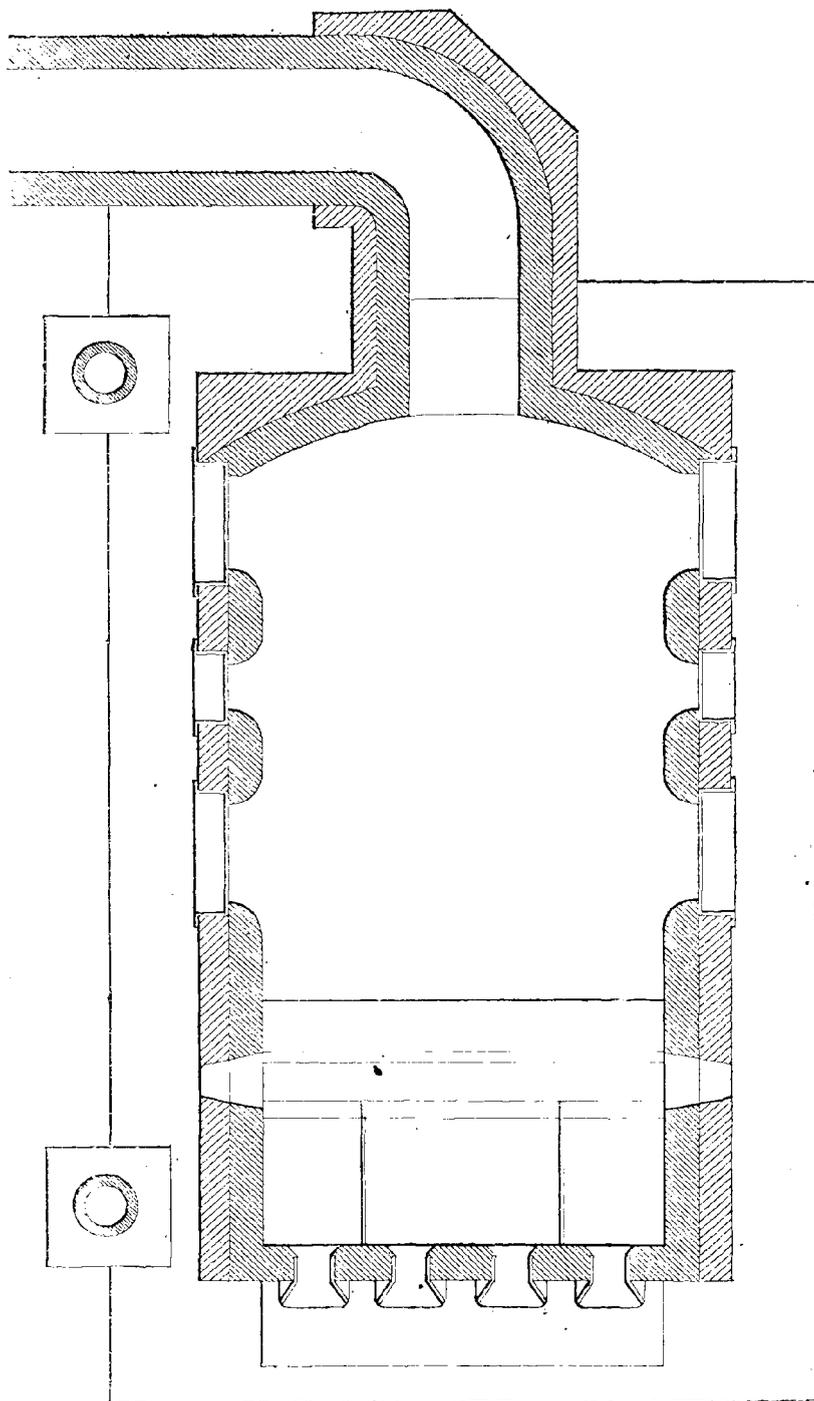


Fig. 27. -- Four à réchauffer à grille inclinée (Coupe horizontale).

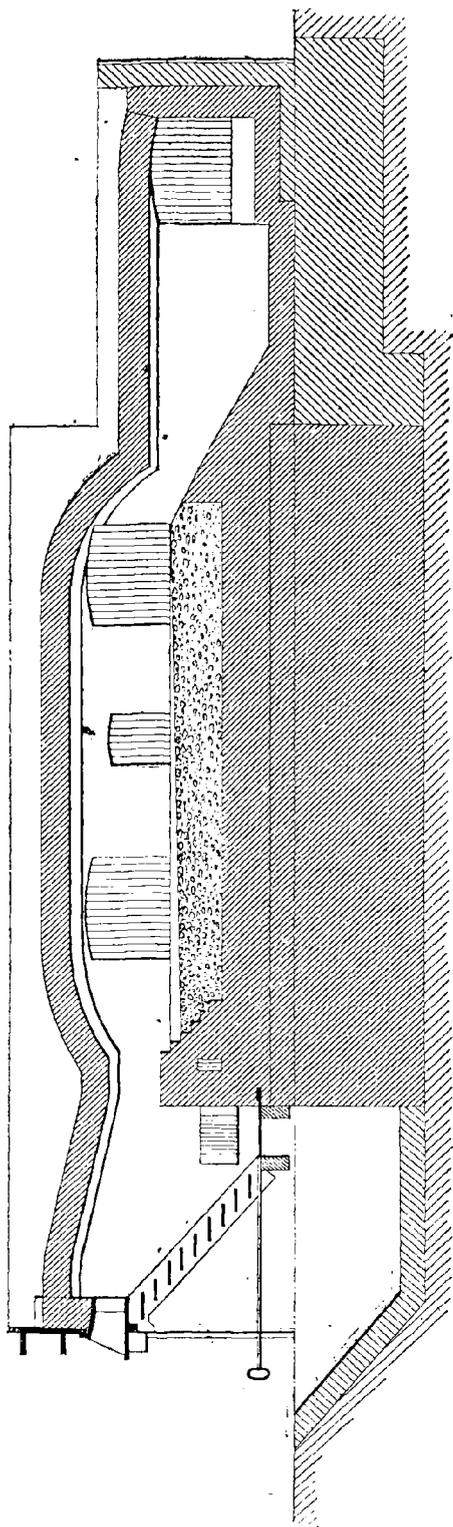


Fig. 28. — Four à réchauffer à grille inclinée (Coupe longitudinale).

la houille, parce qu'il n'y a pas de porte de foyer à ouvrir ni de barreaux de grille laissant pénétrer des quantités variables d'air froid par leurs interstices.

On peut, d'après un grand nombre d'analyses, attribuer au gaz naturel la composition moyenne suivante :

Acide carbonique.	0.6
Oxyde de carbone	0.6
Oxygène	0.8
Éthylène (C^2H^4)	1.0
Éthyle hydrique (C^2H^6).	3.0
Gaz des marais.	67.0
Hydrogène	22.0
Azote	3.0
Total	100.0

On consomme, en moyenne, 400 mètres cubes de gaz par tonne de fer puddlé et 80 mètres cubes par tonne de fer réchauffé. Par tonne de fer sortant du four à puddler, la dépense en gaz est évaluée par la moyenne des usines, à 0,75 dollars, au lieu de 1,30 dollars, chiffre qui représentait précédemment la dépense en charbon. Les contrats conclus avec les compagnies du gaz naturel sont basés sur une redevance de 1 dollar par tonne de produits laminés. Ces produits se montaient déjà, à la fin de l'année 1885, à plus de 400,000 tonnes.

On a, dans quelques parties des États-Unis très éloignées de la houille, tenté d'employer également le pétrole pour le chauffage des fours de puddlage et de réchauffage. L'emploi de ce combustible n'a pas présenté de difficultés techni-

ques, mais son prix s'est trouvé trop élevé. On pourrait peut-être l'utiliser dans quelques régions du sud de la Russie, où le pétrole abonde, tandis que le charbon y est rare.

Les appareils qui servent au réchauffage des paquets étant suffisamment connus, nous passons au laminage de ces paquets. Nous ne nous arrêterons que pour mémoire aux produits qui, fabriqués autrefois en fer paqueté, sont aujourd'hui presque exclusivement obtenus au moyen du fer fondu dont les nuances douces et extra douces tendent de plus en plus à se substituer au fer puddlé. Pour l'élaboration en forge de ces fers fondus, on voudra bien se reporter au volume de cette Encyclopédie consacré aux aciers.

1° Rails. — Les rails de chemins de fer ne se fabriquent plus aujourd'hui qu'en partant de lingots en métal homogène. Pour les gros profils, ceux qui dépassent par exemple douze et quinze kilogrammes, cette transformation est depuis près de dix ans un fait accompli. Pour les petits rails de mines et de terrassements, on employait encore le fer paqueté, il y a quelques années, mais le bon marché du métal fondu a achevé la substitution aussi pour les profils réduits.

A l'époque de la fabrication du rail en fer soudé, la composition du paquet présentait une importance considérable. La figure 29 indique les dimensions et la composition d'un paquet pour un rail de trente-cinq kilogrammes au mètre courant, tel qu'il était employé dans une forge de Westphalie réputée pour sa bonne fabrication. Les mises dont la section est couverte de hachures sont en fer corroyé et la figure 30 indique à son tour la composition du paquet formé de millbars

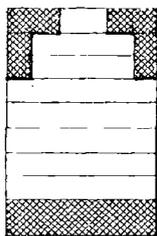


Fig. 29.

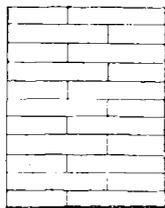


Fig. 30.

Paquets pour la fabrication des rails en fer.

ayant servi à préparer la couverte épaisse de 52^{mm}, et large de 200^{mm}, qui se trouve à la partie inférieure du paquet. Comme on le voit ce paquet se compose de vingt-deux mises ayant chacune deux centimètres d'épaisseur et des largeurs alternatives de 0^m,08 et 0^m,13, de manière que les joints se trouvent alternants.

Ces paquets pour rails sont placés dans le four à réchauffer la couverte de tête en bas, c'est-à-dire dans le sens où ils sont représentés sur la figure. On plaçait en général cinq à six paquets dans un four ; le réchauffage durait environ deux heures et demie, et après cette première chauffe le paquet était soudé par for-

geage sous un marteau pesant de trois à cinq tonnes, ou par passage à travers un certain nombre de cannelures du laminoir dégrossisseur. Après une seconde chaude qui durait de un quart d'heure à vingt minutes, le laminage s'achevait. La consommation de charbon pour les deux chaudes variait de 50 à 60 p. 100 du poids du métal chargé.

Le fluissage du rail en fer soudé étant fait de la même manière que celui des rails en fer fondu, nous ne nous y arrêtons pas. La seule différence consiste en ce que les trous de boulons des premiers étaient ordinairement poinçonnés, tandis que dans les seconds on perce ces trous à la mèche pour ménager la structure cristalline qui caractérise les métaux fondus.

Les rails en fer soudé avaient, nous l'avons vu, une durée très restreinte par rapport aux rails en métal fondu homogène. Malgré tout le soin apporté à la bonne fabrication de la couverte de tête, celle-ci s'exfoliait par suite de l'insuffisance de l'adhérence des mises entre elles; quelquefois la couverte tout entière se détachait du reste du paquet. La Société autrichienne des chemins de fer de l'État ayant eu l'occasion de consommer des rails en fer de divers pays, avait soigneusement relevé la durée des diverses provenances et constaté des différences bien sensibles. C'est ainsi qu'au bout de dix ans les rails provenant des usines styriennes de Zellweg, de Neuberg, de Prævali, avaient donné à peine 5 à 6 p. 100 de relevages, tandis que les usines belges et les usines de Westphalie installées pour la production en grande masse du rail en fer avaient donné dans la même période 30 et même 40 p. 100 de rails impropres à un plus long service. Comme nous l'avons dit, les rails en fer soudé ne se fabriquent pour ainsi dire plus aujourd'hui. Il est donc difficile de leur assigner un prix de vente; il sort par contre chaque année des voies de chemins de fer des quantités assez considérables de vieux rails et leur prix actuel varie de 70 à 80 francs.

Petit matériel d'attache. — On désigne sous ce nom les pièces de formes assez variées et d'un poids en général assez léger qui servent à fixer les rails entre eux et à les fixer à la traverse; un joint complet entre deux rails comporte deux *éclisses* placés de chaque côté du joint et réunies par quatre boulons. De plus on interpose souvent entre le rail et la traverse des *plaques d'appui* portant aussi le nom de *selles*; enfin le rail est fixé à chaque traverse par des *crampons* ou des *tire-fonds*.

Les éclisses et les selles qui représentent la part la plus importante du tonnage fabriqué se font encore le plus souvent en fer de ferraille. On emploie des paquets de dimensions moyennes qui donnent des barres longues de plusieurs mètres; ces barres sont ensuite découpées à la cisaille, puis les éclisses obtenues sont percées et ajustées. Bien que les grandes compagnies de chemins de fer exigent pour la réception des éclisses des épreuves consistant à les plier ou à les soumettre à des chocs, alors que leurs extrémités reposent sur deux appuis; on n'emploie pour la fabrication des éclisses et des plaques d'appui qu'un fer assez ordinaire, mais au prix de la matière brute laminée vient ajouter une dépense de finissage assez importante.

La qualité du fer employé pour les boulons et crampons doit être supérieure à

la précédente. Lorsqu'on fait usage de fer soudé, on prend ordinairement du fer corroyé de bonne marque; dans ces derniers temps le fer fondu, et surtout le déphosphoré extra doux, tendent de plus en plus à se substituer au fer soudé dans ces articles. Le prix de vente des boulons d'éclisses varie actuellement de 220 à 250 francs la tonne; celui des crampons et des tire-fonds oscille entre 250 et 300 francs.

La figure 31 indique la forme la plus ordinaire des crampons et des chevilletes.

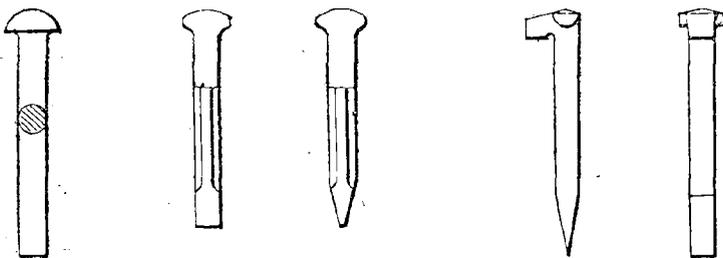


Fig. 31. — Crampons et chevilletes.

Nous entrerons dans quelques détails sur leur fabrication, parce qu'elle fournit un exemple du laminage à profil variable qui est usité dans certains cas. En effet, grâce à des entailles pratiquées à la fois dans les deux cylindres de laminoirs, on prend comme point de départ une barre présentant des renflements comme l'indique la figure 32; la distance de ces renflements correspond à

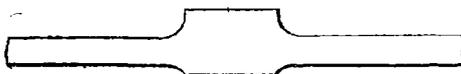


Fig. 32. — Barre à profil variable pour la fabrication des crampons.

la longueur de deux crampons. La barre est alors découpée par le milieu de chaque renflement, qui sert ainsi à fournir la matière nécessaire à la tête du crampon. Celle-ci reçoit sa forme définitive dans une presse, et la pointe peut être faite également à la presse ou au marteau.

Bandages. — Tandis que les bandages en métal fondu sont uniquement employés dans la plupart des Etats de l'Europe, les bandages en fer puddlé sont encore préférés en France par quelques compagnies, particulièrement pour les voitures à voyageurs. On emploie pour leur fabrication une barre de section méplate qu'on porte au rouge et qu'on enroule alors en spirale sur un mandrin de manière à former une sorte de cylindre creux d'une hauteur suffisante pour assurer le profil du bandage et son poids. Ce paquet dont les mises sont ainsi for-

mées par une barre de fer continue porte le nom d'*enroulage* (fig. 33) ; il est porté dans un four à réchauffer, et lorsqu'il a atteint la température du blanc soudant il est conduit sous le marteau pilon, où il reçoit une forme analogue à celle des

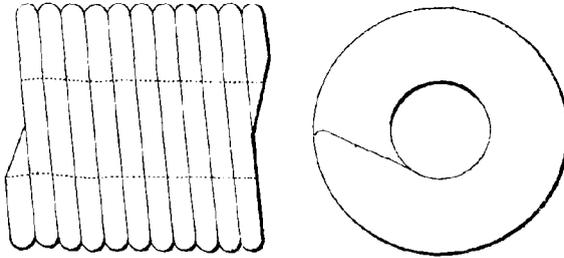


Fig. 33. — Enroulage pour la fabrication des bandages en fer.

bagues employées à la fabrication des bandages en acier sans soudure (*Encyclopédie, aciers, fig. 32*). La fabrication s'achève alors de la même manière.

Comme nous le disions en commençant, le bandage obtenu de cette manière est une exception, et le bandage en acier ou en fer fondu sera bientôt universellement employé.

Essieux.— Les essieux en fer paqueté sont encore aujourd'hui l'objet d'un emploi plus répandu que les bandages en fer obtenus par le procédé décrit ci-dessus. On craint dans les essieux en fer fondu les cassures subites qui semblent être le résultat de cristallisations anormales ; les ingénieurs ont coutume de dire que le fer provenant de mises *prévient avant de se rompre*, tandis que l'acier, et par ce mot ils entendent le fer fondu, ne prévient pas. Il peut se faire qu'un essieu provenant d'un paquet formé de mises longitudinales puisse acquérir par un forgeage énergique une texture fibreuse augmentant la résistance à la flexion, mais la présence de ces mises dans la fusée, c'est-à-dire dans la partie tournant dans la boîte à graisse, présente de graves inconvénients ; pour peu que la soudure ne soit pas absolument parfaite, les mises s'écartent les unes des autres par suite du mouvement rapide de rotation de l'essieu, et il se produit un grippement, qui oblige à mettre très promptement l'essieu hors de service. L'essieu en fer fondu possède au contraire l'avantage de présenter une surface de roulement absolument homogène, et comme en même temps il résiste parfaitement aux épreuves réglementaires exigées autrefois pour les essieux en fer, il n'y a aucune raison de proscrire son emploi.

Les essieux en fer soudé s'obtiennent en partant de gros paquets à section rectangulaire formés de mises bien régulières. Ils sont forgés ronds sous des marteaux pilons de poids appropriés aux dimensions de l'essieu ; les deux extrémités de l'essieu comprenant la portée de calage et la fusée sont forgées en matrice ; le corps de l'essieu reste brut de forge, tandis que les extrémités sont dégrossies au tour.

Le prix des essieux en fer soudé est relativement élevé à cause de la qualité ex-

ceptionnelle du fer brut entrant dans cette fabrication. Autrefois on employait de préférence des fers puddlés provenant de fontes au bois ; aujourd'hui, eu égard à la rareté de cette matière, on prend également des fers au coke, mais présentant des garanties spéciales de bonne fabrication. Dans ces conditions le prix de la tonne d'essieux de wagon oscille aux environs de 400 francs, et ce chiffre est dépassé pour les essieux de locomotives, qui du reste se font presque toujours en acier fondu au creuset.

Roues. — Le fer soudé intervient encore dans la construction du matériel de chemins de fer pour la fabrication des roues de wagons et de locomotives. On distingue à cet égard les roues à rayons et les roues pleines en fer forgé. Les roues à rayons se divisent elles-mêmes en roues à moyeu en fonte et à moyeu

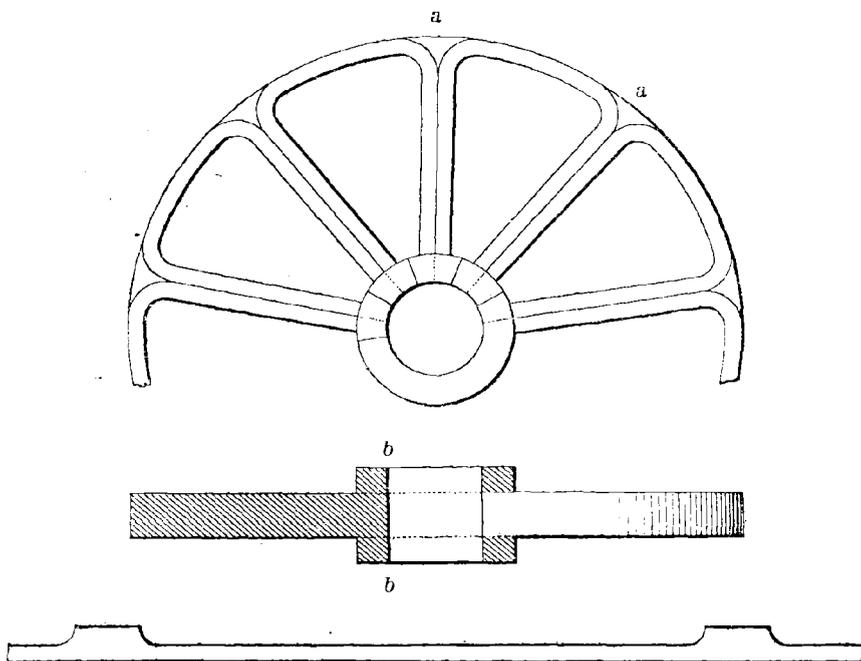


Fig. 34. — Fabrication des roues à rayons en fer forgé.

en fer. Si les premières sont d'une fabrication plus facile et moins coûteuses, elles n'ont point la solidité des secondes, dont la fabrication mérite de nous arrêter quelques instants.

On prend comme point de départ de la fabrication des roues à moyeu en fer forgé une barre méplate à profil variable, analogue à celle que nous avons vu employer pour la fabrication des crampons. Cette barre est découpée à longueur et cintrée de manière à ce que ses deux renflements viennent se rejoindre et former ainsi un fragment du moyeu ; les triangles ainsi obtenus et juxtaposés comme l'indique la figure 34 constituent la roue entière ; on soude alors des coins

dans les rentrants *a*, on complète le moyeu en plaçant en dessous des extrémités rapprochées des rayons des rondelles *bb*, et on soude le tout ensemble en portant la roue sur des foyers circulaires construits spécialement pour cet usage.

La fabrication des roues pleines en fer forgé exige un outillage encore plus compliqué : nous la décrirons telle que nous l'avons vu pratiquer à l'usine de Harde près de Bochum, en Westphalie. On prend comme point de départ des paquets rectangulaires composés comme l'indique la figure 35. Après une pre-

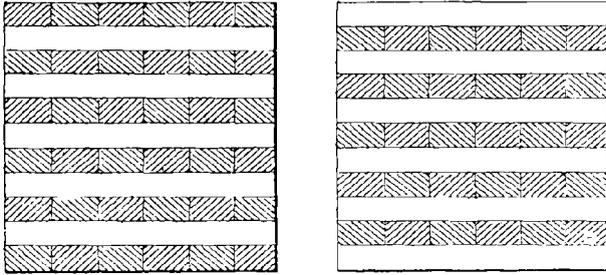


Fig. 35. — Paquets pour la fabrication des roues pleines en fer forgé.

mière chaude au blanc soudant, ces paquets sont portés sous un marteau de trois tonnes et façonnés en un disque, qui présente un diamètre de 0^m,39 avec une épaisseur de 0^m,27.

Ce disque est alors porté après un réchauffage sous un marteau de cinq tonnes dont la panne et l'enclume présentent deux cavités symétriques destinées à faire venir le moyeu de la roue. On obtient ainsi une pièce ayant la forme et les dimensions représentées dans la figure 36.

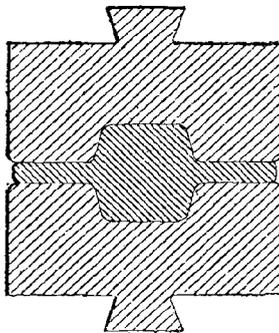


Fig. 36. — Forgeage d'une roue pleine.

Après une nouvelle chaude, la pièce précédente est portée à un laminoir de forme spéciale et qui se rapproche des laminoirs à tôle en ce sens qu'après chaque passage on rapproche les deux cylindres l'un de l'autre, de manière à faire ainsi de quinze à vingt passages pendant lesquels les flasques de la roue gagnent en

diamètre tout en perdant de leur épaisseur ; la figure 37 indique cette disposition.

Quand le laminage est achevé, on profite de la même chaude pour percer le moyen. A cet effet, on porte la roue sous un petit marteau et on place au-dessus d'elle un couvercle C l'emboîtant exactement, et percé en son milieu

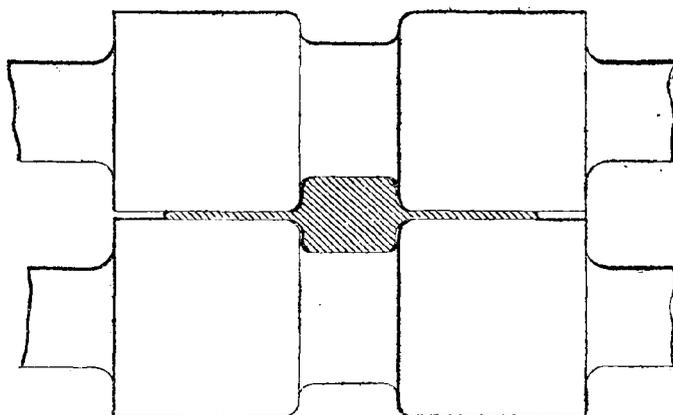


Fig. 37. — Laminage d'une roue pleine.

d'une ouverture destinée à laisser passer un mandrin M, qui est guidé ainsi d'une manière très sûre. Le couvercle porte en outre deux entailles qui permettent de l'enlever facilement quand le trou a été pratiqué. La figure 38 indique cette disposition.

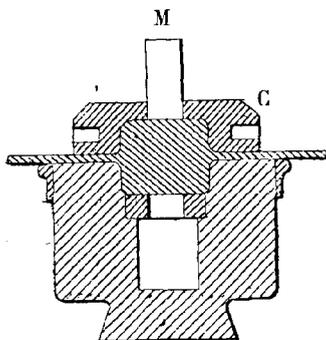


Fig. 38. — Perçage du moyen.

La pièce dont nous venons de voir les élaborations successives ne constitue pas la roue entière. Il faut pour obtenir son profil exact y ajouter les deux pièces A et B que la figure 39 montre réunies à la flasque de la roue. Elles

s'obtiennent en partant de barres laminées découpées à longueur et cintrées de manière à venir s'appliquer sur le pourtour de la roue. Celle-ci est alors portée dans des fours à double grille et à vent forcé, qui sont distants de huit

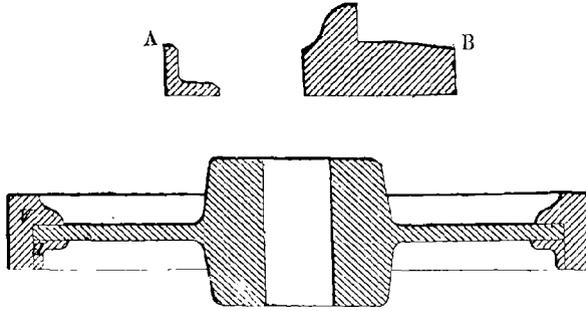


Fig. 39. — Fabrication des roues pleines en fer forgé.

mètres environ du marteau où l'opération se continue. Le transport de l'un à l'autre est fait au moyen de la fourchette représentée figure 40, et qui est supportée par des chaînes roulant sur un chemin de fer aérien, de sorte que cette

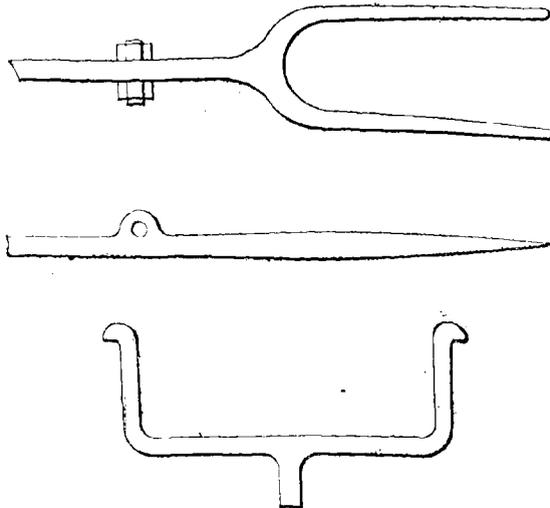


Fig. 40. — Outils pour le transport des roues pleines en fer forgé.

manœuvre se fait avec une dextérité et une célérité remarquables. Le chauffage doit être fait avec de grandes précautions, car on se propose d'atteindre une température très élevée, tout en maintenant une température égale sur toute la périphérie. Pour obtenir ce résultat, on retourne fréquemment la roue dans le

four jusqu'au moment où elle est portée sous le marteau représenté figure 41 qui lui donne sa dernière façon.

Le marteau est, comme l'indique la figure, un marteau à matrice et son poids est de huit tonnes environ. La panne a la forme circulaire ainsi que l'enclume. On frappe ordinairement de cinq à six coups, puis on jette de l'eau sur la roue et

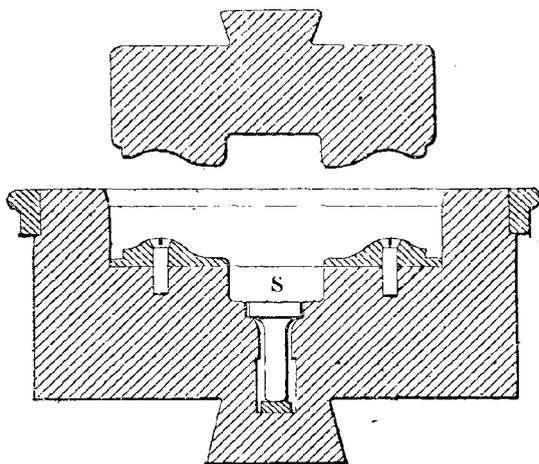


Fig. 41. — Dernier forgeage des roues pleines en fer forgé.

on frappe un coup violent de manière à obtenir un décapage. Quant le travail est achevé, on soulève la roue et on l'enlève au moyen du coin S, qui est soulevé de bas en haut par un levier, et sort de la matrice avec la forme représentée par la figure 42.

Nous sommes entrés dans les détails de cette fabrication parce qu'elle montre

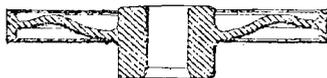


Fig. 42. — Roue pleine finie.

bien à quelles séries nombreuses de maintenitions on est souvent obligé d'avoir recours pour passer du paquet à la pièce finie. Dans les usines de Bochum et de Hørde, on obtenait à la même époque des roues de même profil en coulant simplement de l'acier fondu dans un moule en terre réfractaire, et la substitution du moulage en acier à la pièce forgée se rencontre dans bien d'autres cas.

Fers marchands. — On désigne sous le nom de fers marchands, les fers de profil ordinairement simple (plat, rond ou carré) qui sont susceptibles des emplois les plus variés. Ces fers sont ordinairement soumis à un classement allant

des n^{os} 1 à 7 servant à établir leur qualité et ces numéros tendent de plus en plus à remplacer les désignations *de fer fin grain, métis, fer fort, etc.*, qui sont encore quelquefois employées. L'indication donnée par le numéro de classement est souvent complétée par des épreuves à la traction avec allongement correspondant bien que pour les fers dits marchands, qui ont le plus souvent comme point de départ le fer puddlé ou le fer de ferraille, on se montre en général moins porté aux constatations de résistances physiques et mécaniques que pour les métaux fondus.

La fabrication des fers marchands ne présente rien de particulier à signaler ; suivant la qualité qu'on veut obtenir, on emploie comme point de départ des fers bruts ou des fers corroyés. Pour les petits échantillons, comme les petits ronds et les petits carrés, une simple barre suffit ; pour les grosses dimensions, on part de paquets dans lesquels les deux matières premières indiquées ci-dessus et la ferraille s'unissent dans diverses proportions.

Les forges qui s'adonnent à la fabrication du fer marchand possèdent ordinairement trois trains de laminoirs désignés sous le nom de *gros mill, moyen mill et petit mill*, et qui diffèrent par la force de la machine motrice et la dimension des cylindres. Jusque dans ces dernières années, les trains de fers marchands étaient actionnés par des machines dépassant rarement la force de deux cents chevaux ; le nombre de tours variait de quatre-vingt à cent tours pour le gros et moyen mill et s'élevait à deux cents pour le petit mill.

On a depuis lors construit des petits mill à grande puissance, servant en même temps à la fabrication du produit spécial désigné sous le nom de « machine » et dont nous parlerons plus loin. Les cylindres de ces trains sont mis en mouvement par des machines déployant jusqu'à 1,000 chevaux et tournant avec une vitesse d'au moins 400 tours. Ici comme partout on a sans cesse augmenté la puissance des engins de production.

Les machines motrices des trains marchands sont le plus souvent horizontales. Elles marchent dans les installations nouvelles avec grande détente et condensation. Le système Compound qui assure la détente de la manière la plus complète commence à y être employé. Les machines sont presque toujours à action directe, de manière à éviter les accidents et les arrêts résultant de rupture d'engrenages ; toutefois, lorsque la vitesse atteint plusieurs centaines de tours, il faut nécessairement recourir à des transmissions qui se font aujourd'hui le plus souvent par courroie ou par câble.

Les fers marchands, même de forte section, représentant rarement un poids considérable, on n'emploie qu'exceptionnellement pour leur laminage les machines réversibles dont nous verrons plus loin les nombreuses applications.

Les fers marchands se vendent en vertu de tarifs établis par chaque forge d'après des règles à peu près uniformes. On fixe pour les dimensions moyennes un prix dit prix de base soumis à des majorations pour les dimensions qui s'en écartent dans les deux sens. Le prix actuel de ces fers à Paris dans un moment de crise fort aiguë est d'environ 130 francs la tonne, et les majorations, qui sont de 10 francs par classe, s'appliquent à trois classes successives ; les échantillons les plus gros et les plus faibles peuvent donc atteindre le prix de 160 et même 170 francs. Ces indications s'appliquent bien entendu à la qualité

la plus ordinaire, au fer dit : fer au coke n° 2; les fers de qualité n° 5 et 6 supportent une plus-value spéciale que les tarifs des forges font connaître également.

Le tableau ci-dessous donne un exemple de classification de fers marchands avec indication des majorations qu'elle comporte. Les dimensions sont indiquées en millimètres.

Fers marchands.

	1 ^{re} CLASSE	2 ^e CLASSE	3 ^e CLASSE	4 ^e CLASSE	HORS CLASSE
Fers plats . . .	27 à 39/11 et plus, 40 à 44 5/9	20 à 39/8 et plus, 40 à 81/6 à 81 116 à 163/12 à 40	20 à 39/5 1/2 à 7 1/2 40 à 81/4 1/2 à 5 1/2 116 à 165/7 à 14 1/2 82 à 115/6 1/2 à 8 1/2	20 à 39/3 1/2 à 5 40 à 81/3 1/2 à 4 116 à 165/5 1/2 à 6 1/2 82 à 115/4 1/2 à 6 14 à 19/4 1/2 et plus.	Tous les plats qui ne figurent ni dans les quatre classes précédentes, ni dans les feuillards, ni dans les larges plats.
Fers ronds	30 à 61	17 à 29 62 à 74	12 à 16 75 à 90	6 à 11 91 à 110	1 ^{re} Série : 4 1/2 à 5 1/2, 111 à 130 2 ^e Série : 451 à 200
Fers demi-ronds.	»	»	27 à 60	14 à 26	»
Fers carrés	20 à 54	16 à 19 55 à 69	41 à 45 70 à 81	5 à 10 82 à 110	4 1/2 411 à 120

N. B. — 1^o L'écart de prix par 100 kilogrammes entre deux classes consécutives est de 1 franc par classe.
2^o Majoration supplémentaire de Fr. 1 par 100 kilogrammes et par mètre ou fraction de mètre pour tous les fers de plus de 7 mètres de longueur.

3^o Majoration supplémentaire de Fr. 1 par 100 kilogrammes pour tous les fers demandés à longueur fixe.

4^o Majoration supplémentaire de Fr. 1 par 100 kilogrammes sur les ronds et carrés de 100 millimètres carrés et plus, pour chaque augmentation de 0^m.50 ou fraction de 0^m.50 sur les longueurs suivantes :

5 mètres pour les fers de 100 à 135 millimètres	—
4 — — — — — 436 à 450	—
3 — — — — — 451 à 200	—

Fers spéciaux. — Ces dénominations s'appliquent à tous les fers laminés sortant des sections géométriques simples qui caractérisent les fers marchands

Les fers spéciaux sont principalement employés dans les constructions terrestres et maritimes, dont l'importance va chaque jour en grandissant.

Les fers profilés rentrent dans quatre types principaux, qui sont le fer à simple **T**, le fer à double **I**, le fer en **U** et la cornière **L**. Le second de ces types désigné également sous le nom de *poutrelle*, *fer à plancher*, représente à lui seul un tonnage bien supérieur à celui des trois autres profils réunis, et sa fabrication mérite de nous arrêter quelques instants.

Le fer à **I** employé dans la construction des bâtiments se fait encore aujourd'hui presque toujours en fer paqueté. Les vieux rails en fer sont le principal élément constitutif des paquets; on les emploie soit avec leur profil entier et simplement cassés à la longueur du paquet, soit après avoir séparé la tête, l'âme et le patin (ce qui s'obtient facilement en laissant simplement tomber sur le rail, convenablement placé, la panne d'un marteau-pilon), soit après les avoir aplatis à chaud, de manière à leur donner à peu près la forme de millbarres. Quant au paquet, on peut soit lui donner simplement une forme quadrangulaire, soit le disposer de façon à présenter déjà grossièrement la section du profil à obtenir comme l'indique la figure 43. Lorsqu'on a en vue une fabrication particulière-

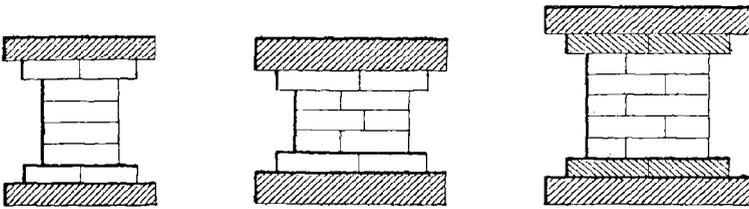


Fig. 43. — Paquets pour la fabrication des fers à **I**

ment soignée, on forme les deux mises extrêmes du paquet de couvertes en fer corroyé; mais, pour les fers à plancher ordinaire, cette précaution est superflue.

Le laminage des fers **I** ne présente de difficultés que dans le cas où la largeur des ailes, c'est-à-dire des deux parties horizontales est très grande, par rapport à la hauteur de la poutrelle. Dans ce cas, il arrive facilement que des criques se produisent sur les bords des ailes et il en résulte des rebuts assez nombreux pour rendre onéreuse la fabrication.

Le fer fondu, et en particulier celui obtenu par le procédé Thomas, s'approprie à merveille à la fabrication des fers à **I** et les usines allemandes ont à peu près complètement abandonné pour cet article l'emploi des paquets. Les établissements français suivront sans doute cet exemple dans un avenir assez prochain, surtout lorsque les vieux rails en fer seront devenus rares sur le marché.

Les nombreux usages auxquels les poutrelles sont employées ont conduit les forges qui s'occupent de leur fabrication à en offrir un assortiment très varié. Nous trouvons, dans l'album d'une grande forge du nord de la France, vingt-quatre types de profils à ailes ordinaires et quarante types de profils à larges ailes. L'échantillon le plus petit correspond à une largeur d'aile de 41 millimètres avec une hauteur de 8 centimètres, donnant un poids de 6⁴,50 par mètre

courant. L'échantillon le plus fort offre une hauteur de 51^s,5 avec une largeur d'aile de 21 centimètres, donnant le poids énorme de deux cent cinquante kilogrammes au mètre carré. De semblables barres pouvant être livrés à des longueurs dépassant souvent 10 mètres, on comprend quelle puissance les laminoirs doivent posséder pour assurer leur passage entre les diverses cannelures. En pareil cas, les laminoirs réversibles deviennent à peu près indispensables, et les établissements qui se sont adonnés à la fabrication des gros profilés en possèdent presque tous aujourd'hui.

Afin de faciliter le choix des poutrelles à adopter dans les constructions, la plupart des forges ont joint à leurs albums des tableaux indiquant les charges permanentes en kilogrammes, uniformément réparties, que peuvent supporter les fers à **I** de leur fabrication, reposant sur des appuis distants de 2 à 10 mètres pour des résistances de 6, 8 et 10 kilogrammes par millimètre carré de section. Nous donnons ci-dessus un modèle de ces tableaux qui rendent de

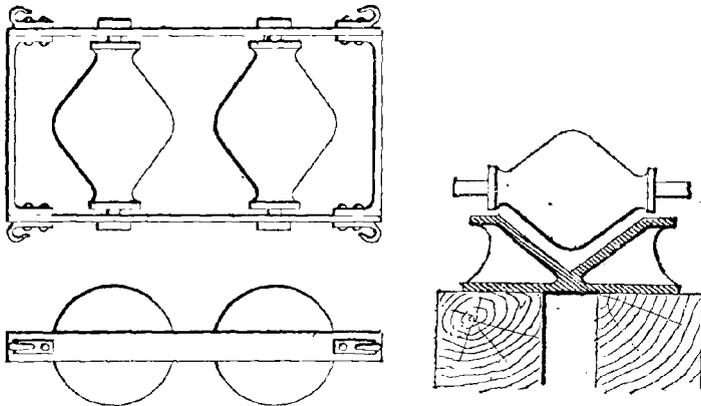


Fig. 44. — Appareil pour le dressage des cornières.

grands services dans la pratique. Il ne correspond qu'aux sept premiers profils de l'usine dont nous avons parlé, et ces indications se continuent pour toute la série des **I** à ailes ordinaires et à ailes égales qui y sont fabriqués.

Les fers en **L** se fabriquent dans les mêmes conditions que les fers à **I**. Nous trouvons dans l'album d'une seule usine jusqu'à quarante types de ces profils, dont les plus petits n'ont que 3 centimètres de hauteur et 13 millimètres de largeur d'aile, avec un poids de 1^s,50 le mètre, tandis que les dimensions correspondantes les plus élevées sont de 25 centimètres et 85 millimètres avec un poids au mètre de quarante-deux kilogrammes.

Les cornières également employées dans la construction de tous les ouvrages métalliques ne présentent pas de moindres variations de poids et de dimensions. L'album de la Société des forges de la Providence, à Hautmont, dans le département du Nord, comprend trente-six types de cornières à branches égales, dont le poids varie 0^s,540 à 32 kilogrammes le mètre courant. A cette collection vient s'ajouter une collection de trente-quatre cornières à branches inégales ; la

plus petite a une aile de 48 millimètres et l'autre de 35 millimètres, et pèse 2^k,30, la plus forte a 90/150 millimètres et pèse 21^k,50; on comprend quel assortiment de cylindres de laminoirs il faut avoir pour faire face à des demandes si variées.

La plupart des profilés doivent après leur laminage être soumis à un finissage qui, pour les fers à **I** et en **L** se fait d'une manière analogue à celle employée pour les rails. Pour les cornières, il faut surtout veiller à ce que les ailes ne se gauchissent pas dans le refroidissement; on se sert à cet effet de l'appareil représenté sur la figure 44 ci-contre, et qui consiste d'une part, en un berceau dans lequel la cornière est placée, et de l'autre en un chariot porté sur deux galets qu'on fait courir sur toute sa longueur.

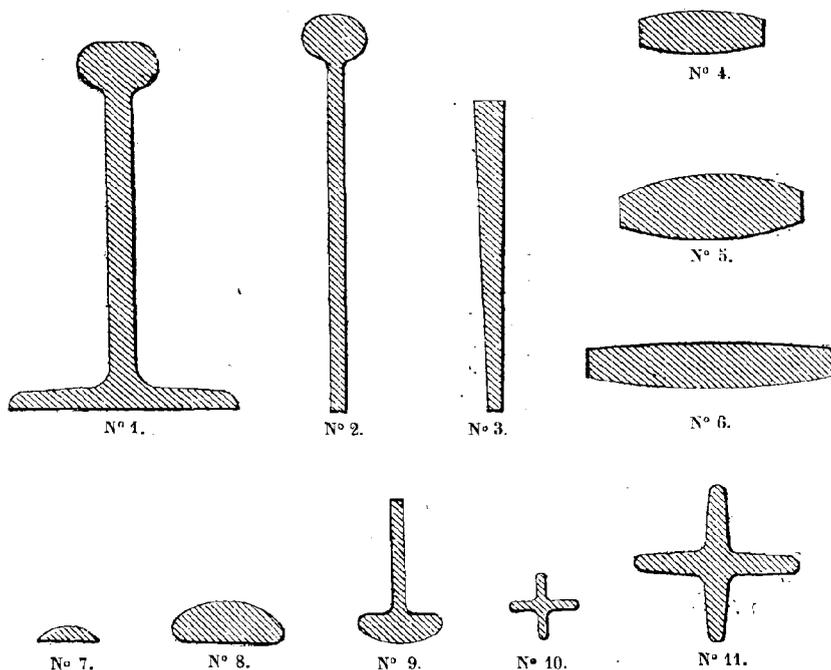


Fig. 45.

Le prix de vente de ces divers profilés varie dans de larges limites suivant leurs dimensions et aussi suivant les fluctuations du marché. Celui des fers à **I** à ailes ordinaires de 80/220 millimètres jusqu'à 8 mètres de longueur est en ce moment, à Paris, de 130 francs la tonne. Il s'était maintenu longtemps à 145 francs, avait fléchi sous le coup d'une crise aiguë à 120 et même 115 francs, et montre en ce moment une tendance au relèvement; le prix de base des fers à **I** à larges ailes est de 150 francs. Les cornières sont rangées suivant leurs dimensions en six catégories, dont les prix actuels sont de 145, 160, 180, 190, 200 et 220 francs. On fait pour tous ces articles une différence entre le fer soudé et le fer fondu, qui, donnant une résistance à la traction supérieure d'au

moins dix kilogrammes au fersoudé, permet d'employer des profils plus légers et justifie de ce seul fait une majoration importante.

Nous ne saurions entrer ici dans l'examen détaillé des fers spéciaux que fournissent les usines à fer. Nous nous bornerons à en indiquer ci-dessous les principaux profils. On distingue les fers à barrots (1 et 2), très employés dans la construction des navires; les fers à biseau, à jantes et rayons de roues (3, 4, 5, 6), les mains courantes (7, 8, 9); les fers à croix (10, 11); les fers à châssis vitrages, moulures, etc. Pour arriver à tous ces profils on part, comme pour les fers marchands, de paquets présentant les dimensions appropriées, ou si l'emploi du fer fondu est préféré, de lingots à section carrée ou méplate. Le nombre de chaudes à donner, le nombre de cannelures par lesquelles la barre doit passer, dépend de l'irrégularité du profil et de la qualité de la matière première employée. Il importe de déterminer pour chaque nature de produit fini la consommation du combustible, la perte de poids résultant du chauffage et du laminage, la proportion des rebuts et rognures qui ne peuvent être comptés qu'à un prix réduit, la dépense directe de main-d'œuvre, c'est-à-dire le salaire des chauffeurs de four, des lamineurs et de leurs auxiliaires divers, enfin la quote-part des frais généraux de la forge à imputer à la fabrication. Ce sont là les éléments qui permettent d'établir le prix de revient qui sert à son tour à déterminer le prix de vente.

CHAPITRE XIV

FERS LAMINÉS (suite)

Tôles de construction. — Tôles minces et fer blanc. — Machine, fil et ses dérivés.

Tôles. — Les tôles sont comme on le sait les feuilles métalliques plus ou moins épaisses, employées dans les diverses industries. C'est ainsi qu'on rencontre la tôle de cuivre, la tôle de nickel, la tôle d'acier et enfin la tôle de fer. Il est entendu que nous comprenons sous cette dénomination non seulement la tôle en fer soudé, mais encore la tôle en fer fondu, qui tend de plus en plus à se substituer à la précédente.

On part pour fabriquer la tôle en fer soudé de paquets plus ou moins volumineux. La confection et la bonne élaboration de ces paquets présentent ici une importance toute spéciale. En effet, les dimensions longitudinales des feuilles de tôles étant très considérables par rapport à leur épaisseur, il n'est pas possible de forger le paquet sous toutes ses faces, ou de le retourner de 90 degrés dans les cannelures du laminoir, comme on le fait pour les barres rondes ou carrées. De plus, les défauts de soudure, qui tout en étant regrettables dans des pièces de forme massive, n'y constituent pas un danger immédiat, deviennent très nuisibles et souvent dangereux, dans les feuilles minces souvent exposées à des efforts énergiques et à des tensions inégales, comme dans les chaudières à vapeur. L'insuffisance de la soudure qui produit dans les tôles provenant de paquets le phénomène connu sous le nom de *dédoublement*, doit donc être évitée avec un soin tout particulier.

Pour arriver à une homogénéité bien complète de la tôle, toutes les combinaisons de paquetage ont été employées ; tantôt on s'est borné à former le paquet de corroyés à section carrée, tous semblables et placés dans chaque mise comme l'indique la figure 46, tantôt on termine le paquet par deux fortes couvertes et ces couvertes peuvent être faites d'une seule loupe lorsque le poids de la couverture ne dépasse par 300 kilogrammes ; on peut même dépasser ce poids lorsque la loupe provient d'un four à puddler double. Dans d'autres usines, on prend une couverture provenant elle-même d'un paquet corroyé, et on intercale

de semblables couvertes dans le paquet lui-même ; la figure 46 donne une idée de ces diverses dispositions.

Quelle que soit la composition du paquet, un martelage énergique est la première condition d'une bonne fabrication. Lorsque les paquets sont de forte dimensions, ce martelage doit être fait en deux et même trois chaudes ; un marteau-pilon du poids de cinq tonnes peut suffire et nous avons vu d'excellentes tôles provenant d'établissements ne possédant pas des appareils de corroyage plus énergiques ; mais si on a des marteaux plus puissants il ne faut pas craindre de les employer à ce travail, surtout pour les derniers coups, qui se produisent nécessairement sur une pièce présentant une plus grande surface et ayant déjà perdu une grande partie de la chaleur qu'elle possédait en sortant du four.

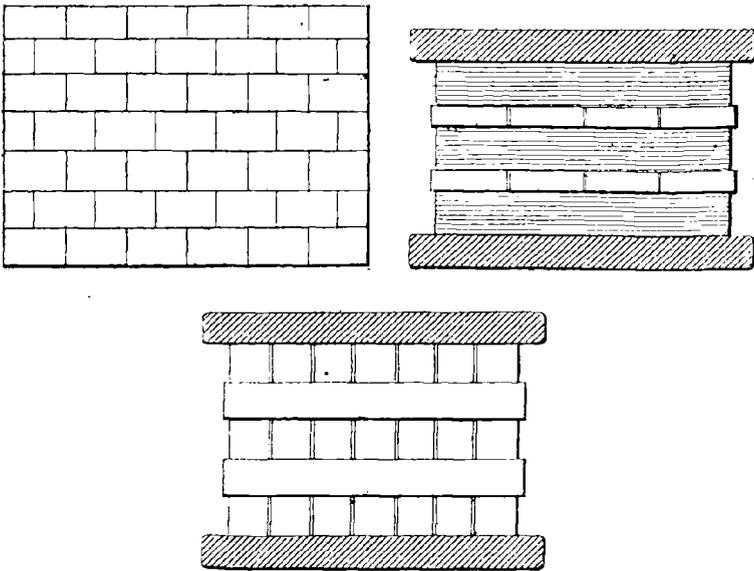


Fig. 46. — Paquets pour tôles en fer soudé.

Lorsque le paquet a été ramené par martelage à une épaisseur suffisamment réduite, on le porte au laminoir. Celui-ci se compose de deux cylindres unis en fonte très résistante ou mieux en acier fondu, qui peuvent être successivement rapprochés l'un de l'autre à chaque passage de la feuille de tôle. La largeur de table de ces cylindres atteint maintenant 2^m,50 et même 3 mètres, et ils sont mus par une machine réversible qui met également en mouvement des galets placés de chaque côté des cylindres et sur lesquels la tôle est reçue à sa sortie des cylindres pour être ensuite ramenée vers eux.

Les fours qui desservent les laminoirs à tôles ont reçu des dispositions motivées par la nature de la pièce à chauffer. Au lieu de plusieurs portes placées sur les longs côtés du four, celui-ci ne possède qu'une large porte placée à l'extrémité opposée à la chauffe. La feuille de tôle amenée sur un chariot à la hauteur

de la sole y est poussée avec des pinces et glissée sur des rails en fer jusqu'à ce qu'elle ait pris la position convenable. Les figures 47 et 48 indiquent cette disposition.

Au sortir du laminoir, les feuilles de tôle ne présentent pas exactement la longueur et la largeur pour lesquelles elles sont commandées. Il est

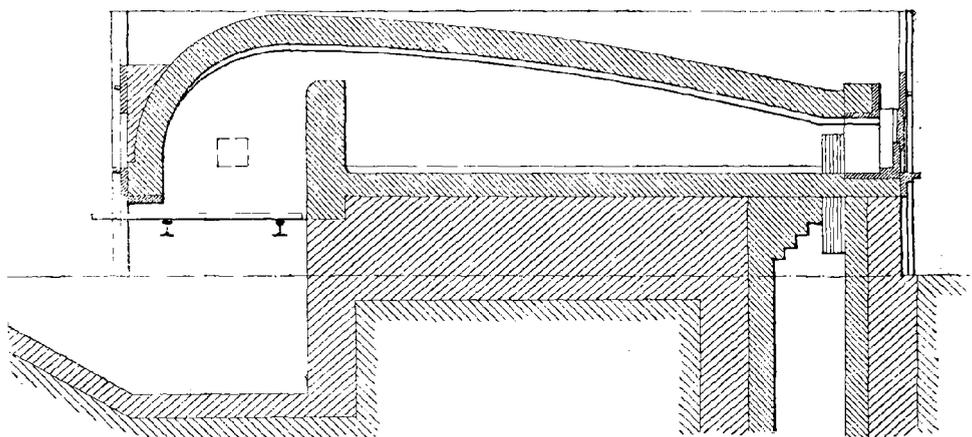


Fig. 47. — Four pour le réchauffage des paquets pour tôle (Coupe longitudinale).

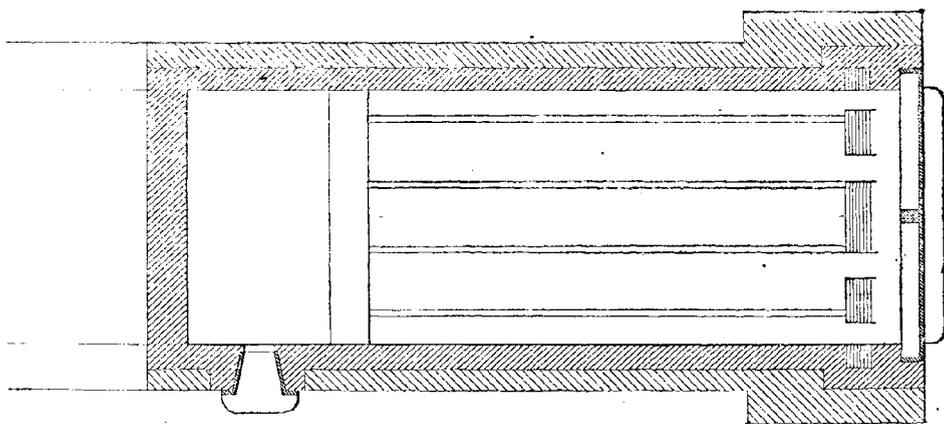


Fig. 48. — Four pour le réchauffage des paquets pour tôle (Coupe horizontale).

impossible de calculer d'une manière assez précise les dimensions du paquet, et de plus les bords sont généralement ondulés et pailleux ; on les enlève au moyen de cisailles très puissantes mues par la vapeur. Dans quelques-uns de ces appareils, la vapeur met non seulement en mouvement l'outil chargé d'opérer le découpage, mais assure encore le mouvement progressif du chariot sur lequel la feuille de tôle se trouve placée. Les rognures représentent un poids assez

considérable par rapport à celui des tôles finies; de plus dans le travail au four la perte de feu est forcément assez considérable. L'ensemble du déchet et des

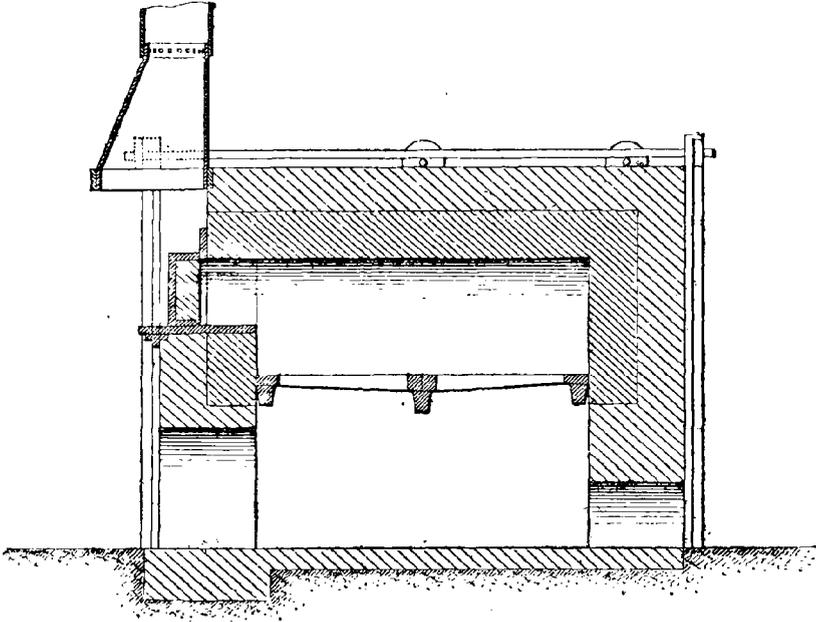


Fig. 49. — Four dormant pour le recuit des tôles (Coupe longitudinale).

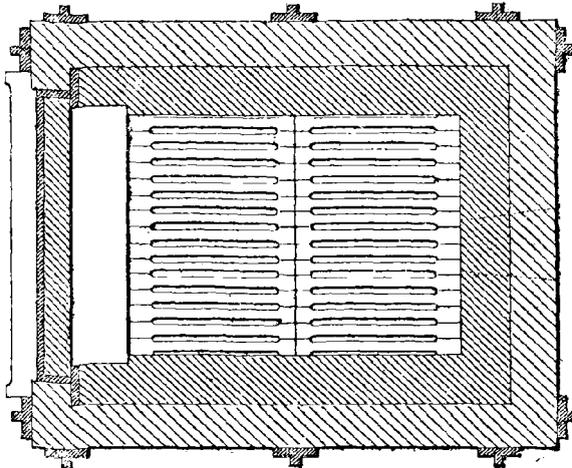


Fig. 50. — Four dormant pour le recuit des tôles (Coupe horizontale).

rebuts s'élève donc souvent jusqu'à 35 p. 100 du poids du paquet, et on comprend que le prix de revient des tôles doit forcément être assez élevé.

La fabrication des tôles en fer fondu ne diffère pas sensiblement de celle des

tôles en fer soudé ; les mêmes marteaux et les mêmes laminoirs peuvent être employés. Quand la matière première est le fer fondu, la perte au feu et le déchet sont moins considérables, et la dépense du charbon nécessaire pour porter le paquet au blanc soudant peut être également épargnée, bien que le fer fondu doive être travaillé à une plus haute température qu'on ne le croit généralement.

Les tôles de fer doivent, comme les tôles d'acier, être soumises après leur laminage à un *recuit* ; on désigne sous le nom de *fours dormants* les fours consacrés à cet usage, et les figures 49 et 50 en indiquent la disposition. Le recuit de la tôle exerce sur la facilité de son emploi une influence considérable, et si on peut le négliger pour les qualités ordinaires, il se recommande pour tous les produits supérieurs.

Les tôles se divisent suivant leur épaisseur en grosses tôles ou tôles de construction, dont l'épaisseur varie de 6 à 20 millimètres ; en tôles fines ou minces de un millimètre et demi et au-dessous ; les tôles moyennes sont celles qui sont

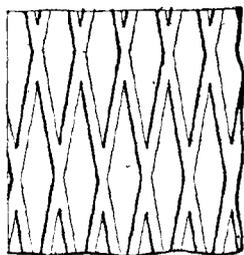


Fig. 51. — Tôle striée.

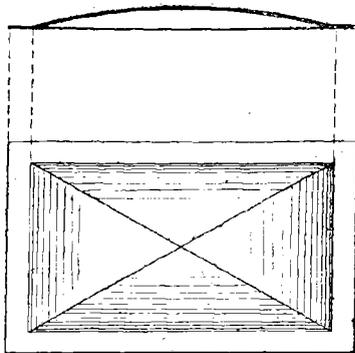


Fig. 52. — Tôle emboutie.

comprises entre ces deux limites extrêmes : on fait quelquefois rentrer dans les tôles de construction toutes celles qui ont une épaisseur supérieure à 3 millimètres.

La tôle de construction subit souvent avant d'être livrée au commerce certaines préparations qui en facilitent l'emploi. C'est ainsi que certaines usines livrent des tôles striées, comme l'indique la figure 51, qui remplacent avantageusement les dallages en fonte ; ou bien encore des tôles embouties, présentant la forme indiquée par la figure 52. Les stries s'obtiennent directement au laminoir au moyen d'entailles correspondantes faites sur la table des cylindres. L'emboutissage constitue une opération spéciale pratiquée au moyen de presses, ou de marteaux, lorsque la pièce à emboutir ne présente pas une forme bien régulière. L'emboutissage s'applique fréquemment aux tôles qui sont employées dans la construction des chaudières, et ce travail qui détermine facilement des criques et des déchirures dans les parties ainsi déformées, contribue à faire exiger pour ces tôles des qualités spéciales de résistance et de malléabilité.

Les tôles minces exposées à l'air humide se recouvrent très vite d'une couche de rouille qui, par suite de leur faible épaisseur, les perce très facilement. On a

eu l'idée pour remédier à ce grave inconvénient de recouvrir la feuille d'une couche d'un métal moins oxydable et qui puisse faire corps avec le fer. Lorsqu'on emploie l'étain comme enduit préservateur, le produit prend le nom de *fer-blanc*; les tôles recouvertes de zinc reçoivent la dénomination de *tôles zinguées* ou *galvanisées*. On emploie aussi le plomb, bien que dans une moindre proportion que les métaux précédents.

L'étamage, c'est-à-dire l'application du métal sur la feuille, est toujours précédé d'un décapage qui se fait au moyen de l'acide chlorhydrique étendu. Après une immersion de quelques minutes dans le bain acide, les feuilles sont laissées refroidir à l'air; leur surface se découvre par la séparation d'écailles d'oxyde qui s'en détachent, lorsque l'ouvrier en saisissant un paquet avec des pinces, les frappe violemment contre un bloc en fonte. L'enlèvement de ces écailles est achevé par le passage sous des cylindres en fonte dure ou en acier. L'immersion dans le bain de métal fondu se fait alors avec toutes les précautions nécessaires pour que l'adhérence soit bien complète. La préparation est activée au moyen de lavages et de polissages après lesquels les feuilles sont mises en caisses de cinquante jusqu'à deux cents feuilles dont le poids varie de 15 à 120 kilogrammes. On distingue dans le commerce les fers-blancs *ternes au coke*, les fers-blancs *ternes ordinaires*, les fers-blancs *brillants*, les *grands fers-blancs brillants*, etc. De plus, les usines qui s'adonnent spécialement à ce genre de fabrication (et parmi celles-ci nous pouvons citer la Société anonyme des forges de Châtillon et Commentry, la Société des forges de Montataire, la Société des forges d'Hennebont, dans le Morbihan), possèdent une marque de fabrique spéciale qui s'ajoute à la marque ordinaire. C'est ainsi que pour un seul établissement nous trouvons jusqu'à quatre-vingt-treize variétés de produits.

La nomenclature serait longue s'il fallait indiquer ici tous les emplois du fer-blanc. Nous citerons comme exemple la fabrication des boîtes de conserves et des boîtes à cirage qui occupent en France à elle seule plusieurs milliers d'ouvriers.

La vente des tôles est soumise à des règles à peu près uniformes pour toutes les usines. Les tôles de construction se vendent en vertu d'un prix de base qui subit une double majoration suivant le numéro de qualité, qui va de 2 à 6 comme pour les fers marchands et suivant la classe, qui se règle d'après les dimensions des feuilles. De plus, les tôles rondes et celles dites *sur croquis*, c'est-à-dire celles qui doivent être découpées pour présenter certaines formes spéciales subissent une augmentation de prix de 30 francs par tonne, justifiée par l'importance des déchets. En ce moment, le prix de base de la tôle de fer est à Paris de 170 francs.

On distingue dans les tôles fines la tôle *puddlée*, la tôle *anglaise* ou des *Ardennes*, les tôles *demi-douces* et *douces*. Pour ces dernières, le fer fondu Thomas est spécialement employé et le prix varie suivant la qualité et la classe de 200 à 400 francs la tonne. Le prix de la tôle douce galvanisée est de 425 francs pour la première classe, de 555 francs pour la sixième; celui de la tôle douce étamée varie de la même manière de 650 à 800 francs.

Les indications de prix données dans ces deux derniers chapitres s'appliquent aux premiers mois de l'année 1888.

Il convient de mentionner à côté des tôles deux variétés de fers laminés qui s'en rapprochent. Ce sont les *larges plats* laminés au laminoir universel et les *feuillards*.

Lorsque les travaux de construction exigent des feuilles métalliques présentant une grande longueur par rapport à leur largeur, on remplace, pour le laminage, les deux cylindres horizontaux du train de tôle par un système de quatre cylindres, dont deux horizontaux et deux verticaux, entre lesquels le paquet de fer est introduit. Ces quatre cylindres pouvant être écartés ou rapprochés entre des limites assez larges, on peut obtenir ainsi des épaisseurs et des largeurs variant d'une manière presque insensible et remplacer par cette cannelure unique, mais variable, un grand nombre de cannelures fermées. De là le nom de *laminoir universel* donné à cet appareil, qui rend de grands services dans les forges. Les bords du large plat étant, en effet, toujours limités par les deux galets verticaux, présentent une régularité parfaite, et on évite ainsi les déchets causés par la cisaille. Les largeurs les plus favorables pour le travail au laminoir universel sont comprises entre 15 et 60 centimètres. Le prix des larges plats est en général inférieur de 5 francs par tonne à celui des tôles ordinaires.

On désigne sous le nom de *feuillards* les fers plats de petits échantillons vendus en botte. Ils sont à peu près uniquement employés au cerclage des tonneaux. Leur prix dépasse ordinairement de 5 francs celui de la tôle ordinaire.

Machine. — On désigne sous ce nom assez singulier le petit fer rond ou carré vendu en bottes circulaires. C'est la matière première de la fabrication du fil de fer, qui sert à son tour à la production des pointes, des épingles, des aiguilles, des ressorts en spirale, etc. On prend comme point de départ de la fabrication de la machine des barres brutes à section carrée portant le nom de billettes. Ces billettes peuvent provenir de fer puddlé ou de fer fondu. Mais le métal employé doit joindre à une grande malléabilité une ténacité suffisante pour résister aux pliages et au travail à froid, que la machine et ses dérivés doivent souvent subir.

La machine et le fil de fer se vendent d'après leur diamètre; mais au lieu d'une classification correspondant à des variations régulières de ce diamètre, on emploie encore aujourd'hui les numéros d'une jauge spéciale indiquée dans le tableau suivant. Le tableau indique en regard du numéro de la jauge le diamètre en dixièmes de millimètre, la longueur correspondant au poids de un kilog., enfin le poids fourni par 100 mètres du numéro en question.

Les fils de fer sont, comme les tôles minces, soumis à certaines opérations ayant pour but d'augmenter leur valeur industrielle. On les vend *clairs et recuits*, *galvanisés*, *cuivrés*. Mais avant de subir ces préparations chimiques, la machine, lorsqu'elle est vendue sous la dénomination de « fil », subit un travail à froid désigné sous le nom d'*étirage à la filière*, qui augmente notablement sa résistance, mais doit être comme pour la tôle accompagné de recuits. L'ensemble de cette opération, qui constitue l'art du tréfileur, s'écarte trop de la métallurgie dans ses relations avec la chimie, pour que nous puissions nous étendre sur ce sujet.

Nous voudrions, en terminant, présenter, comme nous l'avons fait pour la

FILS PAR BOTTES DE 5 KILOGRAMMES																
NUMÉROS DE LA JAUGE	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
DIAMÈTRES EN DIXIÈME DE MILLIMÈTRE	100	94	88	82	76	70	64	59	54	49	44	39	34	30	27	24
MÉTRAGE PAR KILOGRAMME	1 51	1 55	2 11	2 19	2 84	3 35	4 01	4 71	5 65	6 85	8 46	11 12	14 28	16 51	22 72	28 58
POIDS DES 100 MÈTRES	66 *	53 800	47 200	41 »	35 200	29 800	24 900	21 200	17 700	14 600	11 800	9 »	7 »	5 400	4 400	3 500

FILS PAR BOTTES DE 5 KILOGRAMMES (suite)																
NUMÉROS DE LA JAUGE	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	P	
DIAMÈTRES EN DIXIÈMES DE MILLIMÈTRE	22	20	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	
MÉTRAGE PAR KILOGRAMME	34 48	41 66	50 »	42 47	71 41	83 33	100 »	115 »	135 50	180 32	202 42	256 41	335 57	456 02	657 80	
POIDS DES 100 MÈTRES	2 900	2 400	2 »	1 600	1 400	1 200	1 »	* 876	* 738	* 610	* 494	* 390	* 298	* 219	* 152	

fonte, un tableau de la production des fers laminés en France et dans les pays qui l'avoisinent; mais cette statistique serait forcément incomplète et jusqu'à un certain point erronée. Nous avons eu maintes fois l'occasion de signaler la confusion qui existe encore aujourd'hui entre les dénominations de fer et d'acier. Nous nous bornerons donc à extraire de ces statistiques quelques chiffres particulièrement saillants en les accompagnant de rapides commentaires.

D'après les tableaux publiés par le comité des forges de France (chiffres provisoires, mais différant ordinairement très peu des résultats définitifs), la production totale du fer en France avait été, en 1885, de 771,299 tonnes, se décomposant en : fer puddlé, 662,390 tonnes; fer affiné au charbon de bois, 13,831 tonnes; fer obtenu par le réchauffage de vieux fers et riblons (fer de ferraille), 85,078 tonnes. Suivant les produits, ce même tonnage se décompose en : rails, 4,734 tonnes; fers marchands et spéciaux, 656,173 tonnes; tôles, 110,392 tonnes.

Si nous examinons la manière dont les divers départements prennent part à cette production, nous trouvons en première ligne, et de beaucoup, le département du Nord avec un chiffre de 261,359 tonnes, dont 2,850 pour les rails, 225,186 pour les fers marchands et profilés, et 33,323 pour les tôles. C'est qu'en effet l'existence des houillères d'Anzin, et aussi le voisinage de la Belgique a depuis longtemps créé dans ce département une puissante industrie métallurgique, principalement groupée autour des villes de Valenciennes et de Maubeuge. Après le département du Nord, se présente celui de la Haute-Marne, avec un tonnage total de 66,903 tonnes. Nous avons eu plus d'une fois l'occasion de citer la Champagne comme un des pays où l'industrie du fer s'était le plus anciennement développée, et la ville de Saint-Dizier est encore aujourd'hui un centre important, surtout pour la machine et les industries qui s'y rattachent. Ce sont des fabrications du même genre qui permettent au département des Ardennes de revendiquer le troisième rang, avec une production de 66,388 tonnes. Charleville, Nouzon sont des localités bien connues de tous ceux qui s'occupent de constructions métallurgiques, et en particulier de matériel roulant de chemins de fer.

Le département de Saône-et-Loire, avec l'usine du Creusot, fournit 49,321 tonnes, celui de la Loire, avec les usines groupées autour de Saint-Étienne, Saint-Chamond et Rive-de-Giers, 43,867 tonnes; c'est à peu de chose près le chiffre du département de Meurthe-et-Moselle (42,360 tonnes); enfin, la Seine occupe dans cette statistique, avec 38,588 tonnes, le septième rang, qu'on sera peut-être surpris de lui voir attribué; il existe pourtant à La Villette et à Grenelle des forges qui arrivent, par la production du fer de ferraille, à un tonnage important.

D'après les mêmes sources, la production de l'acier avait été, dans la même année, de 537,048 tonnes, se décomposant en : acier Bessemer, 369,889 tonnes; acier Siemens-Martin, 128,399 tonnes; acier puddlé, 13,506; cémenté, 6,877; au creuset, 6,354; acier obtenu par laminage de vieil acier, 2,043 tonnes. Dans ces chiffres, les rails occupent, avec 356,209 tonnes, une part absolument prédominante; dans le chiffre indiqué pour les aciers marchands (125,685 tonnes), les bandages et les essieux de chemins de fer, qui ne sont indiqués séparément dans aucune statistique, doivent occuper une assez grande place; enfin, les tôles entrent dans le tonnage pour 47,154 tonnes, c'est-à-dire moins de la moitié des tôles

de fer; mais c'est surtout en pareil cas que la distinction entre le fer et l'acier est difficile à bien établir.

Le département du Nord occupe aussi le premier rang dans la production des aciers laminés avec un chiffre de 85,180 tonnes; viennent ensuite Saône-et-Loire, avec 70,209 tonnes; Pas-de-Calais, avec 75,330; Meurthe-et-Moselle (63,218 tonnes), et la Loire (53,756 tonnes), occupent le quatrième et le cinquième rang. Nous avons indiqué, dans le volume de l'*Encyclopédie*, sur les aciers, les principaux établissements qui concourent à cette production, mais nous n'en avons alors pas indiqué les chiffres, qui sont surtout intéressants, rapprochés de ceux du fer.

La production totale du fer et de l'acier a été, dans l'année qui nous occupe, de 1,298,347 tonnes. Elle avait été en Allemagne, dans la même année, de 2,201,969 tonnes. On sait que l'Angleterre nous a depuis longtemps dépassés. Notre pays occupe donc en Europe le troisième rang parmi les pays de grande production sidérurgique, et si nous ne pouvons espérer de regagner l'avance prise par nos deux voisins du Nord et de l'Est, nous comptons du moins que grâce aux efforts si persévérants de nos industriels et aux gisements que nous possédons encore dans le département de Meurthe-et-Moselle d'une part, dans nos provinces algériennes d'autre part, notre situation actuelle ne nous sera pas enlevée.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

A

- AKERMANN. — *Ueber der Standpunkt der Eisenfabrication in Schweden (État de la métallurgie du fer en Suède)*. — Stockholm, 1873.
- *État actuel de la métallurgie du fer et de l'acier en Suède*. — Exposition universelle de Paris, 1878.
- ANCRE DE SAINT-DIZIER. — *Journal de la métallurgie*. Années 1886 et 1887.

B

- BRESSON. — *Note sur l'état actuel de la métallurgie du fer et de l'acier en Autriche-Hongrie*. — Société des ingénieurs civils, 1884.
- BELL (Sir Lowthian). — *Principes de la fabrication du fer et de l'acier*. — Traduit de l'anglais par P.-E.-A. Hallopeau. — Paris, 1888.

C

- Comptoir des forges de Suède (Jernkontoret). — Expériences de force et de traction sur des tôles suédoises produites par des procédés divers.
- Creusot (Usines du). — Notices, catalogues et albums des divers produits.
- Comité des forges de France. — *Bulletins* des années 1886 et 1887.
- Cahiers des charges des administrations de chemins de fer françaises, allemandes et austro-hongroises pour la fourniture du matériel de la voie et du matériel roulant.

F

- FREMY. — *Comptes rendus à l'Académie des sciences*.
- FREMY et PELOUZE. — *Traité de chimie générale, analytique, industrielle et agricole*.
- FLACHAT, BARBAULT et PETIET. — *Traité de la fabrication de la fonte et du fer*. — Paris, 1846.
- FRÉSON. — *L'industrie sidérurgique aux États-Unis d'Amérique*. — *Revue de Liège*, 1885 et 1886.

G

- GRUNER. — *Traité de métallurgie* (1^{re} partie), *métallurgie générale*. — Paris, Dunod, 1875 et 1878.
- GRUNER (Edouard). — *Mémoire sur la situation de la métallurgie du fer en Styrie et en Carinthie*. — *Annales des mines*, 1876.
- Génie civil (Le). — *Revue des industries françaises et étrangères*. Années 1886 et 1887.
- GUETTIER. — *De la fonderie telle qu'elle existe aujourd'hui en France*. Paris.
- GOUVY. — *Étude sur les cubilots*. — Société des ingénieurs civils, 1886.
- GAUTIER. — *Du silicium dans les fontes de moulage*. — Institut du fer et de l'acier, 1886.

H

- HENRY. — *Mémoire sur la fabrication du fer et de l'acier puddlé et de l'acier fondu au four rotatif Pernot à l'usine de Saint-Chamond*. — *Annales des mines*, 1874.

I

- Industrie minérale (Société de l'). — *Comptes rendus du congrès dans l'est de la France en 1887*.

J

- JORDAN. — *Fabrication du ferromanganèse à l'usine de Saint-Louis*. Société des ingénieurs civils, 1877.
- *Note sur les ressources de l'industrie du fer en France*. — *Revue de Liège*, 1878.
- *Les récents progrès de la métallurgie*. — Conférence faite à la Sorbonne en 1881.
- JOANNIS et MOISANT. — *Fer et chrome (Encyclopédie chimique)*. — Dunod, Paris.

K

- KERPÉLY. — *Das Eisenauf der Wiener welt ausstellung (Le fer à l'exposition universelle de Vienne)*. — Schemnitz, 1873.
- *Das Eisenhütten Wesen in Hungarn (La métallurgie du fer en Hongrie)*. — *Iron and steel institute*, 1882.

L

- LAN. — *La métallurgie à l'exposition de 1878*. — *Annales des mines*, 1879.

O

- OSMOND. — *Transformations du fer et du carbone dans les fers, les aciers et les fontes blanches.* — Extrait du *Mémorial de l'artillerie de marine.* — Paris, librairie militaire, 1888.

R

- RIVOT. — *Traité de docimasia.*

S

- Société autrichienne des chemins de fer de l'État. — *Notices et catalogues publiés à l'occasion de diverses expositions.*

T

- TUNNER. — *Die Lage der Eisen industrie in Steimark und Kaernten (Situation de l'industrie métallurgique en Styrie et en Carinthie.* — *Iron and steel institute, 1882.*
- TURNER (Thomas). — *Étude sur les éléments constitutifs de la fonte.* — *Iron and steel institute, 1886.*

U

- URBAIN et MEUNIER. — *Charbon de bois et combustibles minéraux (Encyclopédie chimique).* — Dunod, Paris.

V

- VATHAIRE (De). — *Construction et conduite des hauts fourneaux et fabrication des diverses fontes.* — Paris, Baudry et C^{ie}, 1885.

W

- WOLTERS. — *Sur les conditions techniques et économiques actuelles de la fabrication des poutrelles ou fer à I en Belgique.* — *Revue universelle de Liège, 1886.*
-

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

	Pages.
INTRODUCTION.	1

CHAPITRE II

MINERAIS

Classification des minerais. — Minerais riches ou pauvres. — Classification des minerais d'après la nature de la gangue; d'après leur état physique. — Minerais fusibles ou réfractaires; minerais purs ou impurs. — Minerais oxydulés; minerais oxydés anhydres; minerais oxydés hydratés; minerais carbonatés; minerais silicatés. — Exploitation des minerais de fer. — Prix de revient des minerais.	3
--	---

CHAPITRE III

FONDANTS

Nécessité et rôle des fondants. — Castine; quartz.	19
--	----

CHAPITRE IV

COMBUSTIBLES

Charbon de bois. — Anthracite. — Coke. — Fours à coke; leur construction et leur emploi	22
---	----

CHAPITRE V

OPÉRATIONS AUXQUELLES SONT SOUMIS LES MINERAIS AVANT LEUR TRAITEMENT AU HAUT FOURNEAU

Concassage. — Lavage. — Grillage.	35
---	----

CHAPITRE VI

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA CONSTRUCTION DES HAUTS FOURNEAUX

Éléments constitutifs du haut fourneau. — Profils divers. — Hauts fourneaux trapus ou élancés. — Dimensions absolues et relatives des diverses parties du haut fourneau.	39
--	----

CHAPITRE VII

ÉTUDE DES DIVERSES PARTIES DU HAUT FOURNEAU ET DES APPAREILS

ACCESSOIRES

Emplacement du haut fourneau. — Monte-charges. — Appareils de chargement et prises de gaz. — Chemise intérieure et extérieure. — Tuyères. — Dispositifs de coulée de la fonte et du laitier. — Machines soufflantes. — Appareils à chauffer l'air. — Halles de coulée	47
---	----

CHAPITRE VIII

ROULEMENT DU HAUT FOURNEAU

	Pages.
Dosage du haut fourneau ; son calcul et sa vérification. — Mise en feu. — Dérangements d'allure et accidents. — Mise hors feu. — Campagne du haut fourneau.	60

CHAPITRE IX

CLASSIFICATION ET PROPRIÉTÉS DES FONTES BRUTES

Fontes graphiteuses, grise, truitée, blanche. — Fonte de moulage et d'affi- nage. — Influence des métalloïdes et des métaux sur les propriétés physiques et mécaniques des fontes.	67
--	----

CHAPITRE X

FABRICATION DE LA FONTE (suite.)

Considérations économiques sur le roulement des hauts fourneaux. — Prix de revient. — Statistique de la fabrication de la fonte	75
--	----

CHAPITRE XI

MOUTAGES EN FONTE

Propriétés des fontes de moulage. — Appareils de fusion ; cubilots et modè- lerie réverbères. — Divers procédés de moulage : sable-vert et sable séché ; moulages en terre et en coquille. — Organisation du travail des fonderies.	78
--	----

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE XII

AFFINAGE DE LA FONTE ET FABRICATION DU FER SOUDÉ

Divers procédés d'affinage. — Fer fondu et fer soudé. — Bas foyers. — Puddlage. — Fours à puddler. — Allures diverses du puddlage. — Puddlage mécanique. — Organisation des usines à puddler	93
--	----

CHAPITRE XIII

FERS LAMINÉS

Confection des paquets. — Fer de ferraille. — Fours à réchauffer. — Fabri- cation des divers produits laminés obtenus par l'emploi du fer paqueté. — Fers marchands et fers profilés	107
--	-----

CHAPITRE XIV

FERS LAMINÉS (suite.)

Tôle de construction. — Tôles minces et fer-blanc. — Machine ; fils et ses dérivés	128
INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.	139