



April 1977

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
C.E.C.A.

**NOUVEAUX PROCÉDÉS
TECHNIQUES
DANS LA SIDÉRURGIE**

Volume **3**

Les aciéries

Manuel destiné à la formation
du personnel sidérurgique

Bruxelles, avril 1971

*Convertisseur de l'aciérie LD de la Société Cockerill à Seraing, Belgique
(Photo Cockerill)*

*Copyright 1968 by
Commission des Communautés européennes*

AVERTISSEMENT

L'élaboration de ce manuel est le résultat des efforts de nombreux techniciens et experts des six pays de la Communauté européenne du charbon et de l'acier.

Y ont collaboré, à la demande de la Commission :

— *pour le projet du manuscrit :*

Dr.-Ing. Karl Ernst MAYER, Dortmund

secondé par

Dr.-Ing. Ernst AMELUNG, Dortmund (Chap. 4.3 à 4.3.2.)

Dipl.-Ing. Dieter EICKELPASCH, Datteln, et Dipl.-Ing. Gerd HOFFMANN, Salzgitter (Chap. 4.4. à 4.4.2.)

Dipl.-Ing. Arno ENGEL et Ing. grad. Fritz HARTMANN, Dortmund (Chap. 4.1.2.)

Dr.-Ing. Martin HATER, Dortmund (Chap. 4.2.5.)

Ing. grad. Wolfgang HELL, Dortmund (Chap. 4.1.3.)

Dr. rer. nat. Karl RÜTTIGER, Dortmund (Chap. 4.5. à 4.5.4.)

Dipl.-Ing. Hans SCHIRMER, Essen (Chap. 4.2.1., 4.2.3., 4.2.4. et 4.2.6.)

Dr.-Ing. Gerd WIETHOFF, Dortmund (Chap. 4.7.)

— *pour le texte définitif, tant du point de vue du fond que de la forme, un comité de rédaction composé des membres ci-après :*

Fritz BERGHAUS

Wirtschaftsvereinigung Eisen- und
Stahlindustrie, Düsseldorf

Aldo CANONICI

Italsider S.p.A., Gênes

Charles FOCCROULLE

Cockerill-Ougrée-Providence S.A., Liège

Jean KREMER

ARBED S.A., Luxembourg

Georges PASSE

Chambre syndicale
de la sidérurgie française, Paris

A. STOEL

K.N.H.S., IJmuiden

secondés par un certain nombre d'experts des usines.

PRÉFACE

L'objectif du manuel «Nouveaux procédés techniques dans la sidérurgie» est de donner une présentation et une description systématiques des procédés de fabrication qui ont été introduits ces dernières années par le progrès technique dans la production de la fonte et de l'acier.

Il a été conçu de manière à pouvoir être utilisé comme documentation de base cohérente pour la formation et le perfectionnement de la main-d'œuvre hautement qualifiée des services de production de l'industrie sidérurgique, par exemple les premiers fondeurs, les premiers lamineurs, les opérateurs, les contremaîtres et les techniciens.

La réalisation de ce manuel a été décidée en raison du fait qu'il n'existe, dans les six pays de la Communauté, que peu de manuels destinés directement à la formation de ce personnel et que ceux-ci se trouvent souvent dépassés, quant au contenu, par l'évolution intervenue dans le domaine technique. En proposant, en 1965, à la Haute Autorité de la CECA d'entreprendre son élaboration, la Commission «Formation professionnelle – Acier» a certainement contribué à combler une lacune dans la formation des travailleurs de la sidérurgie.

Le manuel comprend les quatre volumes suivants :

Volume I : La technique de mesure et de l'automatisation

Volume II : Mécanisation, automatisation et techniques de mesure dans les services de hauts fourneaux

Volume III : Nouveaux procédés techniques dans les aciéries

Volume IV : Nouvelles techniques dans les laminoirs.

Le volume I a été publié en juin 1967 et le volume II, en février 1969.

Le présent volume constitue la troisième publication de cette série. Quant au quatrième et dernier volume, il devrait sortir de presse dans le courant de l'année 1972.

Il est à souligner que le texte de ce volume, comme celui des volumes précédents paraît dans les quatre langues de la Communauté après avoir été revu et approuvé, tant du point de vue technique que pédagogique par un comité de rédaction institué par la Commission «Formation professionnelle – Acier» et composé d'experts de la formation professionnelle dans la sidérurgie des six pays de la Communauté. On aura ainsi démontré qu'il est possible, grâce au travail en équipe de ce comité, d'élaborer, à partir de données parfois très complexes, un texte adapté aux exigences tant techniques que pédagogiques et linguistiques et valable pour l'ensemble de la Communauté.

La Commission des Communautés européennes, à laquelle il appartient de poursuivre les travaux engagés par la Haute Autorité, espère par sa publication fournir une nouvelle contribution au développement et à l'harmonisation de la formation professionnelle. Celle-ci constitue une des préoccupations majeures de la politique sociale et économique de la Communauté, et la Commission souhaite y apporter un appui constant.

La Commission tient également à exprimer ici ses vifs remerciements à toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de cet ouvrage et, en particulier, au Dr.-Ing. K.E. Mayer qui – aidé de plusieurs co-auteurs – a fourni le projet du manuscrit, ainsi qu'aux membres du comité de rédaction, MM. Berghaus, Canonici, Focroulle, Kremer, Passe et Stoel qui, aidés de nombreux experts des entreprises de la sidérurgie, ont assuré la mise au point du texte définitif.

Albert COPPÉ
Membre de la Commission

Bruxelles, mai 1971

SOMMAIRE DU VOLUME III

LES ACIÉRIES

1. Introduction

1.1. Raisons de l'emploi de méthodes nouvelles dans les exploitations de l'industrie sidérurgique

1.1.1. Croissance des besoins en produits d'acier

1.1.2. Augmentation des exigences de qualité et besoins en produits d'acier à nouvelles caractéristiques d'emploi

1.1.3. Remplacement de la main-d'œuvre humaine par des machines

1.1.4. Nécessité de travailler dans des conditions rentables

2. Les techniques de mesure et de l'automatisation dans les usines sidérurgiques

(Ce sujet est traité dans le volume 1 du manuel; le présent volume 3 donne uniquement un sommaire du volume 1 — voir page 23)

3. Mécanisation, automatisation et technique de mesure dans l'exploitation des hauts fourneaux

(Ce sujet est traité dans le volume 2 du manuel; le présent volume 3 donne uniquement un sommaire du volume 2 — voir page 25)

4. Les aciéries

4.1. *L'oxygène gazeux comme agent d'oxydation*

4.1.1. La production d'oxygène techniquement pur

4.1.2. Dangers de l'emploi de l'oxygène gazeux

- 4.2. *Les procédés au convertisseur à soufflage d'oxygène par le haut*
 - 4.2.1. Installations
 - 4.2.2. Matières premières
 - 4.2.3. Mécanisme des réactions métallurgiques
 - 4.2.4. Installations de mesure, de commande et de réglage
 - 4.2.5. Mise en œuvre pratique des procédés à l'oxygène
 - 4.2.6. Le procédé Kaldo
 - 4.2.7. Caractéristiques qualitatives des aciers au convertisseur à oxygène soufflé par le haut
- 4.3. *L'emploi de l'oxygène gazeux dans les procédés Martin et au four électrique*
 - 4.3.1. Emploi de l'oxygène gazeux au four Martin
 - 4.3.2. Emploi de l'oxygène gazeux au four électrique
- 4.4. *Le dépoussiérage des fumées des aciéries*
 - 4.4.1. Formation et effets des poussières d'aciéries
 - 4.4.2. Procédés de dépoussiérage
- 4.5. *Le traitement sous vide de l'acier liquide*
 - 4.5.1. Schéma du processus du dégazage
 - 4.5.2. Vide et pression des gaz
 - 4.5.3. Méthodes de dégazage par injection
 - 4.5.4. Effets du traitement par le vide sur les caractéristiques d'emploi des aciers
- 4.6. *La coulée continue de l'acier*
 - 4.6.1. L'opération
 - 4.6.2. Structure d'une installation de coulée continue
 - 4.6.3. Contrôle et réglage de la coulée
 - 4.6.4. La coulée
 - 4.6.5. Défauts de la coulée

4.6.6. Possibilités et avantages de la coulée continue

4.6.7. Avantages de la coulée continue

4.7. *Nouveaux procédés de mesure pour le contrôle et l'optimisation de la coulée des lingots carrés et des lingots méplats*

Titres et chapitres principaux des volumes 1, 2 et 4

Source des photographies, dessins, diagrammes et tableaux

1. INTRODUCTION

Sans trêve, le paysan laboure avec le fer
Pour avoir, tous les ans, une moisson dorée.
On cisèle, on vendange la vigne avec le fer,
L'arbre fruitier est entretenu, émondé avec le fer,
On construit les maisons, on scie la dure pierre avec le fer,
Pas de travail humain possible sans le fer.

C'est en ces termes qu'il y a quelque 450 ans, le jeune Nicolas Bourbon, alors âgé de quatorze ans et fils d'un maître de forges de Vendevre, en Lorraine, dépeignait les mérites du fer dans son ouvrage, devenu célèbre, «Ferraria». Il met très énergiquement l'accent sur l'importance exceptionnelle du matériau fer pour l'humanité : «*Pas de travail humain possible sans le fer*».

Rien n'a changé depuis, bien que les hommes aient, entre temps, découvert un certain nombre de matériaux très utiles. Nous ne rappellerons ici que l'aluminium et les matières plastiques. Le fer (fonte) et l'acier comptent toujours au nombre des matériaux les plus importants – si même ils ne sont pas les plus importants – qu'emploient les hommes.

C'est pourquoi la production du fer et de l'acier ne cesse de s'accroître, non seulement dans les pays qui possèdent déjà, depuis longtemps, une industrie sidérurgique comme, par exemple, ceux qui font partie de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (C.E.C.A.), la Grande-Bretagne, la Suède, l'U.R.S.S. ou les États-Unis, mais aussi dans les pays qui naguère ne possédaient en propre ni hauts fourneaux, ni aciéries, ni laminoirs, et qui font des efforts considérables pour créer une industrie sidérurgique nationale.

Cependant, depuis une dizaine d'années, des transformations considérables se sont opérées, en particulier dans les pays de la C.E.C.A.

Les procédés techniques et l'organisation du travail ont été améliorés dans les usines anciennes; les installations surannées ont été modernisées; de nouvelles usines sont nées, au bord de la mer en particulier. Modernisation, procédés techniques nouveaux ont entraîné une augmentation de la production, en même temps qu'une amélioration de la qualité, et de nouveaux produits sont apparus sur le marché.

Cette évolution n'est pas encore terminée. Mais les mesures de rationalisation, de mécanisation et d'automation appliquées en vue d'accroître la productivité et de diminuer les frais d'exploitation, ont aussi pour effet de modifier les conditions de travail et les perspectives de l'emploi.

L'objectif commun à toutes ces mesures, ramenées au même dénominateur, s'exprime ainsi: «Fabriquer davantage de produits en acier, meilleurs et moins chers, avec moins de travail».

1.1. RAISONS DE L'EMPLOI DE MÉTHODES NOUVELLES DANS LES EXPLOITATIONS DE L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE

On est amené à poser la question de savoir pourquoi l'objectif en question est poursuivi. Les réponses à cette question ont déjà été au moins partiellement indiquées. Depuis qu'on a commencé à fabriquer le fer et l'acier, les besoins en métal n'ont cessé d'augmenter. Mais la concurrence sur le marché de l'acier devient aussi plus forte à mesure que croît le nombre des usines métallurgiques. En concurrence avec d'autres usines produisant des tonnages considérables, une entreprise ne peut soutenir la lutte que si elle est en mesure d'offrir ses propres produits à plus bas prix ou à meilleure qualité ou si elle propose des produits nouveaux que la concurrence ne peut pas fabriquer.

Il faut enfin mentionner le désir, né du développement culturel général des peuples, d'améliorer les conditions de vie des hommes, en éliminant, notamment, les travaux physiques pénibles.

1.1.1. Croissance des besoins en produits d'acier

La production du fer et de l'acier est pratiquée dans les pays de la C.E.C.A. depuis 2000 ans au moins. A cette époque reculée, le fer était déjà à l'honneur, mais les procédés techniques étaient très primitifs (*fig. 1*). Il fallait des heures d'un travail épuisant pour obtenir des lopins de fer de la grosseur du poing. On ne connaissait que le forgeage comme procédé de transformation ultérieure.

Il n'est donc pas étonnant que, comme l'acier, les outils ou les armes primitives (marteaux, tenailles, socs de charrues ou épées, pointes de lances, etc.) aient été rares et aient atteint des prix comparables à ceux de l'or et de l'argent.

Au cours des années, les hommes n'ont cessé de découvrir de nouvelles applications de ce matériau. Pensons seulement à tout ce que, maintenant, on fabrique avec l'acier: machines, matériel ferroviaire, navires, autos, avions et fusées, sans parler des ponts, maisons, poêles, réfrigérateurs, machines à laver, boîtes de conserves et bien d'autres choses.

Les efforts des sidérurgistes pour augmenter la production afin de pouvoir satisfaire une demande croissante, ont été entrepris de très bonne heure, mais la réussite ne fut que relative jusqu'à il y a environ un siècle (*fig. 2*). Pratiquement, la demande dépassait toujours la production. Cette situation n'a guère changé, même après la découverte des procédés Bessemer et Thomas et, par la suite, des procédés Martin et au four électrique qui permettaient de produire l'acier en plus grande quantité.

Cependant, à notre époque, la situation du marché de l'acier est foncièrement différente. De nombreux pays qui, il y a peu d'années encore, ne possédaient pas en propre d'industrie sidérurgique de quelque importance, ont créé des usines métallurgiques. Tel a été le cas, par exemple, des Indes, de l'Amérique latine, de la Chine et de l'Égypte. En outre, d'autres pays, comme l'URSS et le Japon qui, il est vrai, possèdent des usines métallurgiques depuis de nombreuses décennies, ont, ces temps derniers, développé d'une manière considérable leur production de fonte et d'acier. Bien que les besoins en acier du monde entier continuent d'augmenter, la concurrence qui résulte de cette situation rend de plus en plus difficile à la sidérurgie de la CECA d'écouler sa production. Les usines devront alors réduire leur production ou bien s'efforcer d'offrir leur produits à meilleur marché que les entreprises concurrentes. Mais cela n'est possible que dans la mesure où elles possèdent des installations industrielles modernes à gros rendement, ou si leurs produits présentent des caractéristiques de qualité particulières.

Cette constatation nous ramène à la seconde des raisons invoquées pour consentir un effort continu de perfectionnement des procédés techniques conduisant à l'amélioration de la qualité des nuances d'acier et à la production de nuances à nouvelles caractéristiques d'emploi.

1.1.2. Augmentation des exigences de qualité et besoins en produits d'acier à nouvelles caractéristiques d'emploi.

Il y a très longtemps que les producteurs d'acier ont constaté que pour des utilisations différentes, il fallait employer des nuances également différentes de fonte et d'acier.

La fonte de moulage, par exemple, est employée pour fabriquer certains appareils comme les poêles, l'acier forgeable, pour la fabrication d'un soc de charrue, d'un couteau ou d'une épée.

Mais il a fallu, en outre, adapter les caractéristiques de la fonte ou de l'acier aux efforts très différents supportés pendant leur utilisation par les outils, appareils, machines, etc., fabriqués avec ces matériaux. C'est ainsi, par exemple, que si un soc de charrue exige un acier dur, tenace mais néanmoins flexible, par contre un poêle peut être fabriqué en fonte de moulage fragile.

Au début, on ne connaissait comme procédés de formage pour le fer et l'acier que le moulage et le forgeage. Plus tard est apparu le laminage. En outre, dans les trente dernières années, on a inventé le formage à froid ainsi que les divers procédés de soudure pour les transformations ultérieures.

Ces deux derniers procédés techniques, en particulier, ont imposé à l'acier de nouvelles exigences de qualité qui étaient encore généralement ignorées avant leur emploi. On n'a appris que peu à peu à les connaître et les producteurs d'acier ont dû faire de grands efforts pour donner satisfaction aux nouvelles exigences qu'on appelle: «formabilité à froid», «emboutissage profond», «soudabilité», «résistance au vieillissement», «résistance à la fragilisation», «ténacité à froid».

Cette évolution n'est pas encore terminée, car les industries de transformation et les consommateurs se montrent de plus en plus exigeants sur la qualité des produits sidérurgiques. Ils réclament des aciers à la résistance et à la limite élastique plus élevées, des aciers très résistants aux hautes et basses températures, des aciers résistant aux fortes pressions ainsi que des aciers résistant particulièrement à l'usure. Ils veulent pouvoir construire, en les allégeant, des ponts à grande portée, des conduites tubulaires, de grands réservoirs ou des navires, des wagons, des automobiles, etc. Ils veulent économiser du métal pour pouvoir abaisser le prix de leurs produits. Mais ils veulent aussi augmenter la capacité des navires, des wagons ou des autos, qui dépend elle aussi du poids à vide, ou poids «mort» de ces constructions. Pour d'autres, la résistance à l'usure est d'une importance primordiale. Pen-

sons, par exemple, à la multiplicité des engins mis en service au cours des dernières années pour l'industrie de la construction : excavateurs, pelles mécaniques, bulldozers, bétonnières. Toutes ces machines comportent des pièces qui sont soumises à une usure particulière, par exemple, les godets des excavateurs, les plaques de chenille des bulldozers ou les mélangeurs des bétonnières.

Les procédés de transformation modernes imposent, par ailleurs, des exigences très strictes en ce qui concerne la régularité des caractéristiques de nuance des aciers employés. En d'autres termes, la composition chimique des aciers et leurs propriétés physiques ne doivent osciller qu'entre de très étroites limites. De pareilles exigences ne peuvent être satisfaites que par un contrôle strict de l'élaboration de l'acier et de sa transformation en demi-produits et produits finis.

Les exigences concernant la qualité de la fonte et de l'acier continueront à augmenter dans l'avenir en fonction des nouvelles applications qu'ils pourront recevoir. Par exemple, un nouveau domaine d'emploi important pour l'acier est celui de la construction des réacteurs atomiques, le métal utilisé à cette fin devant répondre à des spécifications de qualité particulièrement sévères.

L'industrie sidérurgique doit donc continuellement rechercher de nouvelles possibilités pour satisfaire les exigences de qualité de ses clients.

1.1.3. Remplacement de la main-d'œuvre par des machines

Les efforts déployés pour libérer les ouvriers sidérurgistes des travaux corporels pénibles contribuent à améliorer les techniques sidérurgiques utilisées depuis des dizaines d'années ou à mettre en œuvre de nouveaux procédés techniques, sur lesquels on aura à revenir. Il existe trois raisons pour agir dans ce sens.

L'une d'elles est la préoccupation d'ordre purement social et qui s'applique sur le plan général, visant à améliorer les conditions de vie de l'être humain. Cet objectif peut être atteint en particulier par l'utilisation de machines permettant d'éviter un travail manuel pénible.

Mais l'utilisation de ces machines n'a pas pour seul effet de remplacer le travail manuel, car les machines effectuent également un travail déterminé plus vite et, la plupart du temps, mieux que ne peut le faire l'ouvrier. Ainsi est mise en lumière la deuxième raison de faciliter le travail à l'homme. Il s'agit ici de la nécessité, déjà évoquée, d'augmenter le rendement des services de production (cf. le paragraphe 1.1.1.).

Enfin, la possibilité ou la nécessité d'économiser la main-d'œuvre constitue la troisième raison de s'efforcer d'alléger le travail humain.

La dernière raison évoquée, concernant le développement constant des techniques sidérurgiques, est le désir de toute entreprise travaillant en économie libre, et pas seulement de l'industrie sidérurgique, de réaliser des bénéfices en rapport avec son activité.

1.1.4. Nécessité de travailler dans des conditions rentables

La fabrication de fonte, d'acier en lingots et de produits laminés exige des ressources financières considérables qui doivent être assurées en permanence par les entrées provenant de la vente de ces produits. En outre, les fonds mis à la disposition des sociétés sidérurgiques par des bailleurs privés ou par l'État pour entretenir et renouveler les installations industrielles doivent être rémunérés.

On appelle frais de fabrication, les dépenses engagées pour la production de la fonte, de l'acier en lingots et des produits laminés. Dans cette catégorie entrent les dépenses consacrées aux matières premières telles que le minerai de fer, les riblons ou la chaux, aux combustibles comme le coke, le gaz, le fuel, à l'énergie électrique, à l'eau de réfrigération et aux produits réfractaires. Il s'y ajoute les salaires et les traitements des travailleurs occupés par les entreprises. Enfin, les installations s'usent pendant l'exploitation et elles se démodent; il faut constamment engager des dépenses nouvelles pour les travaux d'entretien et de réparation. Malgré le soin apporté à leur conservation, arrive finalement le moment où les installations anciennes, devenues désuètes, doivent être remplacées par de nouvelles installations plus modernes. En conséquence, une partie des bénéfices réalisés par la vente des produits doit être mise en réserve afin de permettre, le moment venu, la création de ces nouvelles installations. On ne saurait enfin oublier que les industriels doivent aussi payer des impôts.

Aux coûts, c'est-à-dire aux dépenses nécessitées par la fabrication, correspondent donc les rentrées réalisées grâce à la vente des produits sidérurgiques ou recettes. Considérées sur une longue période, les recettes doivent toujours être supérieures aux dépenses. C'est la seule façon pour une entreprise de travailler rentablement et de se maintenir.

Au cours des précédentes décennies, il était encore relativement facile de réaliser des bénéfices parce que la production de fonte et d'acier était considérablement plus faible qu'à présent et les prix suffisamment rémunérateurs. C'est ainsi qu'en 1900, la production mondiale d'acier en lingots s'éle-

vait à 28 millions de tonnes, alors qu'en 1965 elle était plus de dix fois supérieure.

Cependant, il est une loi économique constante, selon laquelle le prix d'une marchandise baisse quand l'offre augmente. Les produits en acier n'échappent pas à cette règle. Il est, toutefois, bien difficile d'évaluer dans quelle mesure la demande d'un produit augmentera dans l'avenir. On doit cependant constater qu'un nombre sans cesse plus grand de pays créent leur propre industrie sidérurgique. La production augmente donc plus vite que les besoins et les prix s'avilissent. Dans ces conditions, il apparaît que seules pourront encore réaliser des bénéfices les entreprises qui, en raison de leurs installations industrielles à grand rendement, fabriqueront leurs produits à si bon compte qu'elles resteront en mesure de réaliser des bénéfices, malgré la diminution de leurs recettes.



Figure 1: exploitation à bas foyer catalan en Siegerland à l'époque de La-Tène.

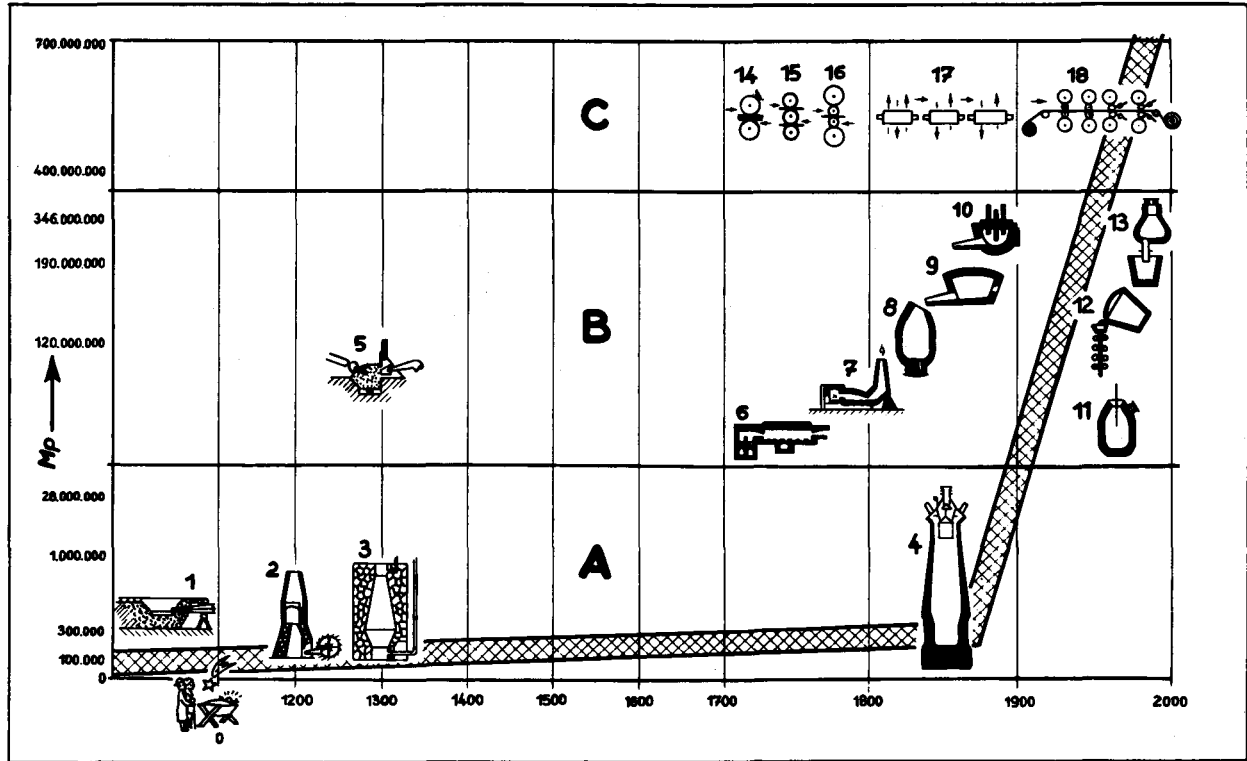


Figure 2

Figure 2: représentation schématique de l'évolution des procédés de fabrication du fer (fonte) et de l'acier

*A - Développement des procédés de production de la fonte
1 = bas foyer, 2 = four à lopins, 3 = haut fourneau ancien,
4 = haut fourneau moderne*

*B - Développement des procédés de production de l'acier
5 = feu d'affinage, 6 = four à creuset, 7 = four à puddler,
8 = convertisseurs Bessemer et Thomas, 9 = four Siemens-Martin, 10 = four électrique, 11 = convertisseur LD-LDAC-OLP, 12 = procédé en coulée continue, 13 = traitement de l'acier par le vide*

*C - Développement des procédés de laminage
14 = train duo, 15 = train trio, 16 = train quarto, 17 = train de laminoir à cages contiguës, 18 = train à larges bandes*

La bande hachurée indique schématiquement la production mondiale d'acier brut. Elle est évaluée à une masse de 700 000 000 de tonnes pour 1984

2. LA TECHNIQUE DE MESURE ET DE L'AUTOMATISATION DANS LES USINES SIDÉRURGIQUES

(Ce sujet est traité dans le volume I du manuel; le présent sommaire donne uniquement un aperçu des principaux titres du volume I).

2.1. Mesures

- 2.1.1. Notions fondamentales sur les mesures électriques
- 2.1.2. Mesure de la pression et du débit des liquides et des gaz
- 2.1.3. Mesure des forces (dynamométrie) et pesage
- 2.1.4. La température
- 2.1.5. Longueur, largeur, épaisseur
- 2.1.6. Analyse automatique

2.2. Représentation des résultats de mesure

- 2.2.1. Appareils à aiguille
- 2.2.2. Enregistreur
- 2.2.3. Représentation numérique
- 2.2.4. Coordination automatique des valeurs de mesure, installations calculatrices, ordinateurs

2.3. Régulation

- 2.3.1. Exemple d'une chaîne de régulation simple
- 2.3.2. Phénomène de pompage

2.4. Commande programmée

2.4.1. Exemple d'une commande programmée simple

2.5. Télétransmission des résultats de mesure et des informations

2.5.1. La télévision dans les usines sidérurgiques

2.6. Sécurité de fonctionnement, entretien et exploitation des installations de mesure et d'automatisation

3. MÉCANISATION, AUTOMATISATION ET TECHNIQUES DE MESURE DANS LES SERVICES DES HAUTS FOURNEAUX

(Ce sujet est traité dans le volume 2 du manuel, le présent sommaire donne uniquement un aperçu des principaux titres du volume 2)

3.1. Dosage et chargement

3.1.1. Silos à minerai et à coke, dispositifs de décharge, bascules de silos

3.1.2. Trucks à lit de fusion, télétransmission et collecte centralisée des poids des lits de fusion.

3.1.3. Pesage avec bascules intégratrices de bandes transporteuses et bascules doseuses de bandes transporteuses

3.1.4. Chargement par benne et par skip

3.1.5. Chargement du gueulard par bandes transporteuses (Détails concernant les bandes; dispositif de chargement sur la plateforme de gueulard alimenté par bandes; commande et surveillance centrale du chargement du gueulard par bandes)

3.1.6. Mesure de la profondeur

3.1.7. Contrôle de la répartition des gaz, automatisation du chargement et du déversement

3.1.8. Chargement de boulettes au haut fourneau

3.2. Surveillance de l'usure de la maçonnerie du haut fourneau au moyen des isotopes radioactifs

- 3.3. Les réchauffeurs de vent (cowpers)**
 - 3.3.1. Les différents types de réchauffeurs d'air**
 - 3.3.2. Vent froid, chaud et mixte**
 - 3.3.3. Addition de vapeur d'eau au vent de haut fourneau**
 - 3.3.4. Gaz de combustion, air de combustion et fumées de cowpers**
 - 3.3.5. Limitation de la température de coupole du cowper**
 - 3.3.6. Chauffage de cowpers par injection de mazout**
 - 3.3.7. Conduite automatique de la marche des cowpers**
 - 3.3.8. Optimisation de la marche du cowper à l'aide d'un ordinateur**
- 3.4. Alimentation du haut fourneau en vent chaud**
 - 3.4.1. Marche en «vent mélangé» ou en «vent séparé»**
 - 3.4.2. Réglage de la pression du vent chaud et de son volume**
 - 3.4.3. «Équirépartition» du vent aux tuyères**
 - 3.4.4. Injection de combustibles auxiliaires ou d'oxygène par les tuyères à vent**
- 3.5. Analyse continue du gaz de gueulard**
- 3.6. Analyse de la fonte et du laitier**
- 3.7. Cabines centrales de contrôle et de commande**
- 3.8. Automatisation de la marche au haut fourneau ou automatisation de l'élaboration de la fonte**

4. LES ACIÉRIES

Depuis près d'un siècle on emploie essentiellement dans les aciéries trois procédés confirmés pour la fabrication de l'acier : le procédé Thomas, le procédé Martin et le procédé au four électrique. En 1950, la production mondiale d'acier en lingots s'est établie de la manière suivante : acier Thomas 10 %, acier Martin 79 %, acier électrique 8 %, autres 3 %.

Il faut remarquer que dans les usines sidérurgiques des pays de la CEE, la part du procédé Thomas était beaucoup plus importante. En 1950, par exemple, environ 60 % de la production de ces pays ont été fabriqués à l'aide du procédé Thomas.

Dans tous les procédés de production d'acier, tous les constituants indésirables contenus dans les matières premières chargées, comme le carbone, le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre et autres, doivent être oxydés à l'aide de l'oxygène pour pouvoir être éliminés du bain, soit avec les fumées produites qui se dégagent, soit avec le laitier qui se forme lors de la fabrication de l'acier.

Avec le procédé Thomas, c'est avant tout l'oxygène de l'air soufflé qui sert d'agent d'affinage. Par contre, aux fours Martin et électriques c'est l'oxygène du minerai de fer qui agit. La production d'air soufflé pour le procédé Thomas ne coûte pas cher et l'atmosphère en fournit certes plus que suffisamment. Mais cet agent d'affinage présente un très gros inconvénient : l'air contient une partie d'oxygène pour quatre d'azote. Lors du soufflage au convertisseur, cette charge d'azote est chauffée aussi bien que le bain et les autres gaz qui se dégagent. De ce fait, il se produit une importante déperdition de la chaleur dégagée lors de l'affinage, chaleur qui pourrait être mieux employée à la fusion de plus fortes quantités de ferrailles par exemple. En outre, une petite partie de l'azote de l'air de soufflage reste incluse dans le bain, ce qui, pour quelques usages particuliers tels que l'emboutissage, peut être défavorable.

Les minerais de fer, eux aussi, présentent un inconvénient comme agents oxydants. Pour libérer l'oxygène des minerais de fer, un apport de chaleur est indispensable. Avec le procédé Thomas cela implique la nécessité de diminuer la charge en ferrailles; au four Martin et au four électrique, cela conduit à une consommation de chaleur supplémentaire. Toutefois le minerai de fer offre, par rapport à l'air de soufflage, l'avantage de ne pas contenir d'azote et d'apporter du fer.

4.1. L'OXYGÈNE GAZEUX COMME AGENT D'OXYDATION

Déjà l'inventeur du premier procédé au convertisseur, l'Anglais Bessemer, avait reconnu qu'il devait être très avantageux d'employer de l'oxygène pur comme agent d'affinage pour la fabrication de l'acier. Mais à cette époque, vers le milieu du siècle dernier, il n'existait pas encore de procédé industriel pour obtenir les grandes quantités d'oxygène pur nécessaires à la production de l'acier.

Environ soixante ans se sont écoulés avant que l'intérêt, suscité par l'emploi de l'oxygène pur comme agent d'affinage, se réveille. On obtint d'abord une augmentation de rendement en ajoutant de l'oxygène pur à l'air de soufflage, on put ainsi charger davantage de ferrailles et on améliora en outre la qualité des aciers Thomas.

C'est en 1930 que, pour la première fois, dans une aciérie Thomas allemande, l'acier au convertisseur a été soufflé avec un vent enrichi d'oxygène (environ 30% O₂). Mais, à l'époque, l'enrichissement de l'air de soufflage en oxygène revenait encore relativement cher et, en conséquence, on mit au point une série d'autres procédés techniques qui permettaient, même sans addition d'oxygène, de produire des aciers Thomas satisfaisant dans l'ensemble aux nouvelles exigences de qualité. Nous ne rappellerons que l'emploi d'une fonte de composition chimique et de caractéristiques physiques particulières ainsi que les différentes mesures prises pour mieux contrôler l'opération de soufflage.

Depuis 1945, l'emploi du vent enrichi s'est beaucoup répandu et on parvient actuellement à produire d'excellents aciers Thomas à basses teneurs en S, P et Ni très largement suffisantes pour de nombreux emplois et même pour certains emboutis (fer-blanc).

L'emploi de l'oxygène pur sous forme gazeuse comme unique agent d'affinage promettait néanmoins de nombreux avantages. Malheureusement, il n'est pas possible de souffler de l'oxygène pur au lieu d'air par le fond du convertisseur Thomas. Lors de l'affinage, les températures atteintes avec

l'oxygène pur sont très élevées et le fond du convertisseur est usé rapidement.

On fit des essais avec des mélanges de gaz sans azote, par exemple gaz carbonique-oxygène, et vapeur d'eau-oxygène. On a pu, par ce moyen, limiter la rapide destruction du fond du convertisseur, mais l'usure demeurait néanmoins importante. En outre, ces agents d'affinage étaient relativement coûteux, le processus de soufflage, très rapide, difficile à contrôler et le rendement en acier était inférieur à celui du procédé classique avec vent ordinaire ou avec vent enrichi.

Depuis lors, on a réussi à produire de l'oxygène gazeux pur en quantités suffisantes et à un prix suffisamment bas. En 1952, dans la ville de Linz, en Autriche, fut mise en service une nouvelle aciérie, dans laquelle, pour la première fois, on utilisa industriellement un procédé de fabrication de l'acier d'un nouveau genre. Ce procédé a été mis au point sur le plan industriel dans deux usines métallurgiques situées dans les localités de Linz et de Donawitz, en Autriche, et, pour cette raison, il a été baptisé d'après les initiales des noms de ces localités : procédé LD. Ce procédé se distingue avant tout de la méthode traditionnelle de production de l'acier, en ce que, pour la première fois, l'oxygène gazeux pur est employé techniquement comme agent d'affinage. Cet oxygène est introduit dans le convertisseur par une lance verticale refroidie par circulation d'eau ; l'oxygène est soufflé à la surface du bain au lieu d'être introduit par le fond. La charge se composait de fonte liquide pauvre en phosphore (maximum 0,4% P) et de riblons. Les aciers LD produits sont, quant à leurs caractéristiques de qualité, supérieurs à de nombreux points de vue aux aciers Thomas et égaux aux aciers Martin.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que des usines sidérurgiques qui, jusque-là, exploitaient le procédé Thomas, aient témoigné un intérêt très vif pour cette nouvelle méthode devenue industrielle. Dans différentes aciéries de la CECA, des variantes techniques du procédé LD furent mises au point, qui permirent d'affiner également à l'oxygène pur, non seulement la fonte pauvre en phosphore, mais aussi la fonte Thomas. Citons ici le procédé LD-Pompey qui a été créé dans l'usine de Pompey. En outre, le procédé OLP (O = oxygène, L = lime = chaux, P = poudre, LP = poudre de chaux = chaux pulvérulente) qui a été mis au point par l'Institut de recherches de la sidérurgie (IRSID) en France, et le procédé LDAC (L = Linz, D = Donawitz, A = ARBED – société sidérurgique luxembourgeoise –, C = Centre national de recherches métallurgiques – institut de recherches belgo-luxembourgeois –) qui est parvenu au stade industriel dans une aciérie de l'ARBED à Dudelange, au Luxembourg, avec la collaboration de l'institut de

recherches précitées. Enfin, mentionnons ici, encore le procédé Kaldo qui a été mis au point en Suède. (Kal = Kalling, nom de l'inventeur du procédé, Do = Domnarvet, localité suédoise où se situe l'aciérie Thomas dans laquelle ce procédé a été employé pour la première fois).

A peu près à la même époque, on a également essayé avec succès d'employer l'oxygène gazeux comme agent d'affinage au four Martin et au four électrique, l'air de combustion du four Martin étant enrichi en oxygène et même parfois remplacé entièrement par de l'oxygène gazeux (four tandem).

L'objectif principal de l'emploi de l'oxygène gazeux pur réside dans l'accélération du processus opératoire, donc, dans l'augmentation de la productivité.

Depuis 1950, l'emploi de l'oxygène pur dans la production de l'acier a pris un développement considérable.

En 1968, plus d'un tiers de la production mondiale d'acier en lingots était déjà fabriqué au convertisseur à l'oxygène soufflé par le haut et de très nombreuses aciéries Martin et électriques employaient aussi couramment l'oxygène gazeux pour la fabrication de l'acier.

4.1.1. La production d'oxygène techniquement pur

L'air, dont la quantité est pratiquement illimitée, constitue la matière première pour la production de l'oxygène gazeux. Il contient, en volume, environ 21 % d'oxygène et environ 78 % d'azote. Le reste consiste en gaz rares comme l'argon et l'hélium par exemple. Deux procédés sont utilisés industriellement pour la liquéfaction de l'air (température d'ébullition – 193°C à la pression atmosphérique) :

- a) le procédé Linde, sans travail extérieur, c'est-à-dire par simple détente, au moyen d'une vanne, de l'air préalablement comprimé;
- b) le procédé Claude, avec travail extérieur : l'air est détendu dans un moteur à l'air comprimé qui entraîne une machine frein.

Une caractéristique importante de ce procédé employé presque universellement aujourd'hui pour la décomposition de l'air en azote et en oxygène est l'emploi de régénérateurs comme échangeurs thermiques.

Pour séparer l'oxygène et l'azote, qui à l'état liquide sont miscibles en toutes proportions, on utilise leur différence de volatilité, par le procédé de distillation fractionnée. Lorsque les appareils sont en régime, l'oxygène et l'azote sortent des colonnes de séparation à leur température d'ébullition sous une pression voisine de la pression atmosphérique, soit respectivement environ

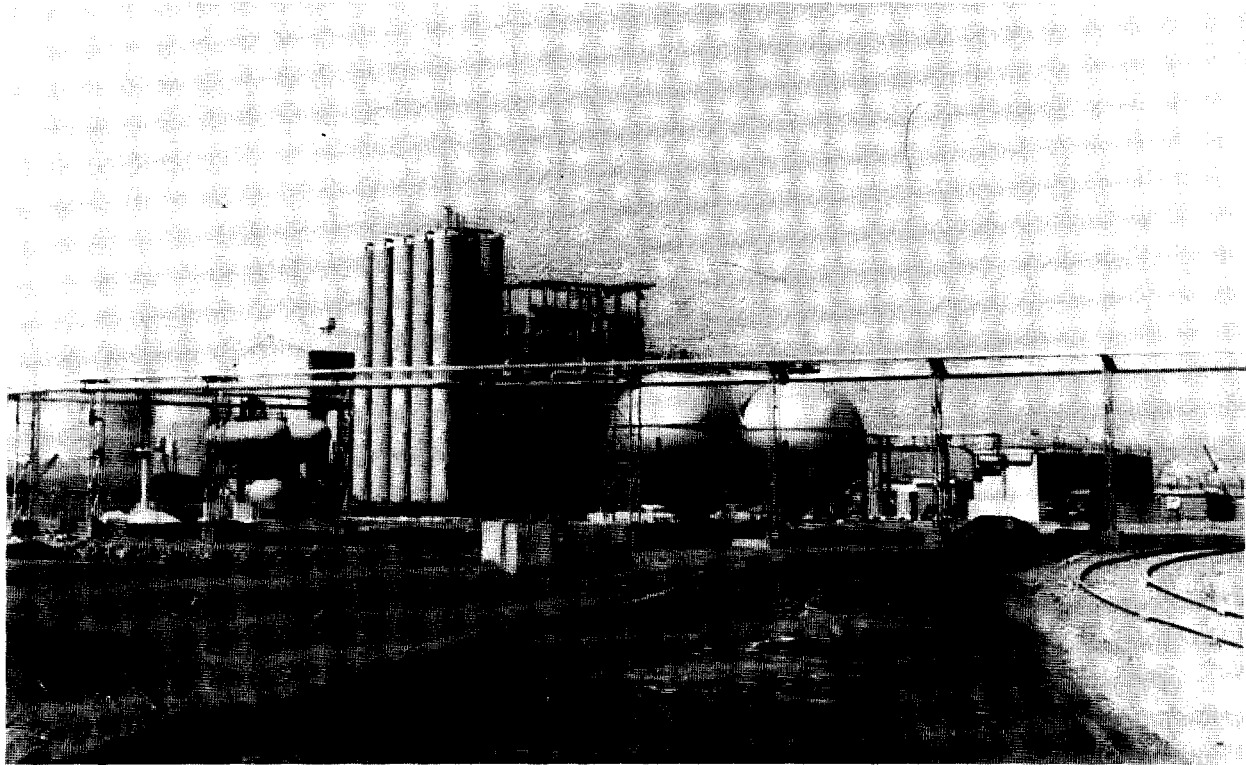


Figure 3: Vue générale d'une installation productrice d'oxygène. A gauche, les accumulateurs horizontaux et verticaux pour l'oxygène gazeux, à droite deux réservoirs sphériques pour l'oxygène liquide, au centre, à l'arrière-plan, l'appareillage de décomposition de l'air et, derrière, la salle des machines.

– 183°C et – 196°C. On récupère bien entendu leurs frigories. C'est le rôle des échangeurs tubulaires ou des régénérateurs et aussi, naturellement, de l'ensemble du système d'isolation thermique.

L'emploi des régénérateurs, imaginé en 1925 par Fränkl, a constitué le progrès technique déterminant pour la production massive d'oxygène. Il a permis de diminuer la puissance nécessaire, de construire de plus grandes unités et, par là, de réduire les frais d'installation et d'exploitation de l'oxygène dans une mesure qui a rendu possible son emploi en grandes quantités à des fins métallurgiques et l'utilisation économique d'oxygène gazeux pour la production de l'acier. *Figure 3.*

Les régénérateurs précités sont des réservoirs cylindriques dont la masse de remplissage a la plus grande surface possible. Aux deux extrémités sont fixées des conduites tubulaires au moyen d'armatures. Les régénérateurs sont parcourus alternativement par l'air à refroidir ou par l'oxygène ou l'azote froids sortant de la colonne de distillation. Il s'ensuit que, tantôt la chaleur du gaz est cédée à la masse de remplissage, tantôt, au contraire, la chaleur est enlevée à la masse de remplissage par le gaz. Dans ce cas, l'air comprimé s'écoule à travers le régénérateur vers la colonne de fractionnement, ce qui le refroidit, puis l'oxygène ou l'azote froid s'écoule en sens inverse, cède sa température froide à la masse de remplissage, et s'échauffe. La masse de remplissage tient ici le rôle d'accumulateur de chaleur, c'est pourquoi ces régénérateurs sont souvent appelés échangeurs-accumulateurs.

La quantité d'air à décomposer est aspirée par un filtre et comprimée par un turbocompresseur à environ 5 atm. Après refroidissement dans un refroidisseur à ruissellement e (*voir figure 4*) à la température ambiante, l'air s'écoule dans la partie inférieure de la colonne de fractionnement 9, appelée colonne de pression, par les régénérateurs 1 et 2 (qui sont toujours jumelés et dont les sections correspondent à peu près au rapport entre l'oxygène et l'azote.)

A la sortie des régénérateurs, un refroidissement à environ – 180°C est obtenu, et, dans la partie inférieure de la colonne de fractionnement, se produit une première décomposition en azote et en un mélange contenant environ 39% d'oxygène. Ce mélange est amené, sous forme liquide, dans la partie supérieure de la colonne de fractionnement 9 par le réservoir 8, où de l'anhydride carbonique et, éventuellement, des hydrocarbures existants sont retenus dans des lits filtrants appropriés, ainsi que par l'échangeur 5, où se produit un surrefroidissement (*v. figure 5*).

L'azote est liquéfié dans le condenseur principal qui se trouve au centre de la colonne de fractionnement, retourne partiellement dans la colonne

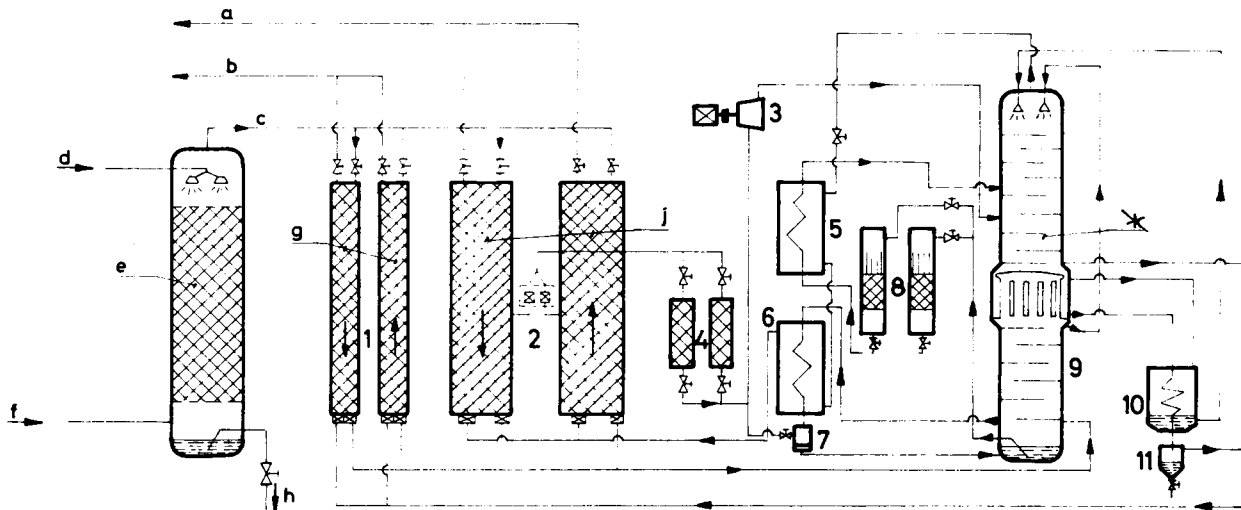


Figure 4: Schéma simplifié d'une installation Linde-Fränkling (d'après la Société des machines frigorifiques de Linde S.A., grandes installations à oxygène).

- | | | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 + 2 Régénérateurs | 8 Adsorbant de C_2H_2 | a Azote à l'air libre | f Air venant du turbo-compresseur |
| 3 Turbine de détente | 9 Colonne de fractionnement | b Oxygène vers les compresseurs | g Régénérateurs |
| 4 Adsorbant de CO_2 | 10 Condenseur complémentaire | c Air | h Eau de réfrigération |
| 5 + 6 Echangeurs de chaleur | 11 Séparateur. | d Eau de réfrigération | j Régénérateurs |
| 7 Condenseur | | e Refroidisseur à ruissellement | k Colonne de fractionnement |

inférieure, et le reliquat est amené dans la colonne supérieure. L'azote issu de la colonne de pression est également condensé dans le condenseur complémentaire 10 et réintroduit dans la colonne supérieure. La décomposition finale au degré de pureté voulu s'effectue alors dans la partie supérieure de la colonne de fractionnement.

L'oxygène obtenu quitte la colonne à l'état liquide, est évaporé dans le condenseur complémentaire 10, s'écoule à travers le régénérateur 1 où il est chauffé à la température ambiante, puis est dirigé vers les compresseurs. Dans le condenseur complémentaire 10 subsiste un résidu liquide lors de l'évaporation. Il contient les impuretés lourdes, particulièrement des hydrocarbures qui sont très dangereux. Ce résidu est recueilli dans le séparateur 11 et évacué de temps à autre. Les hydrocarbures dangereux comprennent principalement les gaz éthane, éthylène, propane et acétylène. Ils constituent des impuretés de l'air à décomposer et proviennent généralement des gaz d'échappement des installations industrielles et des véhicules. Ils représentent un danger pour le procédé de production de l'oxygène, dans la mesure où des accumulations locales stagnantes de ces gaz peuvent causer des explosions en rencontrant l'oxygène.

L'azote traverse le régénérateur 2 par les échangeurs 5 et 6, s'y échauffe, en cédant sa température froide à la masse de remplissage, à la température extérieure puis s'échappe à l'air libre.

La turbine 3 sert à compenser les pertes en froid de l'air amené par différentes voies; cet air se détend dans la turbine après que le gaz carbonique ait été séparé dans l'adsorbant 4. La température de mélange de l'air détendu dans la turbine est réglée de telle façon que, lors de la détente, le point de saturation ne soit pas atteint. La commande et la surveillance du processus de décomposition de l'air sont effectuées, dans la plupart des grandes installations, à distance, à partir d'une centrale de mesure et de réglage (*voir figure 5*).

Tous les réservoirs, conduites tubulaires, etc., compris dans l'appareillage de distillation fractionnée (*figure 6*), sont fortement isolés pour maintenir les pertes de froid aussi faibles que possible. Pour isoler une grande installation de décomposition d'air de 8400 m³/h, par exemple, environ 280 t de matières isolantes sont nécessaires. Le schéma représenté par la figure 2 indique le principe de la décomposition de l'air.

Il existe des variantes possibles dans la disposition des circuits suivant les exigences imposées. La compression de l'oxygène obtenu se fait en deux stades: d'abord dans un tube compresseur à environ 6 atm., puis dans un

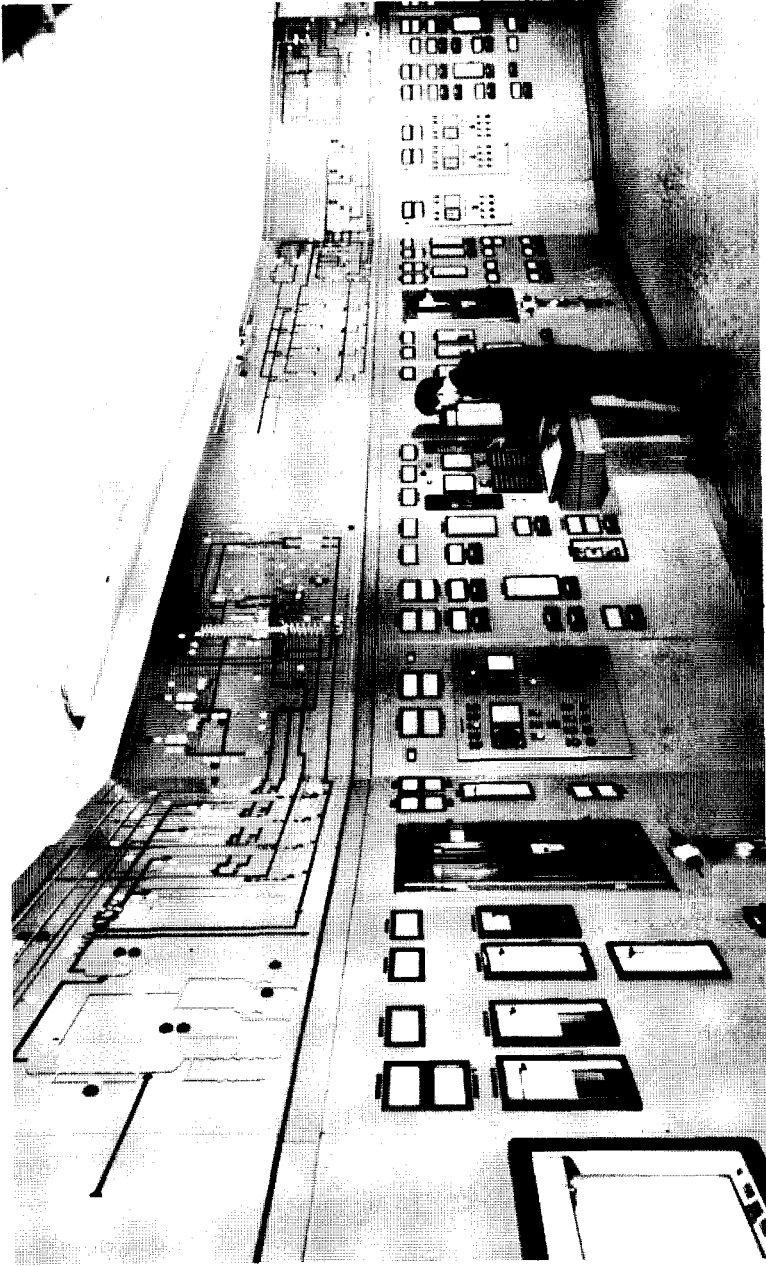


Figure 5: Vue intérieure d'une centrale de mesure et de réglage.

compresseur à piston à 30 atm. (voir figures 7 et 8). C'est à cette pression que l'oxygène est livré, par conduites, aux consommateurs. Les turbocompresseurs ainsi que les compresseurs à piston doivent être construits de façon que l'oxygène ne vienne pas en contact avec de l'huile ou de la graisse. Cette exigence donne lieu à des difficultés, notamment pour les compresseurs à piston, parce qu'il faut renoncer au graissage habituel des pistons. Avec ce type de compresseurs, les pistons n'ont pas de contact avec les parois cylindriques, mais l'étanchéité est obtenue par de nombreux labyrinthes.

Le processus de décomposition de l'air et la compression consécutive de l'oxygène obtenu nécessitent des quantités d'énergie considérables. C'est ainsi, par exemple, qu'une installation produisant 8400 Nm³ O₂/h, d'une pureté de 99,5-99,6%, nécessite une puissance installée d'environ 6000 kW et environ 600 m³ d'eau de réfrigération par heure. C'est pourquoi le prix de l'oxygène est déterminé, en premier lieu, en fonction du prix du courant électrique.

Il n'intervient ni fumée, ni poussière, ni gaz sortants nuisibles ou importuns lors de la production de l'oxygène par décomposition de l'air; par contre, on doit consacrer une attention particulière au bruit pour préserver aussi bien le personnel travaillant dans l'installation que le voisinage d'un bruit insupportable. Il faut, à l'aide d'amortisseurs de bruit et de revêtements insonorisants, ramener le niveau du bruit à une mesure tolérable.

La production d'une installation à oxygène ne peut varier au delà de certaines limites car, si l'utilisation est trop réduite, le processus s'arrête. En pratique, une installation doit être exploitée à environ 60 à 100%. Il n'est pas non plus possible de mettre en marche et d'arrêter à plusieurs reprises, pour un laps de temps trop court, une installation d'oxygène.

Par contre, si l'on considère le consommateur d'oxygène, soit, par exemple, une aciérie à l'oxygène pur, il faut bien reconnaître que la réception d'oxygène est disproportionnée avec les besoins de la production d'acier. Pour plus de clarté, prenons l'exemple suivant.

Dans une aciérie à l'oxygène pur, un convertisseur de 150 t est en marche. Celui-ci travaille avec un cycle de charges d'environ 60 minutes. Le temps net de soufflage d'oxygène est d'environ 16 minutes. La consommation spécifique d'oxygène nécessaire pour produire 1 t d'acier à l'oxygène est d'environ 60 Nm³ d'oxygène par t d'acier. Pour une charge d'une durée d'une heure il faut donc $150 \text{ t} \times 60 \frac{\text{Nm}^3}{\text{t}} = 9000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ou 150 Nm³ d'oxygène.

Toutefois, si l'on observe que la durée du soufflage proprement dit n'est

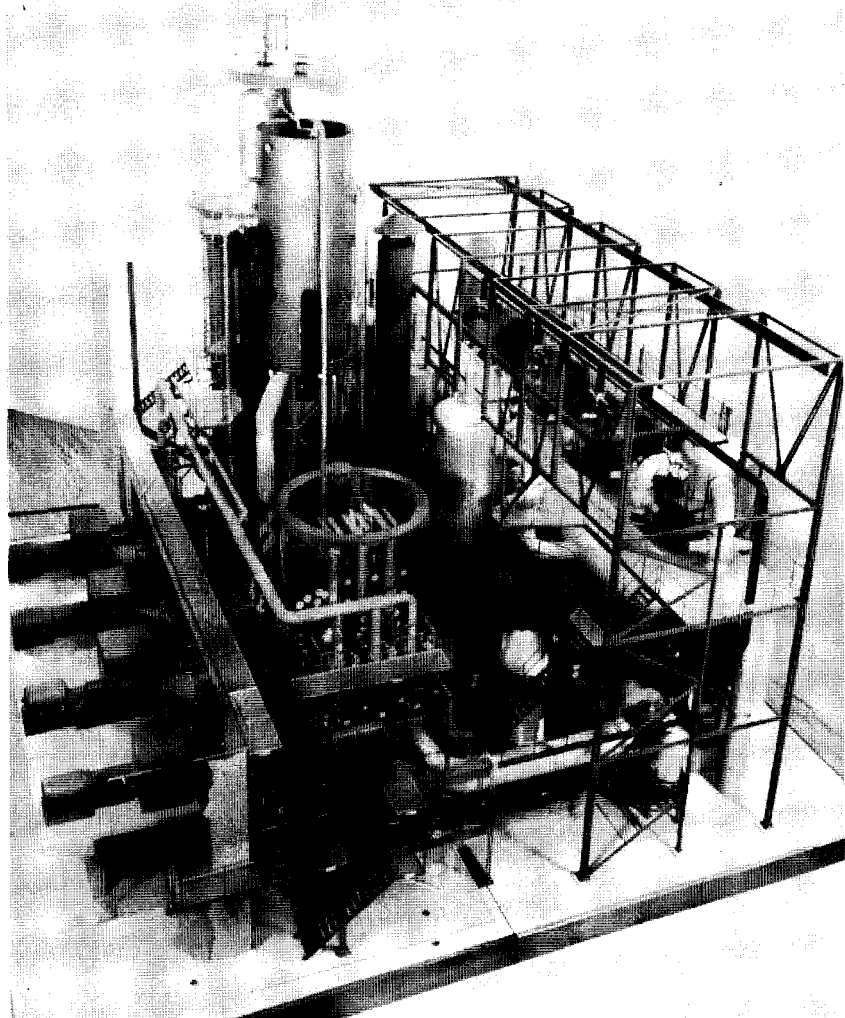


Figure 6: Photo d'une maquette d'appareillage séparateur. A gauche, quatre turbines de détente; au centre, à l'arrière-plan, colonnes de fractionnement principale et secondaire; à droite, quatre régénérateurs; devant, au centre, trois autres régénérateurs.

que d'environ 16 minutes, il en résulte que la demande de pointe effective est de 560 Nm³/m. Pendant 44 minutes, l'oxygène n'est pas utilisé.

Par conséquent, pour obtenir, d'une part, que l'installation de production d'oxygène soit exploitée de façon à peu près régulière et assurer, d'autre part, les consommations de pointe de l'aciérie, on monte sur la conduite tubulaire, entre les deux installations, un accumulateur d'oxygène gazeux.

Cette dernière installation comporte plusieurs récipients en acier qui prennent souvent la forme de réservoirs sphériques ou de hautes bouteilles cylindriques 9. Le volume d'accumulation peut se calculer d'après le volume géométrique des réservoirs et la différence de pression utilisable entre la pression de soutirage minimale et la pression de production maximale, qui est généralement d'environ 15 à 20 atm. L'installation d'accumulation doit être choisie suffisamment grande pour que, lors d'un incident dans l'alimentation en oxygène coïncidant avec de mauvaises conditions d'exploitation, un volume suffisant d'oxygène soit toujours en réserve pour qu'on puisse assurer le soufflage d'une coulée.

Les lieux d'édification possibles d'une installation d'oxygène et de la batterie d'accumulation ne sont pas rattachés directement à celui de l'aciérie. Il est possible de transporter l'oxygène gazeux sur plusieurs kilomètres de distance au moyen de conduites. En pratique, on procède même souvent de cette façon, par exemple, là où une usine sidérurgique ne dispose pas d'un terrain pour une installation d'oxygène proche de l'aciérie à oxygène, ou lorsque plusieurs aciéries sont desservies par une grande centrale d'oxygène.

Le risque de pollution de l'air atmosphérique, due aux gaz d'échappement industriels, peut également être la raison du choix de l'emplacement de l'installation d'oxygène à plusieurs kilomètres de l'aciérie. L'installation d'accumulation est établie, quand cela est possible, au voisinage de l'aciérie.

D'une façon générale, le transport de l'oxygène dans des canalisations tubulaires s'accompagne toujours de pertes de pression et, partant, de frais de compression supplémentaires; les dépenses de construction et d'entretien du réseau de conduites ne doivent pas non plus être négligées. C'est pourquoi se pose aussi une question de rentabilité pour les conduites à oxygène: jusqu'où peut-on en pousser le développement?

Quand plusieurs usines sidérurgiques, possédant aciéries à oxygène et installations d'oxygène, ne sont pas trop éloignées les unes des autres, une conduite combinée représente toujours un grand avantage.

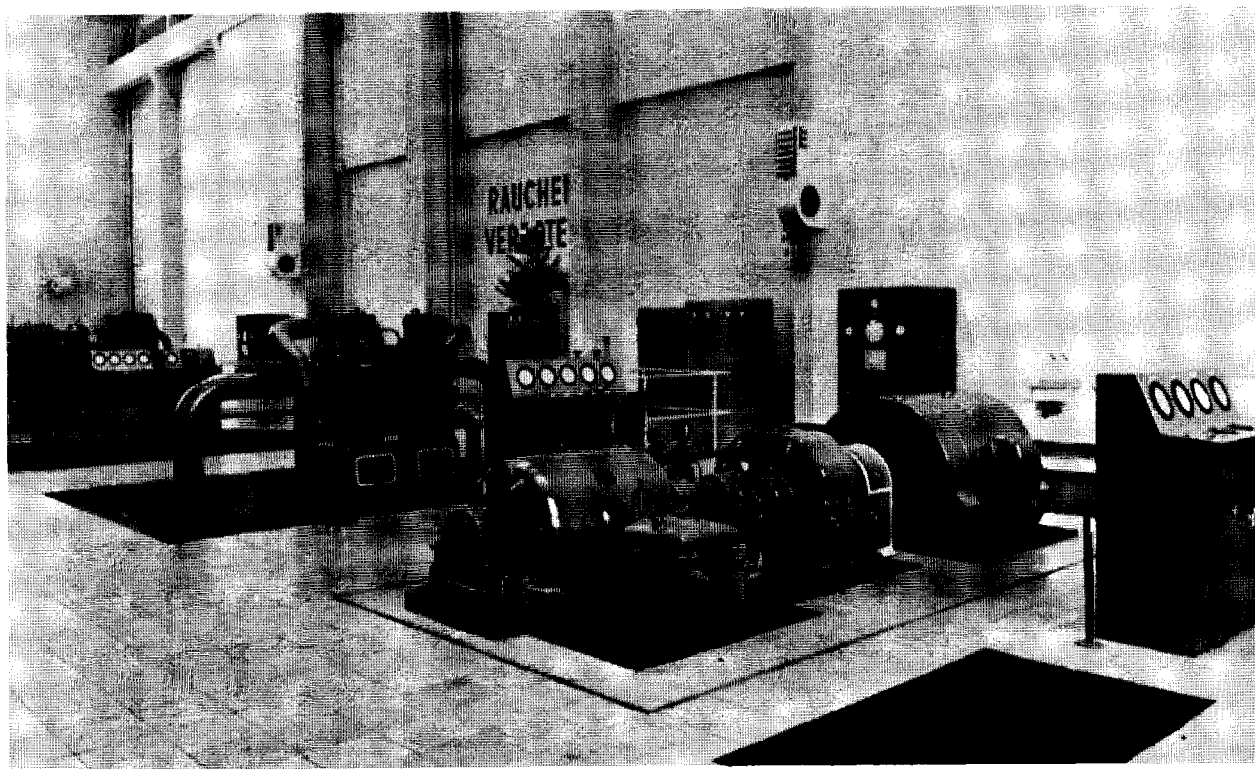


Figure 7: Vue intérieure de la salle des machines. Au premier plan, un turbocompresseur, à l'arrière-plan, compresseurs d'oxygène à piston.

En cas d'incident survenant à une unité productrice d'oxygène, les usines sidérurgiques peuvent se tirer d'affaire grâce aux capacités de réserve prévues dans chaque installation pour éviter, par exemple, l'arrêt de l'aciérie à oxygène, ou même de toute l'usine. L'interconnexion de plusieurs installations d'oxygène présente également un avantage économique résidant dans le fait que les différentes unités productrices peuvent marcher à un taux d'utilisation favorable.

4.1.2. Dangers de l'emploi de l'oxygène gazeux

Des précautions s'imposent dans l'emploi de l'oxygène, en raison des risques que comporte son utilisation. Il faut donc apporter une attention toute particulière aux mesures de sécurité. Ainsi ne doit-on pas employer l'oxygène gazeux pour enrichir l'air respirable, ni l'utiliser à l'état comprimé au lieu d'air comprimé, ni comme coussin de gaz.

Lors de la pose des canalisations et du montage de la robinetterie, toute une série de prescriptions particulières doivent être respectées.

Ne considérons d'abord que l'oxygène entre 1 et 40 atm. Il faut de toute nécessité éloigner l'huile et la graisse. Des traces d'huile peuvent suffire en effet à provoquer un incendie ou une explosion. Un vêtement imprégné d'oxygène doit être changé ou aéré suffisamment, avant de s'approcher d'un feu découvert. Il ne peut pas y avoir de corps étrangers à l'intérieur des tuyaux et robinetteries.

Les canalisations doivent être, autant que possible, établies au moyen de tuyaux en cuivre ou en acier résistant à la rouille, afin de pouvoir obtenir un degré plus élevé de propreté (absence de rouille). Une limitation de la vitesse d'écoulement n'est alors nécessaire qu'en raison de la perte de pression qu'entraînent les vitesses très élevées.

Si l'on installe une tuyauterie d'acier résistant à la rouille, il faut observer des mesures de précaution particulières. On ne doit employer qu'un matériau muni d'un certificat d'essai. Les tuyaux doivent être décapés et neutralisés intérieurement et certaines vitesses d'écoulement doivent être respectées.

Revenons à l'exemple des accumulateurs d'oxygène et supposons qu'il faille installer entre les accumulateurs et l'aciérie à oxygène une conduite d'acier dans laquelle il est possible de faire passer 9000 Nm³ de O₂ en 16 minutes pour un convertisseur. Avec une pression de marche de 30 atm., un diamètre de conduite de 125 mm serait nécessaire. Mais, comme la pression de l'oxygène peut tomber à 15 atm. il faut prévoir une conduite d'un

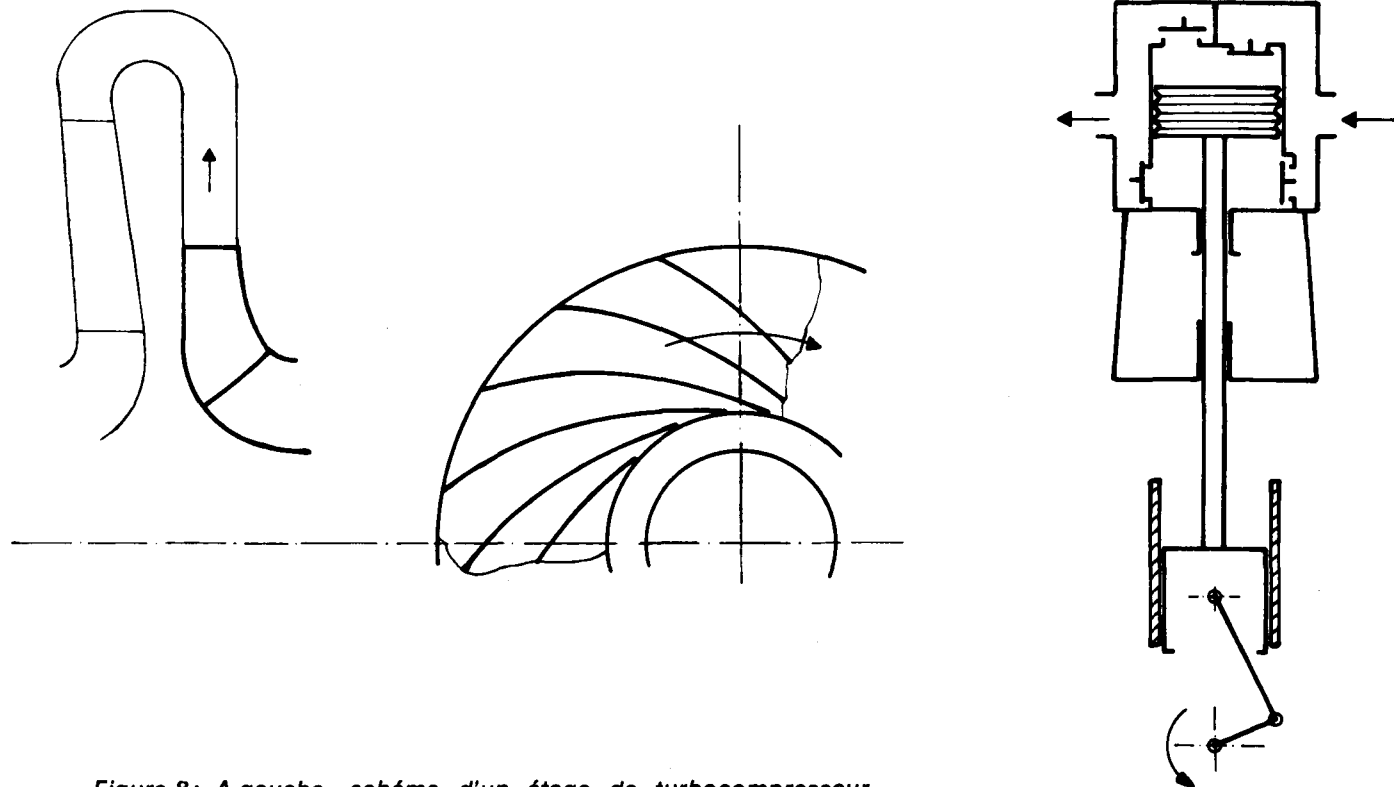


Figure 8: A gauche, schéma d'un étage de turbocompresseur, (coupes longitudinale et transversale), à droite, schéma d'un compresseur d'oxygène à piston à un étage.

diamètre intérieur de 200 mm. Or, il peut arriver que les périodes de soufflage de deux convertisseurs chevauchent et que la quantité d'oxygène à faire passer à ce moment se trouve ainsi doublée. En pareil cas, une conduite d'un diamètre nominal de 250 mm devient nécessaire, et nous nous trouvons alors à la limite de la vitesse d'écoulement admissible de 25 m/s.

Les courbures des tuyaux d'acier doivent avoir un rayon minimal de 5 fois le diamètre extérieur du tuyau. Pour les longues conduites d'acier, il est conseillé d'intercaler des tronçons en cuivre. En effet, si une canalisation d'acier débitant de l'oxygène prend feu, elle se consume comme une torche en sens contraire de l'écoulement et cela tant que l'oxygène gazeux s'écoule à grand débit. Si le feu arrive à un tronçon de cuivre, il ne peut plus se propager. Une partie du tuyau de cuivre fond, mais le feu est arrêté et ne peut pas s'attaquer au tuyau d'acier derrière le tronçon de cuivre. Les matériaux d'étanchéité doivent autant que possible être métalliques (plomb, cuivre). Les matériaux d'étanchéité combustibles qui sont en contact avec l'acier ne peuvent être employés qu'en respectant certaines conditions préalables.

Avec des pressions dépassant 40 atm. ou des vitesses d'écoulement dans les organes d'arrêt supérieures à 25 m/s, les surfaces en contact avec l'oxygène doivent être en cuivre, en bronze, en laiton ou en acier inoxydable approprié.

Les givrages des conduites amenant l'oxygène aux réservoirs et agrégats ne doivent pas être éliminés à la flamme ou avec des objets incandescents mais seulement avec de l'air chaud, de l'eau chaude, de la vapeur ou autres moyens de même ordre, qui doivent être exempts d'huile.

4.2. LES PROCÉDÉS AU CONVERTISSEUR À SOUFFLAGE D'OXYGÈNE PAR LE HAUT

Parmi les procédés au convertisseur à soufflage d'oxygène par le haut énumérés au chapitre 4.1.1., ce sont surtout le procédé LD, le procédé LD-Pompey, le procédé OLP, le procédé LDAC et le procédé dit Kaldo qui sont employés à l'échelle industrielle.

Les chapitres suivants décrivent plus en détail les installations industrielles, les matières premières, les réactions métallurgiques ainsi que l'application de ces procédés et les caractéristiques de qualité des aciers ainsi produits.

4.2.1. Installations

Les installations d'une aciérie à l'oxygène à convertisseur soufflé par le haut correspondent à celles d'une aciérie traditionnelle Martin ou Thomas.

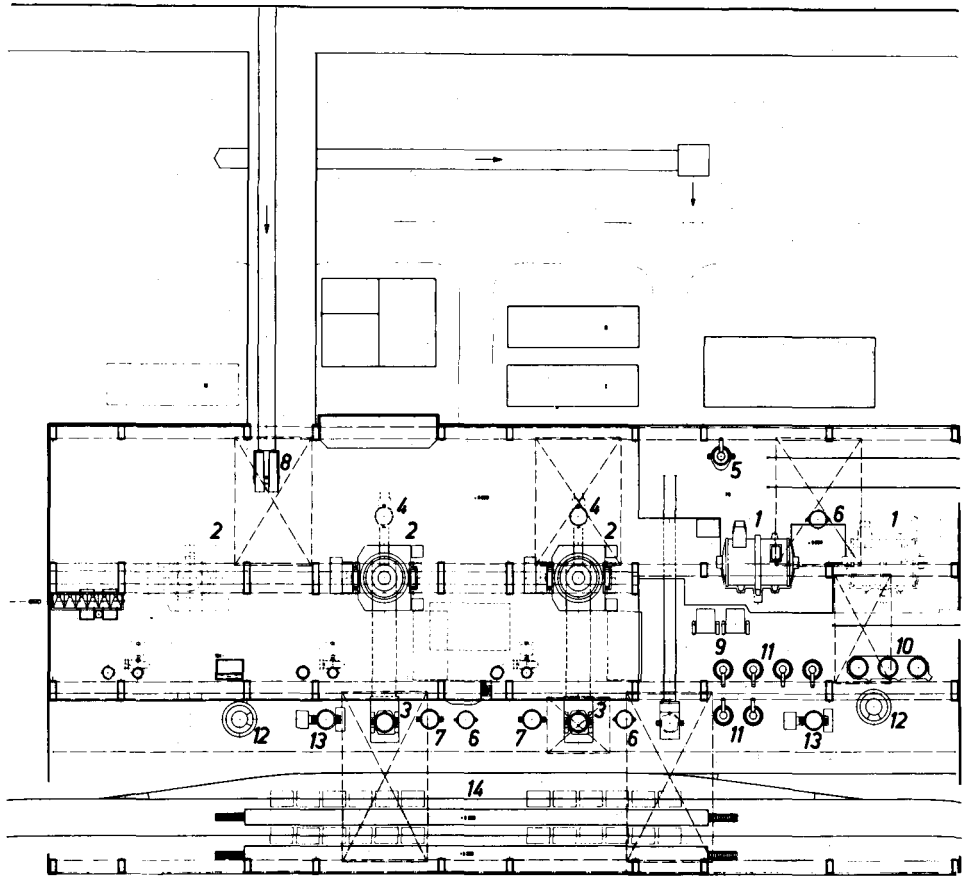


Figure 9 : Vue en plan d'une aciérie à trois creusets de 120 t.

Production annuelle 1,3 million de tonnes

1 = mélangeurs de fonte, 2 = creusets à oxygène,

I, II, III, 3 = chariots de transfert des poches de coulée,

4 = chariots pour cuves à scories, 5 = poches à fonte, 6 = cuve à

scorie, 7 = poches de coulée d'acier, 8 = augets à ferraille,

9 = poste de nettoyage des poches, 10 = maçonnerie des poches,

11 = séchage des poches, 12 = étuve à quenouilles, 13 = culbuteurs

de poches, 14 = chantiers de coulée.

Il ne s'y ajoute, à proprement parler, que le dispositif des lances, l'installation de dépoussiérage et la centrale de préparation des eaux.

Le mode d'exploitation ou l'écoulement des produits déterminent la disposition des installations principales et auxiliaires.

La halle des mélangeurs, la halle des creusets, l'installation de dépoussiérage et la halle de coulée ainsi que la halle de démoulage font partie des installations principales (*figures 9 et 10*).

Les installations auxiliaires comprennent le parc à ferrailles, le parc aux désoxydants et éléments d'alliage, les silos de stockage et les installations de reprise des matières d'addition, le parc à scories, le casse-fonte et, pour autant qu'on obtienne une scorie phosphoreuse, un moulin à scories.

Dans la *halle des mélangeurs* se trouvent les mélangeurs de fonte liquide, connus depuis de nombreuses décennies, qui sont nécessaires lorsque le transport de la fonte des hauts fourneaux s'effectue dans des poches ordinaires. Les mélangeurs offrent l'avantage de régulariser les variations d'analyse et de température de la fonte.

Au cours des dernières années, on a eu très souvent recours aux poches torpilles qui peuvent contenir une quantité beaucoup plus importante de fonte que les poches ordinaires. Le contenu de ces poches torpilles est transvasé directement dans les poches à fonte de l'aciérie.

Dans la *halle des convertisseurs* se trouvent les convertisseurs avec les lances à oxygène, les postes de commande et, le cas échéant, le poste central de commande pour la conduite de l'élaboration. On y voit, en outre, les dispositifs de chargement de la fonte et de la ferraille, les fondants et additions, pour l'évacuation des scories et pour le maçonnage des convertisseurs, les chariots porte-lance auxquels les lances de soufflage sont suspendues. Au-dessus des convertisseurs se trouvent les trémies à chaux, minerais, fondants, etc...

Cornues (creusets ou convertisseurs)

Le nombre et la dimension des convertisseurs sont fixés en se basant sur la production annuelle désirée. Une aciérie à l'oxygène disposant de 2 creusets installés peut assurer une production continue à 1 creuset; avec 3 installés, on peut en maintenir 2 en service. Par ailleurs, en fonte hématite, 1 creuset en service continu peut faire 10 000 à 12 000 coulées par an; en fonte phosphoreuse, on peut compter sur 8 000 à 9 000. Une partie des installations reste à l'arrêt, hors production, lors du garnissage en produits réfractaires. Parfois, pour tirer un parti optimal des appareils installés, on

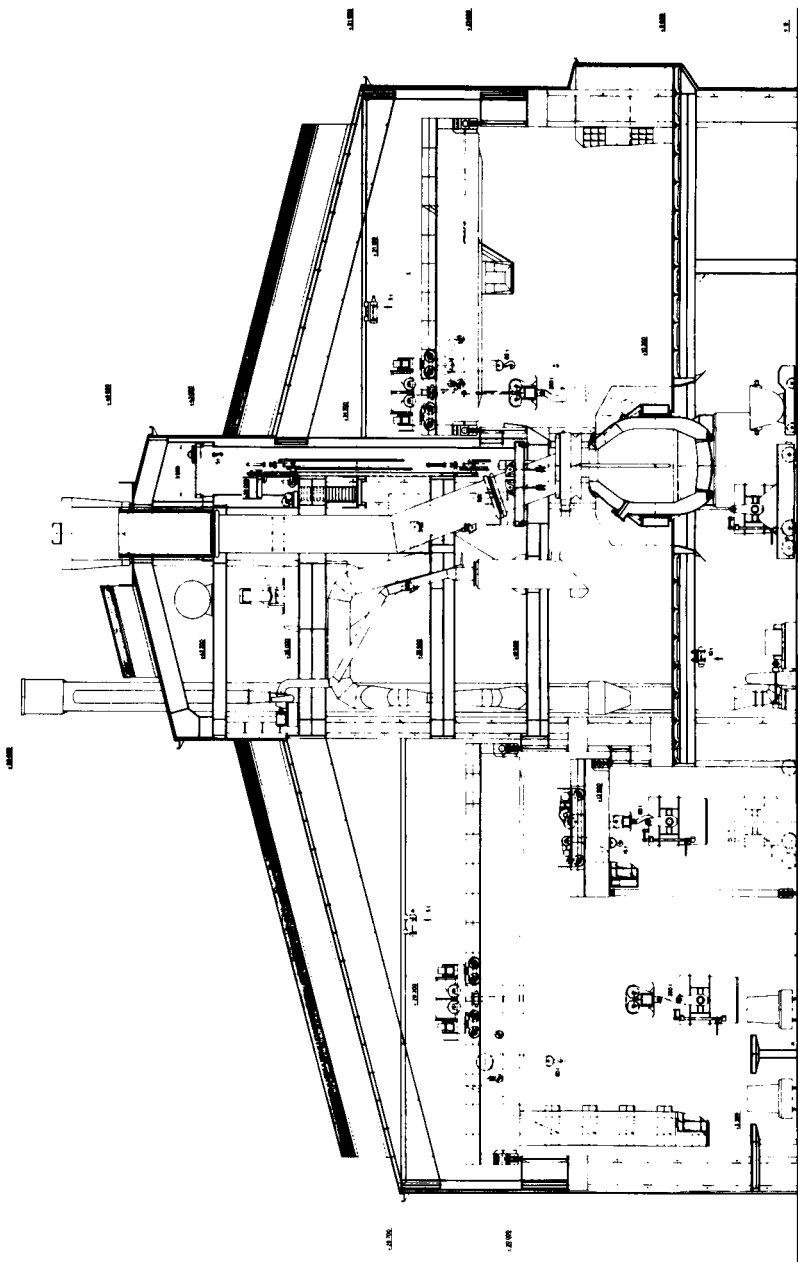


Figure 10 : Vue en coupe de l'aciérie d'après la figure 9.

peut assurer l'exploitation avec des cornues permutables. On dispose alors d'installations qui permettent de retirer la cuirasse dont la maçonnerie est usée hors de ses paliers et de l'emmener à un poste de maçonnerie; puis de monter à sa place dans les supports un convertisseur fraîchement maçonné.

Le niveau du bain dans le convertisseur ainsi que la chambre de réaction libre au-dessus de la surface du bain par rapport au diamètre de la cornue déterminent la forme optimale de la carcasse du convertisseur. Sont déterminantes également, les surfaces ou hauteurs du bain de métal et de la scorie en position de décrassage, en vue de ce que, surtout lorsqu'on souffle de la fonte phosphoreuse, la rephosphoration soit maintenue aussi minime que possible. Il est, en outre, tenu compte des conditions d'introduction de l'air au bec du convertisseur pour réduire une absorption nuisible d'azote, c'est-à-dire l'augmentation de la teneur du bain en azote, et pour une plus grande durabilité du bec du convertisseur soumis à rude épreuve.

Les données de construction de quelques convertisseurs sont reproduites ci-dessous :

	<i>Fonte hématite</i>				<i>Fonte Thomas</i>			
	A	B	C	D	E	F	G	H
Capacité nominale en t	160	200	270	70	80	115	150	150
Volume m ³	126	150	213	71	69	126	128	150
Volume spéc. m ³ /t	0,781	0,750	0,774	1,1	0,985	1,1	0,85	1,0
Hauteur extérieure m	8,445	10,000	9,233	8,4	7,83	8,945	9,230	9,000
Diamètre extérieur m	6,93	7,289	8,84	5,6	5,9	7,200	7,260	7,350

La figure 11 montre des exemples des différentes formes de convertisseurs possibles.

Le basculement du convertisseur dans les différentes positions, par exemple pour le chargement, le soufflage, le décrassage et le prélèvement d'échantillons, ainsi que pour la coulée, basculement qui doit être possible à 360° dans les deux sens dans une bonne exploitation, se fait au moyen d'un groupe de commande attaquant une grande roue solidaire de la ceinture du convertisseur.

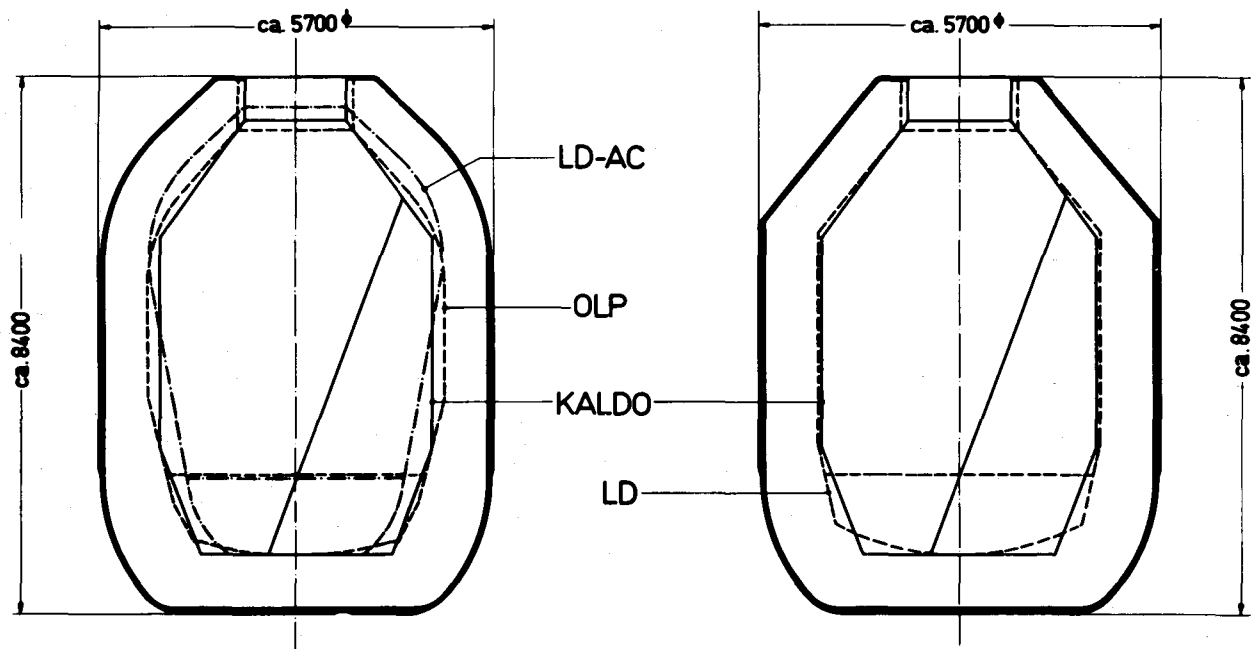


Figure 11 : Formes de convertisseurs, pour le procédé à l'oxygène, pour l'affinage des fontes phosphoreuses (à gauche) et non phosphoreuses (à droite)

Ces éléments essentiels revêtent une grande importance lors de la construction et deux réalisations sont possibles :

- a) Construction dite «à ceinture indépendante» (*figure 12*). Celle-ci encercle la cuirasse et peut être construite selon différents modes, à savoir : en acier moulé ou encore, en construction soudée. La liaison entre cuirasse et ceinture est assurée ici par des chaises soudées sur la cuirasse du creuset et s'emboîtant dans des clames rapportées sur la ceinture. Les dilatations thermiques radiales et axiales qui interviennent pendant la marche sont absorbées avec sûreté par ce mode de fixation.
- b) Construction dite «à ceinture incorporée» (*figure 13*). Dans celle-ci, l'élément de support construit est soudé à la carcasse. Il consiste en deux robustes tôles profilées annulaires entourant la carcasse. A ces anneaux sont soudées des flasques sur lesquelles les tourillons porteurs sont, par exemple, vissés. Une installation de ce type a été construite dans une aciérie à oxygène japonaise.

Quel que soit le mode de construction adopté, les convertisseurs de grande capacité, surtout en fonte Thomas, sont soumis à deux sollicitations thermo-mécaniques très importantes, dues aux causes suivantes, par exemple :

- rayonnement de la hotte d'évacuation des gaz,
- débordements de scories,
- chauffage dissymétrique,
- rayonnement des scories et de l'acier évacué (lors du décrassage et de la coulée).

Ces fortes influences de la température, qui se font notamment sentir sur les parties supérieures du convertisseur, peuvent être compensées ou atténuées par les contre-mesures suivantes :

- refroidissement du bec à l'eau;
- revêtements protecteurs;
- refroidissement des tourillons porteurs.

A la différence des cornues Thomas, la quasi-totalité des creusets à l'oxygène est de forme symétrique. Ce tracé présente l'intérêt de pouvoir charger la fonte et la ferraille de deux côtés différents, ce qui permet de simplifier les circuits de matières.

Eu égard à la capacité des creusets à l'oxygène, la commande par pignon et crémaillère mue par pression hydraulique, classique en aciérie Thomas, devient insuffisante et on utilise des systèmes électromécaniques comportant un ou plusieurs moteurs électriques, des réducteurs de vitesse et

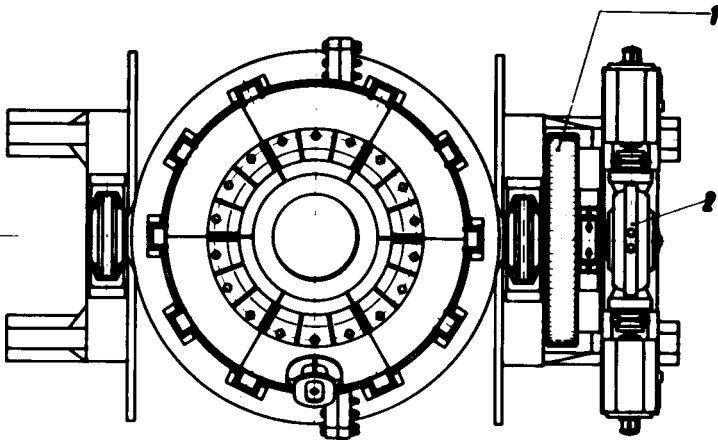
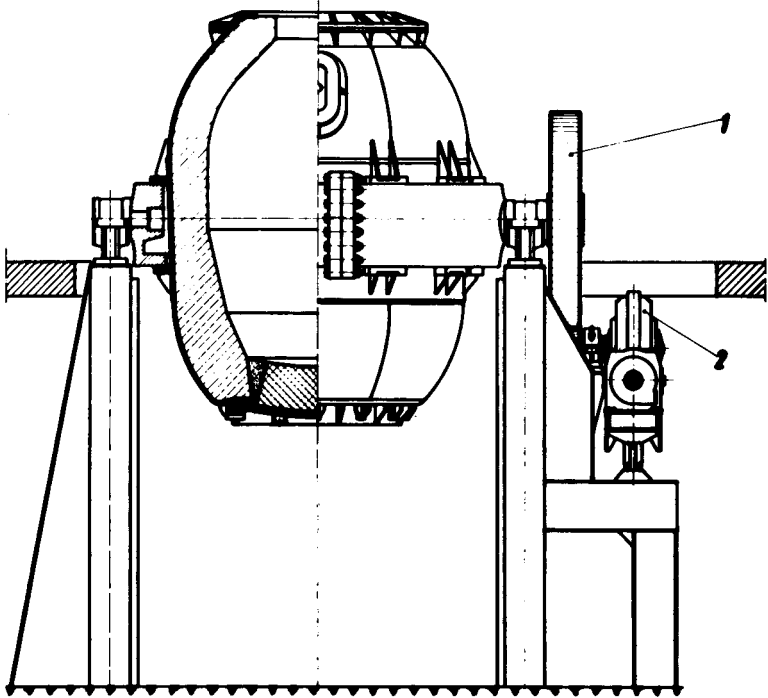


Figure 12 : Convertisseur à oxygène de 70 t avec ceinture indépendante.

1 = grande roue, 2 = réducteur de vitesse avec pignon d'attaque.

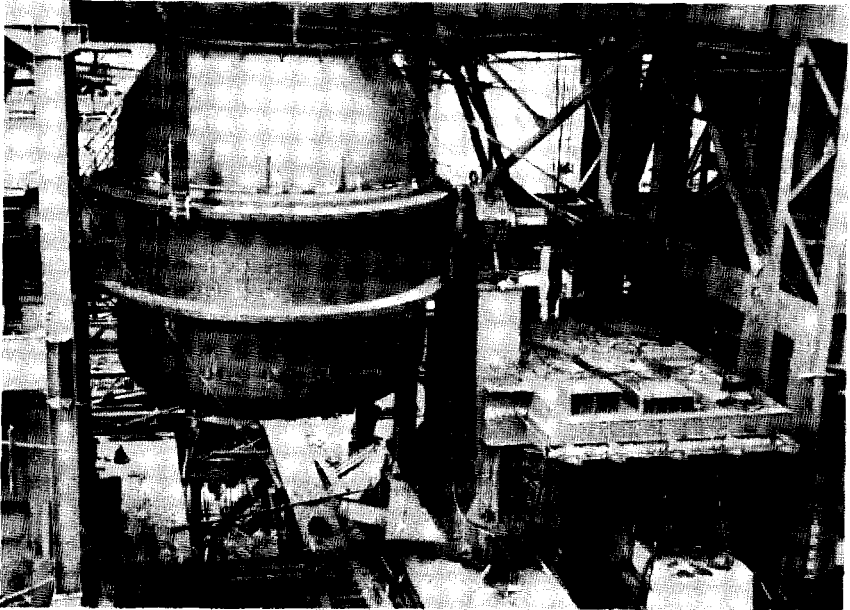


Figure 13 : Convertisseur à oxygène à ceinture incorporée en cours de montage dans une aciérie japonaise.

des couples d'engrenages attaquant la grande roue (ou roue d'entraînement) fixée sur le tourillon moteur du creuset.

Les différentes solutions ressortissent aux types suivants :

- a) Commandes avec pignons ancrés au socle. La *figure 12* présente cette version dans laquelle la grande roue (1), fixée au tourillon de commande, est entraînée par un réducteur (2) par l'intermédiaire d'un pignon ancré au socle. Toutefois, étant donné que des déviations axiales (désalignements) du tourillon porteur peuvent se produire en cas de sollicitation excessive, il y a lieu de prévoir de préférence un plus gros module pour la grande roue et le pignon. Ce genre de commandes fonctionne depuis des années.
- b) La *figure 14* présente une autre solution. Le réducteur (1) est couplé avec les tourillons de commande, directement, par un accouplement à

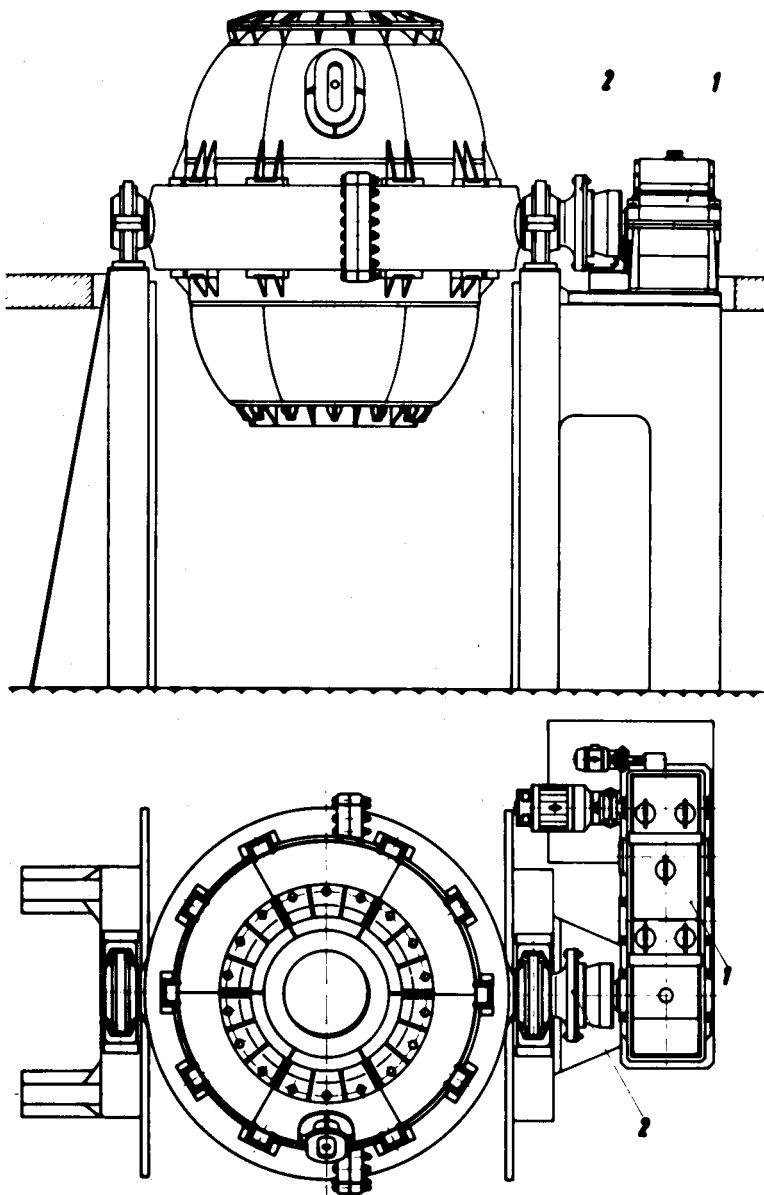


Figure 14 : Commande de basculement de convertisseur à oxygène comportant :
 1 = réducteur de vitesse, 2 = double accouplement à denture courbe.
 Le réducteur de vitesse est relié directement au tourillon par l'accouplement à denture courbe.

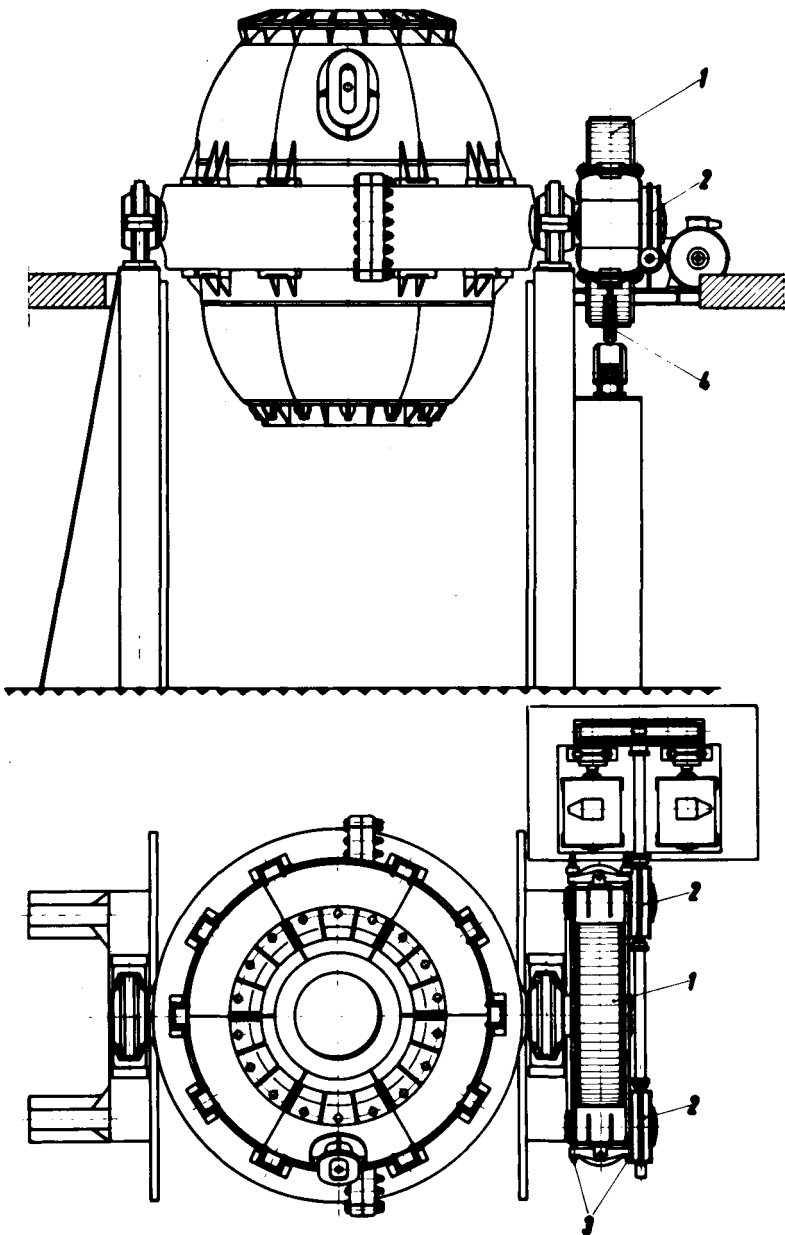
dents courbes (2). Une roue principale est ici inutile. Les déviations axiales (désalignements) du tourillon porteur sont absorbées par l'engrenage à denture courbe.

- c) A la roue principale (1) s'appuient ce qu'on appelle deux chariots à pignons avec démultiplicateurs (2), ainsi que le représente la *figure 15*. Les forces centripètes sont absorbées par des tirants (3), les forces normales par les appuis de couple (4). Au moyen de ceux-ci la pression sur dents des deux pignons est équilibrée. Les pignons suivent les déviations axiales intervenant en marche, grâce au guidage du chariot à pignons de la grande roue.
- d) Il existe une nouvelle version, composée d'une commande d'accouplement fixée sur le tourillon porteur et tout à fait hermétique comme on peut le voir sur la *figure 16*. L'ensemble de la commande étant flottant sur le tourillon du convertisseur, il peut suivre les déviations axiales éventuelles. Le couple à transmettre peut être réparti sur plusieurs pignons; ces derniers sont alors commandés par des roues à denture hélicoïdale double qui s'engrènent avec une roue dentée à déplacement axial. Le moment de réaction global, qui résulte de la différence entre les couples d'entraînement et les couples de sortie, est transmis à la fondation par l'intermédiaire d'un tirant articulé qui dispose d'une liberté de mouvement suffisante grâce à des articulations à rotule.

On peut utiliser, pour la commande, des moteurs à courant alternatif ou continu. Avec le courant continu, la vitesse se règle progressivement. Pour obtenir une graduation également avec le courant alternatif, on intercale entre le mécanisme de transmission et le convertisseur un second moteur de plus faible puissance et un engrenage épicycloïdal. Un autre mode de réglage de vitesse avec le courant alternatif est la conduite du moteur par transducteurs dans le circuit du rotor.

Lances de soufflage

Une attention particulière doit être accordée aux lances (*figure 17*). Elles servent au soufflage de l'oxygène pur ou du mélange chaud en poudre-oxygène à la surface du bain. Elles sont pourvues de buses de forme spéciale qui doivent être adaptées exactement aux conditions métallurgiques de chaque procédé. Outre les gicleurs à un trou employés jusqu'à présent, apparaissent, ces temps derniers, les gicleurs à plusieurs trous avec lesquels, à la place d'une busette centrale, plusieurs (soit trois ou quatre) ouvertures de sortie divergentes sont aménagées pour l'oxygène d'affinage.



igure 15 : La commande de basculement du convertisseur à oxygène comporte :
 1 = grande roue, 2 = deux bogies à pignon avec réducteur de vitesse,
 3 = tirants, 4 = tirants articulés.

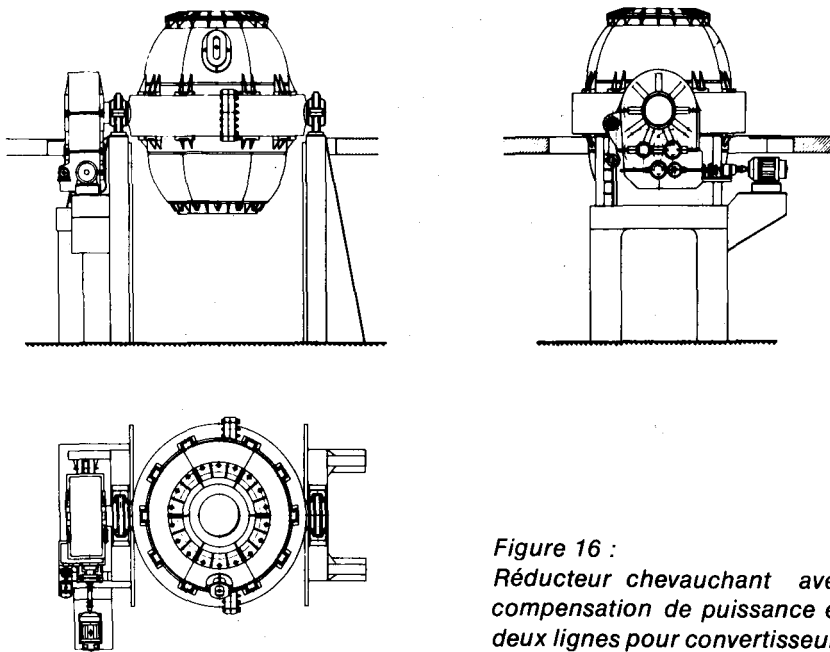


Figure 16 :
Réducteur chevachant avec
compensation de puissance en
deux lignes pour convertisseurs.

Leur mise en œuvre conduit à des améliorations de la technique du soufflage qui se traduisent surtout par un rendement plus élevé en acier et une longévité prolongée de la maçonnerie réfractaire, etc.

Une autre amélioration réside dans l'emploi de lances dites à «double-flux» ou à «turbulence réglable», comportant une arrivée d'oxygène primaire dans l'axe de la lance et une arrivée d'oxygène secondaire annulaire. On peut régler indépendamment, entre certaines limites, mais pendant le cours du soufflage, les débits d'oxygène primaire et secondaire et modifier ainsi, suivant les nécessités de l'affinage, la dynamique du jet.

Les problèmes de technique de fabrication et de refroidissement doivent être pris en considération pour obtenir une bonne tenue des lances aux températures élevées du creuset. Les tubes sont aménagés de telle façon que les dilatations longitudinales des différents tubes puissent se compenser. Le tube amenant la chaux en poudre et l'oxygène doit être construit

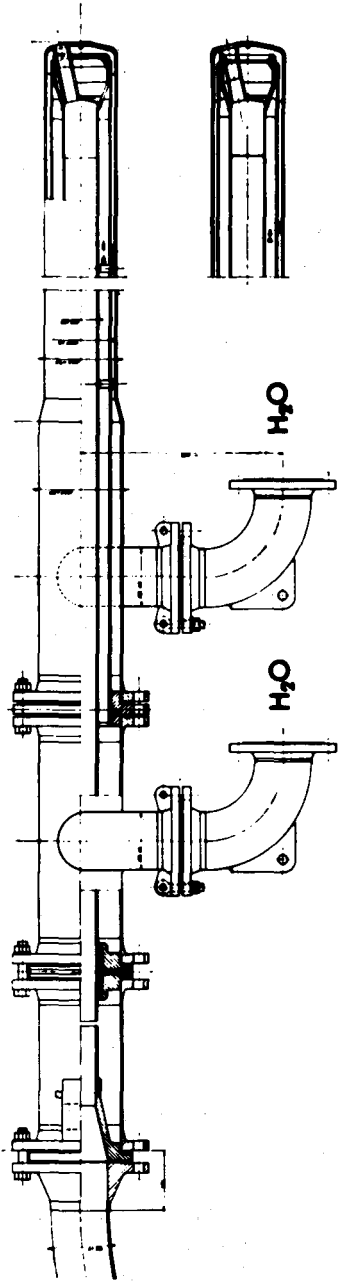


Figure 17 : Lance de soufflage d'oxygène avec buse à trois trous.

en acier inoxydable au chrome-nickel et les buses en cuivre de haute qualité. Quant aux formes extrêmement compliquées du nez des buses, il convient d'éviter le plus possible les pièces à soudures délicates qui peuvent être une source de perturbations, et de les remplacer partiellement ou totalement par des pièces forgées. Lors du refroidissement, surtout de la tête, il faut veiller par des mesures appropriées à ce que toutes les parties particulièrement exposées soient parfaitement irriguées par l'eau de refroidissement. En tout état de cause, il faudra veiller à obtenir des vitesses suffisantes du réfrigérant.

La *commande des déplacements des lances (figure 18)* doit permettre de réaliser le positionnement et le déplacement des lances de soufflage (1). Elle comprend le mécanisme de commande de montée et de descente (2) qui doit être construit de telle façon qu'en cas de panne d'une lance, une autre lance puisse être mise en service sans attente prolongée.

L'amenée de l'oxygène et éventuellement de la chaux en poudre se fait soit par des conduites flexibles (3), soit par des tubes articulés.

Chaque creuset est équipé de deux lances prêtes à l'emploi, qui sont reliées à la conduite d'oxygène ou d'oxygène-chaux en poudre et aux circuits de refroidissement.

Les mouvements des lances sont verrouillés avec le mouvement du creuset, l'oxygène et la circulation d'eau de refroidissement. Une descente indésirable de la lance, lors d'une panne d'eau par exemple, est de ce fait exclue.

Les lances sont fixées chacune à un chariot à lances (4). Le chariot est manœuvré verticalement par une chaîne ou un câble pour les mouvements de montée et de descente, au moyen d'un treuil à lances et est guidé dans une cage (5); celle-ci peut être déplacée horizontalement à l'aide d'un dispositif de translation (6) de telle sorte que chacune des deux lances puisse être amenée dans l'axe du creuset.

En cas de panne de courant, la lance peut être retirée du convertisseur au moyen d'un contrepoids et, pour ce faire, il suffit de desserrer les freins.

S'il n'existe pas de contrepoids, le moteur du treuil de la lance peut être alimenté par une source de courant auxiliaire, une batterie par exemple.

Pour plus de sécurité, des dispositifs d'arrêt sont parfois montés sur les chariots à lances qui, lors d'une rupture ou d'une «prise de mou» du câble (calage des chariots de lances), empêchent la chute des lances.

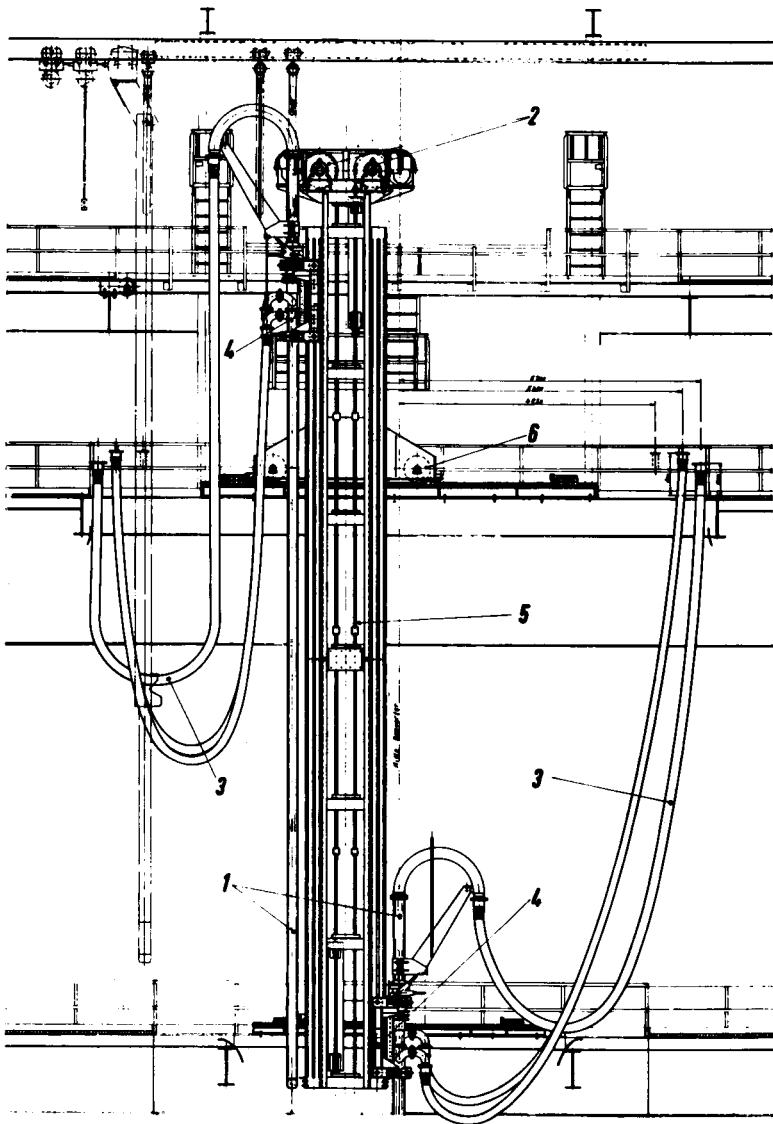


Figure 18 : Installation des lances pour un convertisseur à oxygène.
 1 = lances de soufflage, 2 = commande de levage et de descente,
 3 = flexibles à oxygène, 4 = chariot porte-lance, 5 = cage des
 lances, 6 = mécanisme de déplacement horizontal.

En raison de leur longueur d'environ 15 à 20 m, les lances sont difficiles à transporter horizontalement; c'est la raison pour laquelle on tend à les transporter suspendues en position verticale.

Si l'on voulait évacuer les lances transversalement au sens de la halle, il faudrait les élever assez haut pour pouvoir les passer au-dessus du toit de la halle voisine.

Pour éviter les grandes hauteurs d'installation, on peut prévoir, par exemple, un dispositif de transport de lances dans le sens longitudinal de la halle. Il n'est plus alors nécessaire que d'élever la lance au-dessus de la hotte de captation de gaz (*figure 19*).

Pour réduire le nombre de lances à évacuer, il est bon d'effectuer les réparations mineures dans un atelier à lances à l'intérieur de l'aciérie.

Chargement du convertisseur

Pour l'amenée de la fonte et des ferrailles, on installe des ponts roulants et des engins de chargement spéciaux. Les temps de chargement de plusieurs convertisseurs peuvent interférer en partie, c'est pourquoi l'amenée des matériaux de charge principaux, tels que les ferrailles et la fonte dans la halle, s'effectue en général perpendiculairement à la ligne des convertisseurs.

Lors de la disposition des mélangeurs à l'aciérie, on tient donc compte de l'emplacement du parc à ferrailles et inversement. L'amenée et le transport des additions se font indépendamment des ponts roulants.

L'enfournement dans les convertisseurs soufflés à l'oxygène, de charges solides telles que la ferraille, peut se faire à l'aide du pont roulant ou d'une chargeuse. L'adoption de l'une ou l'autre solution dépend du nombre et de la capacité des convertisseurs ainsi que de leur mode d'exploitation métallurgique.

Si l'enfournement doit comporter peu de ferrailles, le pont de chargement qui, outre le levage principal pour la poche de fonte, comporte un levage auxiliaire pour les augets à ferrailles, peut représenter une solution rapide et économique.

Si, au contraire, de grandes quantités de ferrailles doivent être chargées, souvent en plusieurs fois, et si, en outre, plusieurs convertisseurs doivent être desservis à intervalles rapprochés, il est plus avantageux d'employer une machine à charger indépendante du pont à fonte, avec laquelle on peut éviter complètement les temps d'attente résultant de ce que plusieurs

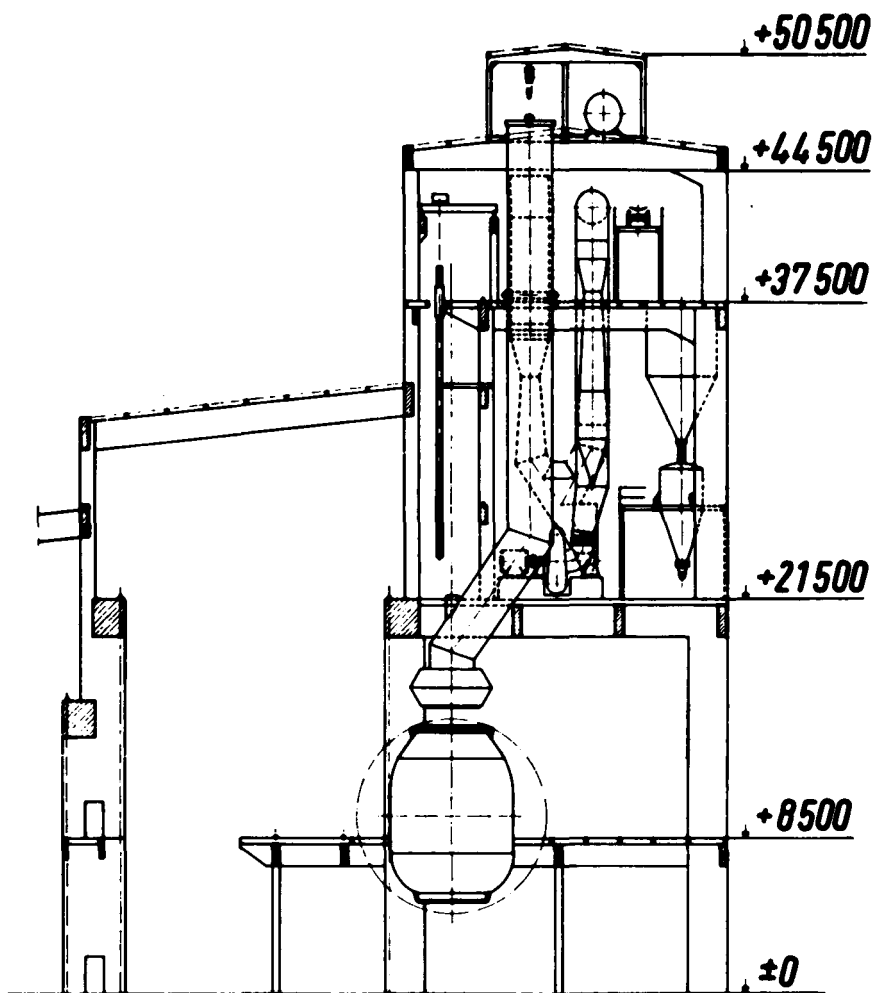


Figure 19: Halle des convertisseurs avec passage pour le transport des lances.

creusets auraient besoin du pont au même moment. La machine circule sur la plateforme de travail et peut, pour chaque charge, recevoir une ou plusieurs bennes (ou augets). Celles-ci sont déposées sur un châssis basculant, commandé hydrauliquement, et peuvent être vidées par basculement quand la machine est amenée devant le convertisseur.

Les commandes sont dimensionnées de telle sorte que les temps de déplacement ou de basculement soient très courts. Ainsi, par exemple, le temps de basculement d'un auget est d'environ 30 secondes pour le cycle complet.

Pour la rendre indépendante du réseau d'énergie ou pour éviter le déroulement sur la plate-forme des câbles d'alimentation, on peut équiper la machine de moteurs Diesel ou à essence. Cette commande, par moteur à combustion interne, peut attaquer directement ou par une génératrice la commande de déplacement ou de basculement.

La *figure 20* représente une machine à deux augets d'une capacité de 6 m³ chacun. Le poids total, y compris les augets chargés, s'élève à 76 t. La commande se fait par un moteur Diesel de 44 CV à 2 000 t/mn. Dans le cas qui nous occupe, le moteur commande directement l'appareillage de translation et l'installation hydraulique. La *figure 21* montre une autre machine à quatre augets de 10 m³ de capacité chacun; poids total 144 t, puissance 61 CV à 1 200 t/mn.

Il y a d'autres solutions possibles pour le chargement de la ferraille et qui méritent d'être signalées :

- La machine «Calderon»; un peu semblable à la précédente, elle en diffère toutefois en ce que l'auget à ferrailles y est disposé longitudinalement, sur un support basculant mû par commande électrique. L'angle de levée peut atteindre 60° et les ferrailles sont canalisées vers le bec du creuset, grâce à une goulotte fixe, coudée à 90°, d'un tracé spécial. Le fond comporte des gradins soigneusement profilés, de manière à éviter l'enchevêtrement des ferrailles et leur coincement.
- Le pont semi-portique à déplacement rapide, dont les chemins de roulement et, en conséquence, les déplacements, sont indépendants de ceux du pont à fonte.

Silos pour les additions

Les additions nécessaires à l'élaboration, comme la chaux, le minerai et les fondants, sont déversées dans des silos pouvant stocker la quantité utile pour 2 à 3 jours d'exploitation.

La quantité de matières d'addition, nécessaire au cours du soufflage, est soutirée aux trémies journalières qui sont disposées au dessus des creusets et qui ont une capacité de 1 à 2 postes.

On emploie, pour le transport des matériaux des silos de stockage aux trémies journalières, des bandes transporteuses ou des chaînes Heckel. Pour

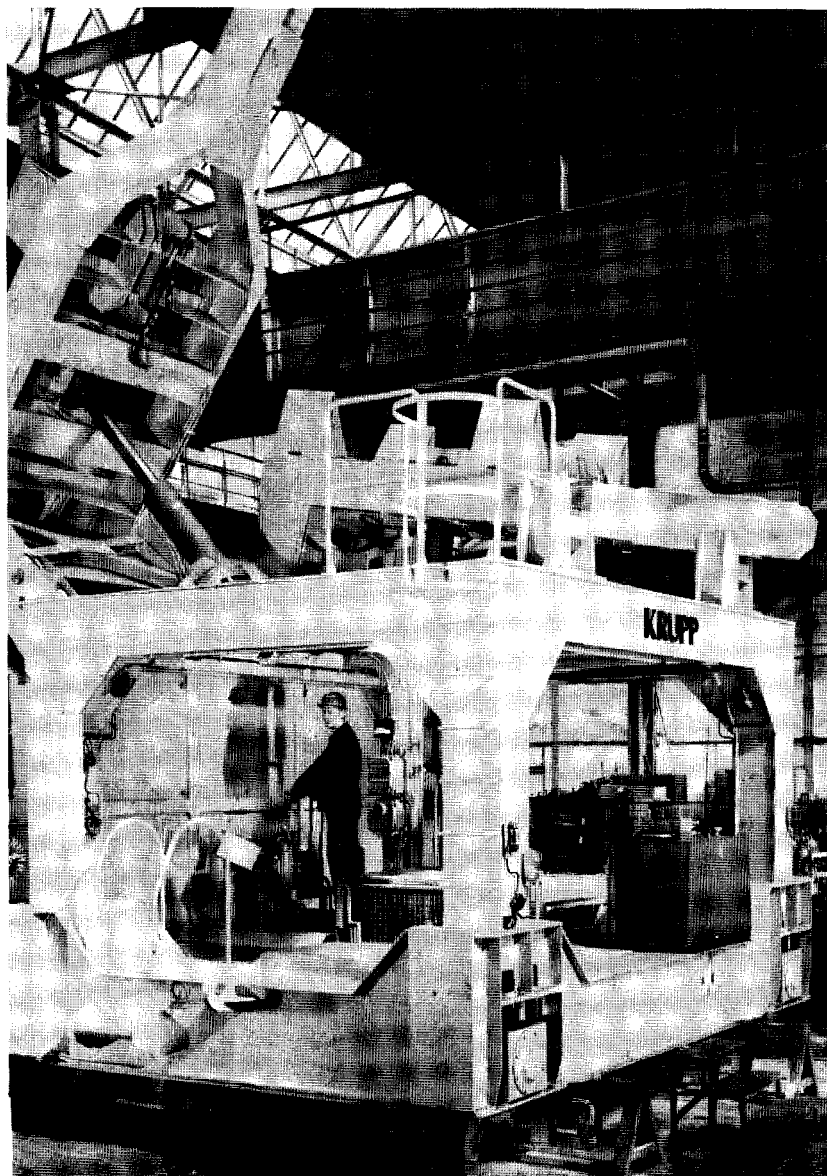


Figure 20 : Chargeuse à ferraille équipée de deux bennes (ou augets, ou cuillers) de 6 m³ de capacité chacune.

des raisons d'encombrement, on se sert encore de transporteurs à chaîne, inclinés ou verticaux. Aujourd'hui, ce transport s'effectue dans des cycles automatiques, à partir d'indicateurs de niveaux dans les trémies journalières.

Dans des installations modernes, on dispose, pour le soutirage dans les creusets, de trémies peseuses ou de bandes de dosage à bascule intégratrice. La *figure 22* fournit un schéma de transport des matières d'addition en aciérie.

Pour l'emploi de chaux en poudre, celle-ci est entreposée dans des silos remplis grâce à un circuit pneumatique. Le transport aux trémies journalières est également réalisé par voie pneumatique.

La construction du bâtiment est influencée par la disposition des trémies journalières au-dessus des creusets. On peut construire des installations dites «individuelles», c'est-à-dire, doter chaque convertisseur de trémies journalières et d'une installation de dosage, ou ne prévoir qu'autant d'installations qu'on peut mettre de convertisseurs en activité simultanément. Les installations de dosage sont alors reliées aux creusets qui se trouvent en exploitation.

Décrassage

Les cuves à scories, utilisées pour le décrassage, sont, soit amenées sur des wagons ferroviaires dans la halle de chargement, soit transportées dans une halle de transbordement et de refroidissement attenante à l'aciérie; elles y sont posées sur des véhicules à voie normale.

On peut également transporter directement les scories à l'état liquide, par des voies en épi reliant la halle des creusets à la voie ferrée menant au parc à scories.

On emploie en outre, aujourd'hui, des véhicules routiers spéciaux auto-levés, au moyen desquels on peut évacuer et basculer les bennes de scories.

Une autre possibilité consiste à laisser la scorie s'écouler sous le convertisseur et de la rendre, en peu de temps, chargeable et transportable en la mélangeant à des scories solides (procédé Colville).

Échafaudages de maçonnerie

L'échafaudage de maçonnerie sert au transport des palettes de briques, du sol au lieu de travail dans le convertisseur, et comporte une plate-forme de travail, sur laquelle les maçons peuvent travailler sans danger. Afin que la



Figure 21 : Chargeuse à ferraille à quatre bennes de 10 m³ de capacité chacune.

durée de l'arrêt du creuset soit brève, le dispositif doit permettre de travailler rapidement.

La *figure 23* représente un échafaudage de maçonnerie pour un creuset de 70 t pourvu d'un fond amovible. La charpente tubulaire consiste en trois parties qui sont assemblées lors du montage. La partie inférieure, avec supports d'équilibrage, porte la plateforme de travail (1), les treuils à main (2) pour le réglage de cette plateforme et la cage à palettes (3).

La plateforme de travail est construite de façon à pouvoir être agrandie par un dispositif à consoles (4). Elle est déplacée par un treuil à câble et est garantie contre les chutes vers le bas par des boulons de calage et par un dispositif d'arrêt à volet automatique.

La cage à palettes circule à l'intérieur de la charpente; elle est déplacée au moyen d'un palan électrique. On effectue également l'assemblage des différentes parties de la charpente, à l'aide de ce même palan électrique.

L'échafaudage une fois monté et élevé, on peut commencer le travail de maçonnerie. Un chariot élévateur introduit le plateau de briques d'un poids d'environ 1,5 tonne dans la cage à palettes. La cage est emmenée vers le haut, *figure 24*, la palette étant enlevée au moyen d'un petit chariot élévateur et amené au lieu de travail. Si la hauteur de travail de la plate-forme doit être modifiée, on retire les boulons de calage et on remonte la plate-forme à l'aide des deux treuils à main. Le poids de la charpente est d'environ 1,4 tonne, celui de la plateforme de travail installée d'environ 3 tonnes pour un diamètre de 4 200 mm.

On peut également construire des charpentes semblables pour des creusets à fond non amovible. Dans ce cas, la charpente est suspendue au pont de montage des lances.

Installation de captation et de dépoussiérage des gaz

Les exigences de plus en plus sévères des autorités publiques concernant l'épuration de l'air ont rendu pratiquement nécessaire, dans toutes les aciéries, la construction d'installations complètes de captation et de dépoussiérage des gaz (cf. chap. 4.4.).

Suivant le système «gaz de dégagement et dépoussiérage» choisi, on peut prévoir à l'aciérie des cheminées à gaz de dégagement, ou bien refroidies à l'eau ou bien refroidies en utilisant la chaleur d'évaporation, façonnées en semi-chaudières ou en chaudière complète, avec les pressions usuelles en chaudronnerie, ou bien construites avec double chemise de tôle pour évaporation à 100° C sous pression atmosphérique.

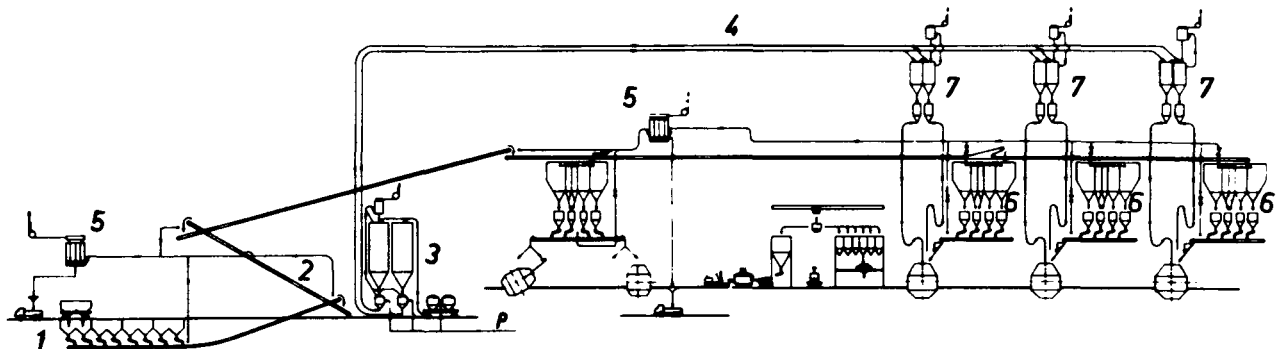


Figure 22 : Schéma de transport des additions.

1 = Installation de silos souterrains, 2 = reprise par bandes transporteuses, 3 = silos à chaux en poudre, 4 = conduite de transport pneumatique de chaux en poudre, 5 = filtre à air, 6 = installation de silos intermédiaires et de pesée, 7 = silos à chaux en poudre intermédiaires et installations de dosage, P = air comprimé.

Quand on emploie le procédé de dépoussiérage humide, la poussière, éliminée sous forme d'eau boueuse, est également, dans les ensembles situés à l'extérieur de l'aciérie, concentrée, filtrée, séchée et agglomérée suivant sa destination.

Halle de coulée et installations auxiliaires

Dans la halle de coulée, l'acier liquide est coulé de la façon traditionnelle, en lingots carrés ou en lingots méplats, ou bien en blooms ou en brames dans une installation de coulée continue. Une description plus détaillée de la halle de coulée d'une aciérie à oxygène est superflue, car ses installations sont les mêmes que celles des aciéries traditionnelles. Par contre, la coulée continue est décrite en détail dans le chapitre 4.6.

Les dispositifs des installations auxiliaires n'offrent pas de particularités comparativement aux aciéries traditionnelles, ce qui en rend inutile la description détaillée.

4.2.2. Matières premières

Pour les procédés à l'oxygène soufflé par le haut, on emploie en principe les mêmes matières premières que pour les procédés Bessemer, Thomas, Martin et pour le four électrique.

Les matières chargées sont la fonte et la ferraille. La formation des laitiers, la composition voulue du laitier ainsi que son état physique ou son degré de viscosité sont réglés par l'addition de chaux d'aciérie, de bauxite ou de spath-fluor.

Dans les matières d'addition figurent aussi les minerais de fer comme ap-porteurs d'oxygène, donc, comme agents d'affinage des impuretés indésirables contenues dans les matières chargées.

Enfin, citons encore brièvement les éléments d'alliage. Ils servent à la dés-oxxydation et au réglage de la composition des bains d'acier. Parmi eux se trouvent, pour la désoxydation, de nombreux alliages ferreux au manganèse, au silicium, ou mangané-siliceux et l'aluminium; en outre, pour la production d'aciers spéciaux, le cuivre, le ferro-molybdène, le ferro-nickel, le ferro-vanadium, etc.

Par quoi se différencient, en ce qui concerne le choix possible des matières premières, les différents procédés de fabrication d'acier et où se situe, le cas échéant, l'avantage du procédé à l'oxygène soufflé par en haut, du point de vue des matières premières ?

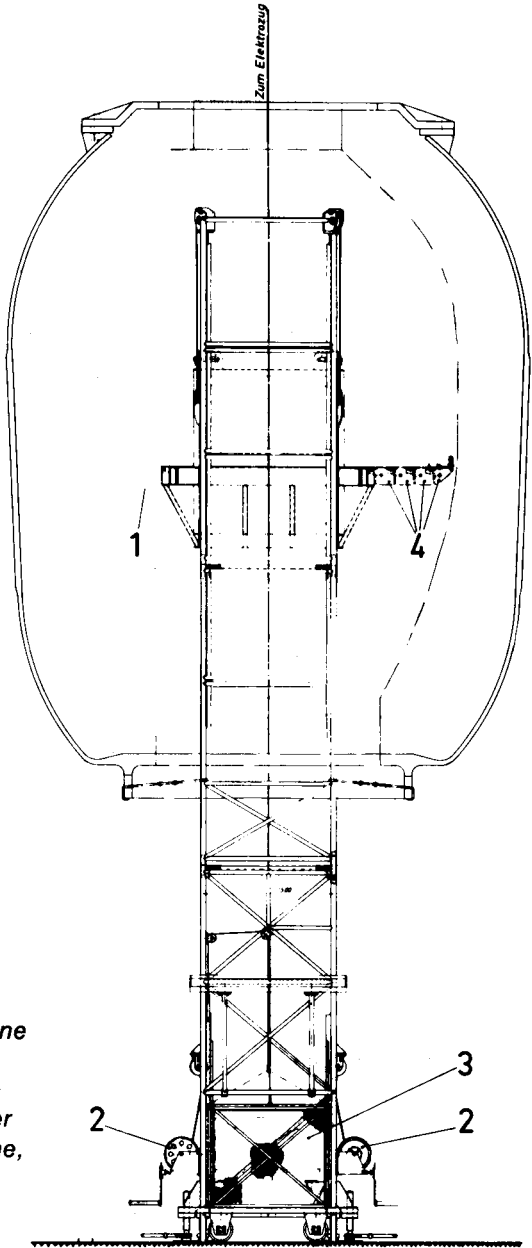


Figure 23:

Échafaudage de maçonnerie pour convertisseurs à l'oxygène à fond amovible.

- 1 = plateforme de travail,
- 2 = treuils à main pour monter et descendre la plate-forme,
- 3 = cage à palettes,
- 4 = consoles pour agrandir la plate-forme de travail.

Pour le procédé Thomas, on doit charger de la fonte liquide avec une teneur d'environ 1,8 à 2% de phosphore, des ferrailles et de la chaux. Avec du vent enrichi, on peut abaisser la teneur en phosphore de la fonte à environ 0,05% et même moins. Toujours avec du vent enrichi, on peut aussi souffler au convertisseur Thomas de la fonte — qualité four Martin —, donc plus pauvre en phosphore.

Dans le convertisseur Thomas, outre la fonte liquide, on charge comme nous l'avons dit des ferrailles. Toutefois, la charge possible en ferrailles est relativement modeste et est inférieure à 10% de la charge métallique totale. Même en enrichissant le vent de soufflage en oxygène, on ne peut atteindre, en moyenne, qu'à peine 20% de charge en ferrailles.

On ne peut ajouter les minerais de fer comme apporteurs d'oxygène (agents d'affinage) qu'en quantités relativement faibles car le dégagement de l'oxygène du fer, c'est-à-dire sa réduction, consomme beaucoup de chaleur. Mais la quantité de chaleur, nécessaire pour amener le bain à la température de coulée et pour l'accomplissement des réactions métallurgiques, y compris la formation du laitier, est limitée avec le procédé Thomas. Elle résulte de la seule combustion des impuretés de la fonte, surtout du carbone, du silicium et du phosphore. Mais, malheureusement, une grande partie de la chaleur dégagée est consommée par le chauffage de l'azote inclus dans l'air de soufflage et est ainsi perdue pour le chauffage du bain.

Avec le four Martin et le four électrique, on est beaucoup plus libre, en principe, dans le choix des matières premières. On peut dans ce cas charger de la fonte aussi bien liquide que solide, pauvre ou riche en phosphore, du moins dans une certaine limite.

Le chargement de la fonte est possible même à l'état solide, parce qu'avec le four Martin et le four électrique, la chaleur indispensable au chauffage et à la fusion des matières chargées est fournie par un combustible ou par l'emploi d'énergie électrique (four à arc) et non pas, comme avec le procédé Thomas par la seule combustion (oxydation) des impuretés du fer dans la fonte.

C'est pourquoi la charge de ferrailles peut aussi varier dans de très larges limites. On peut obtenir des bains aussi bien à 100% de charge de fonte qu'à 100% de charge de ferrailles. Dans le dernier cas, cependant, le carbone nécessaire doit être apporté par une addition de coke ou d'antracite.

Les procédés à l'oxygène pur n'exigent, il est vrai, comme le procédé Thomas, aucun apport de chaleur extérieur, mais ici, ainsi qu'il a déjà été expliqué, on emploie comme agent d'affinage gazeux non pas l'air mais de

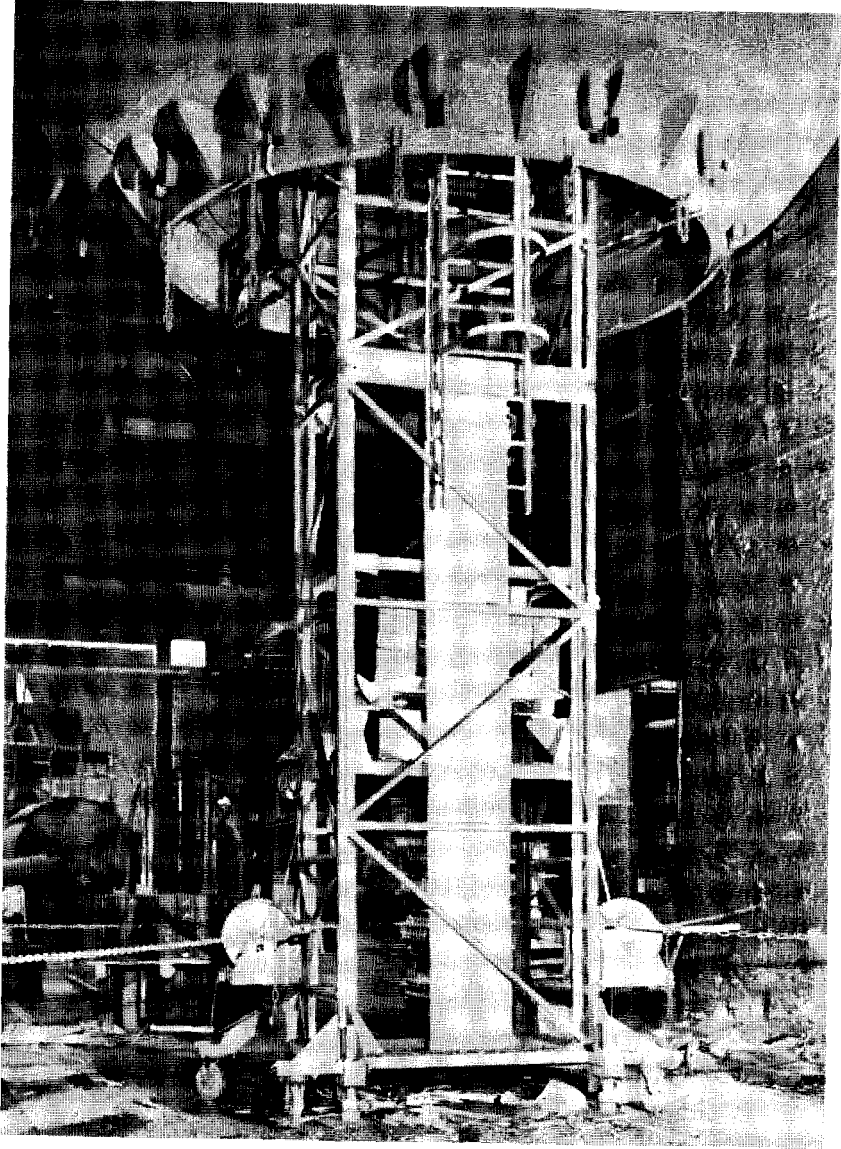


Figure 24 : Échafaudage de maçonnerie en service dans un convertisseur à oxygène de 70 t.

l'oxygène pur. Du fait de l'absence de teneur en azote dans l'agent gazeux d'affinage, on dispose d'une proportion considérablement plus élevée qu'au Thomas de la chaleur engendrée par la combustion des impuretés du fer. Cette quantité supplémentaire de chaleur disponible pour l'élévation de la température du bain jusqu'à la température de coulée rend le procédé à l'oxygène soufflé par en haut largement indépendant de la composition chimique de la fonte.

Il est vrai qu'avec le procédé LD on ne peut charger que de la fonte pauvre en phosphore, avec une teneur maximale de 0,4% de cet élément. Plus la teneur en phosphore de l'acier LD produit doit être faible, plus faible aussi doit être celle de la fonte chargée.

Avec les procédés LD-Pompey, LD-AC, OLP et Kaldo, on peut transformer en acier aussi bien de la fonte riche en phosphore (avec, par exemple 1,7 à 2,2% P, comme avec le procédé Thomas) que de la fonte pauvre en phosphore à moins de 1,7% P. Cependant il n'est généralement pas économique de charger des qualités de fonte ayant des teneurs en phosphore de 0,4% jusqu'à environ 1,3%. Les frais plus élevés qu'entraîne le soufflage de la fonte riche en phosphore à plus de 0,4% P, en raison d'une plus forte consommation d'oxygène et de chaux ainsi qu'une moindre durée du garnissage du convertisseur, ne peuvent être acceptés que si la scorie formée contient suffisamment d'acide phosphorique pour pouvoir être vendue comme engrais.

En revanche, la quantité de chaleur supplémentaire disponible pour le chauffage du bain, du fait de la disparition de la teneur en azote dans l'agent de réduction gazeux, permet une augmentation considérable de la charge en ferrailles ou une addition de minerai thermiquement équivalente.

Avec la fonte riche en phosphore, la charge en ferrailles peut être portée jusqu'à 30% et plus. Ce mode opératoire est surtout très avantageux quand les ferrailles sont bon marché, c'est-à-dire quand leur prix est considérablement inférieur à celui de la fonte.

Les ferrailles chargées doivent être le plus possible exemptes des impuretés chimiques qui ne s'éliminent que mal ou même pas du tout pendant le soufflage. Elles doivent donc ne contenir que peu de soufre, de cuivre, de chrome, de nickel ou d'étain et de zinc. La plus grande prudence s'impose donc quand on achète de la ferraille en paquets dont on ne sait jamais tout ce qu'ils peuvent contenir. Il faut également se méfier des ferrailles d'aciers alliés. En outre, les ferrailles utilisées pour le procédé LD ne doivent pas avoir de fortes teneurs en phosphore, comme c'est le cas pour les aciers à écrous, qui sont fabriqués avec une teneur en phosphore relativement élevée.

Le minerai employé doit avoir une forte teneur en fer, se présenter en morceaux qui ne soient pas trop gros afin de ne pas rester accrochés dans les silos aux ouvertures d'extraction et aux dispositifs de transport. Il doit être en outre exempt de poussière. Bien entendu si le minerai doit être insufflé avec l'oxygène, il doit être broyé.

La chaux doit, autant que possible, contenir plus de 88% d'oxyde de calcium, peu de silice et de soufre. La silice se combine en effet spontanément à la chaux qui est ainsi perdue; quant au soufre, il est très indésirable, car il ne s'élimine du bain que difficilement. La chaux doit être calcinée plutôt douce que dure afin de former rapidement une scorie réagissante.

Si l'on opère avec de la chaux en morceaux, comme cela se pratique avec les procédés LD, LD-Pompey et Kaldo, il est plus avantageux d'employer une chaux concassée et criblée dont les morceaux ont une grosseur déterminée (par exemple, de 10 à 40 mm) plutôt qu'une chaux ayant une granulométrie allant de 0 à plus de 200 mm. Plus les morceaux sont petits, plus ils sont évidemment nombreux pour un même poids enfourné et plus grandes sont les surfaces en contact avec la fonte liquide et plus rapide est la scorification de la chaux lors du soufflage.

Par contre, avec les procédés LD-AC et OLP, on emploie une chaux très pulvérisée qui est insufflée en même temps que l'oxygène sur le bain.

Pour conclure, on peut affirmer que les procédés à l'oxygène soufflé par en haut ne le cèdent guère aux procédés Martin et au four électrique en ce qui concerne le choix de la composition chimique de la fonte et qu'ils sont nettement supérieurs au procédé Thomas. Du point de vue de l'importance possible des charges de ferrailles et de minerai, ils offrent également des avantages économiques déterminants par rapport au procédé Thomas. En outre, la qualité intrinsèque des aciers à l'oxygène pur est supérieure à celle des aciers Thomas pour un certain nombre d'utilisations. Cette question sera traitée en détail dans le chapitre 4.2.7.

4.2.3. Mécanisme des réactions métallurgiques

Dans le procédé à l'oxygène, on souffle, au moyen d'une lance refroidie à l'eau et munie d'une buse de cuivre, de l'oxygène techniquement pur à 99,5 – 99,8% O₂ sur la surface d'un bain de fonte placé dans une cornue à revêtement basique, à fond fermé, comme la *figure 25* le montre schématiquement.

La distance entre la lance et le bain varie de 1 à 2 m et peut, au cours du soufflage, être maintenue constante ou modifiée suivant les besoins. Avant d'en-

trer dans les détails, il faut évoquer certaines caractéristiques importantes de la méthode d'affinage à l'oxygène pur qui la différencie des procédés Thomas, Martin ou électrique.

Avec le four à sole, le four Martin par exemple, les réactions métallurgiques se font par échanges entre le bain de métal et le laitier. Les phénomènes à l'interface métal-laitier et le transport des réactifs dans le bain (par diffusion) déterminent la vitesse de la réaction. La présence d'un laitier entrant facilement en réaction constitue la condition préalable. La chaleur indispensable est apportée par les combustibles (mazout, gaz) introduits par les têtes de four ou des brûleurs. Ce procédé est donc très souple vis-à-vis de la composition des matières chargées et de leurs proportions respectives (par exemple le rapport ferraille-fonte).

La métallurgie du procédé d'affinage au vent, le procédé Thomas par exemple, est déterminée par des échanges entre le bain de métal et les agents d'affinage gazeux, ainsi aussi que par les réactions avec le laitier.

La vitesse d'affinage dépend, en conséquence, du volume d'oxygène apporté par le vent par unité de temps. La scorie se forme vers la fin du soufflage. La chaleur nécessaire pour atteindre la température de coulée de l'acier est fournie par les réactions d'affinage (oxydations) de la fonte liquide chargée. Le procédé n'a donc pas son indépendance thermique et on règle la température finale en jouant sur les additions, relativement peu importantes, d'éléments refroidissants (ferraille, minerai, agglomérés, battitures, castine, etc.) ou sur le degré d'enrichissement en oxygène du vent, quand on souffle à l'air enrichi (ce qui procure donc au procédé Thomas un certain élément de souplesse thermique).

Les procédés de conversion à l'oxygène pur réunissent les avantages techniques des deux procédés, c'est-à-dire la très grande rapidité d'allure des réactions métallurgiques du procédé Thomas, et la large indépendance des quantités et compositions des matières chargées du procédé en four à sole.

Les caractéristiques métallurgiques les plus importantes de l'affinage à l'oxygène pur peuvent se résumer comme suit :

- A – Réaction directe et extrêmement complète de l'oxygène gazeux insufflé avec le métal. L'apport d'oxygène détermine la vitesse d'affinage qui est relativement élevée.
- B – Formation rapide d'une scorie susceptible de réaction provoquée par le développement considérable de chaleur dans la zone d'impact du jet, c'est-à-dire au voisinage immédiat de la scorie et par la rapide transmission de chaleur du métal à la scorie.

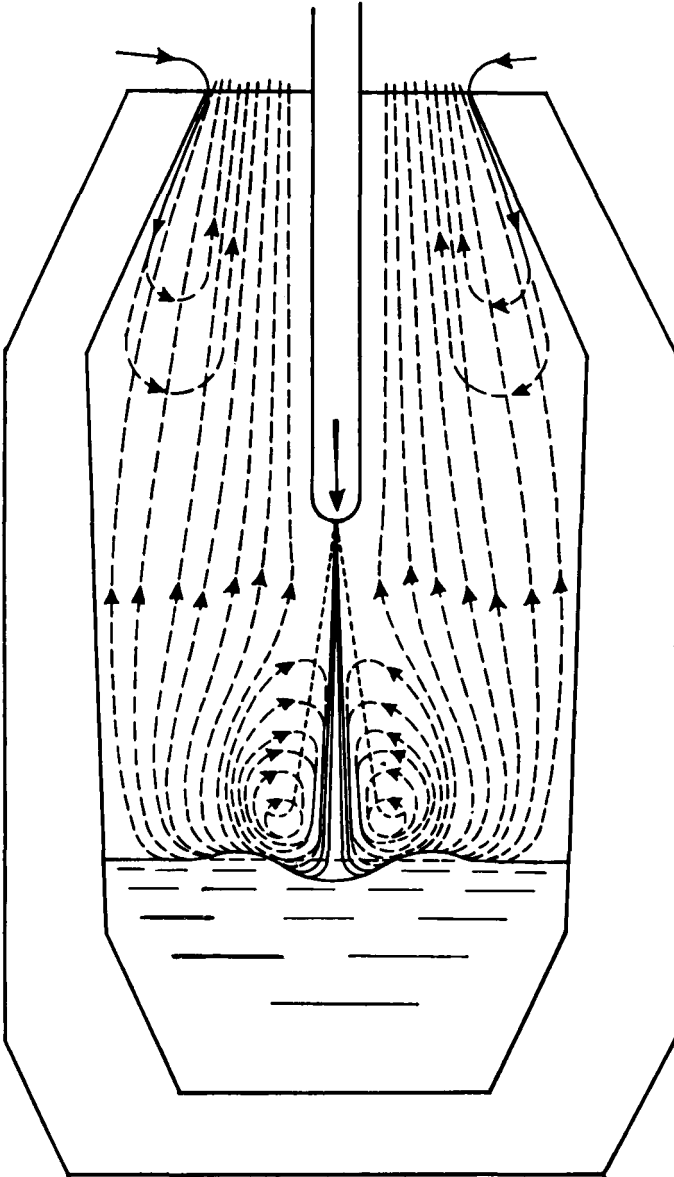
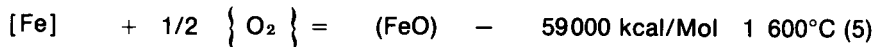
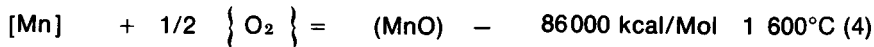
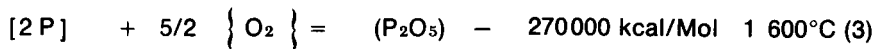
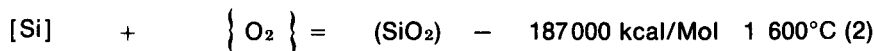
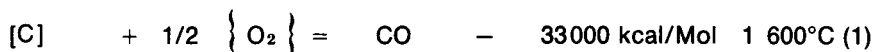


Figure 25: Soufflage d'oxygène par le haut et écoulement du gaz formé dans un convertisseur d'essai de 3 tonnes.

- C – Les réactions d'affinage fournissent, avec de faibles pertes de chaleur dans les fumées et aux parois, un apport de chaleur élevé. De ce fait, on peut travailler avec toutes sortes de fontes de composition quelconque et de plus grandes quantités d'éléments refroidissants comme les ferrailles, le minerai, entre autres (par exemple jusqu'à 35% de la charge sous forme de ferraille), suivant les caractéristiques de la fonte. En ajoutant encore des facteurs calorifiques (combustibles additionnels – par exemple le coke –, ferrosilicium, carbure de silicium et carbure de calcium) on peut, dans des cas particuliers, encore augmenter la proportion de réfrigérants. On peut également parfaitement fabriquer des aciers alliés comportant jusqu'à 6% de teneur en éléments d'alliages et même, grâce à des mesures spéciales, à teneur encore plus élevée, pouvant aller jusqu'à 30%.
- D – Par le soufflage d'oxygène pur, on évite l'admission de gaz nuisibles (azote, hydrogène). Il est particulièrement avantageux qu'il ne puisse pas y avoir d'admission d'azote et de pouvoir produire, de ce fait, des aciers peu vieillissants.

Le *mécanisme des réactions d'affinage* a été analysé très à fond dans des petits convertisseurs d'essai (*figure 26*). L'allure des réactions essentielles, à savoir les oxydations, donc la combinaison des impuretés de la fonte, notamment du carbone, du silicium, du manganèse, du phosphore et du soufre avec l'oxygène, au cours desquelles les oxydes formés s'échappent sous forme gazeuse au bec du convertisseur ou se scorifient avec la chaux ajoutée, peut se définir comme suit sous forme d'équations de réaction.



ou $[FeO]$

Il s'agit donc des réactions de l'oxygène gazeux, employé comme agent d'affinage, avec le bain de métal ainsi que de ce dernier avec la scorie en formation pendant le soufflage.

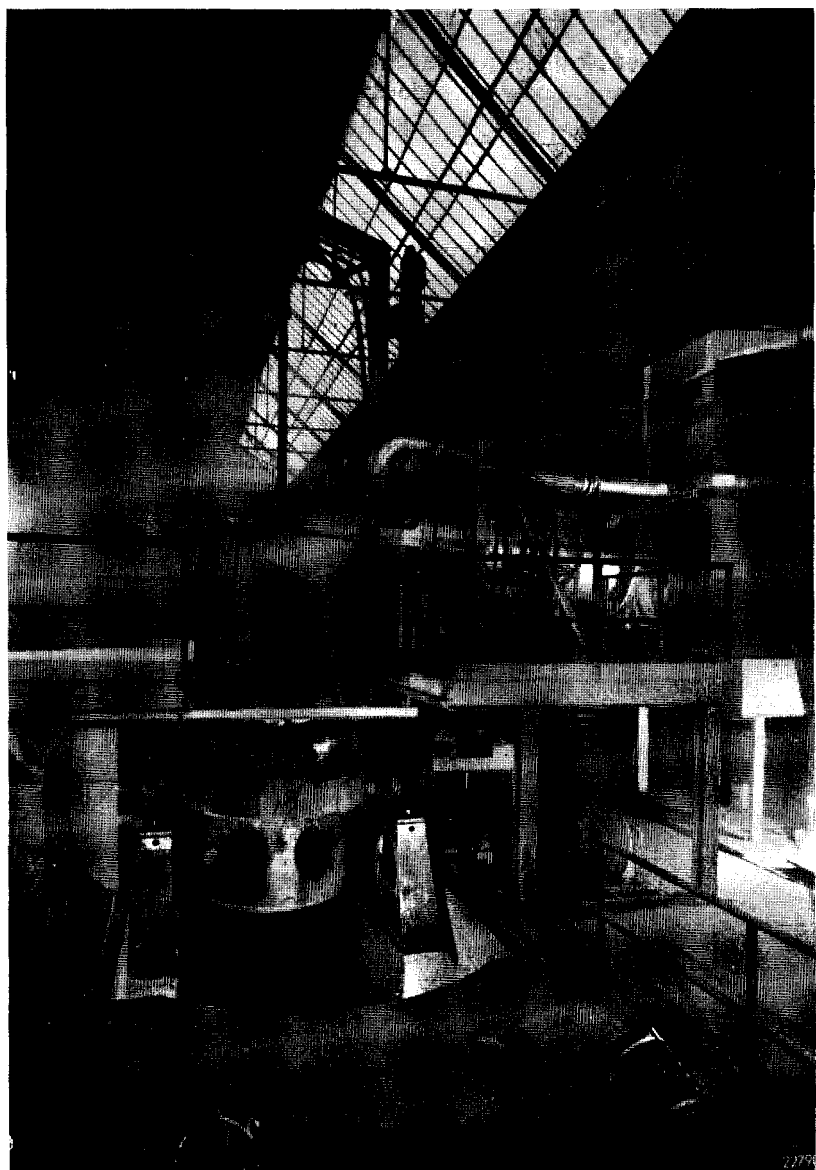


Figure 26: Convertisseur d'essai de 3 tonnes pour le procédé à l'oxygène soufflé par le haut.

Les signes utilisés dans les équations de réaction signifient :

Crochets = dilué dans le métal, parenthèses = dilué dans la scorie, accolades = état gazeux. En conséquence, on doit admettre comme éléments importants à l'aide desquels on peut influencer ou conduire les réactions :

- A – Le débit de la pression d'oxygène, la forme et le diamètre de la buse d'injection, ainsi que la distance de celle-ci à la surface du bain.
- B – Les scorifiants, leurs caractéristiques physiques et leur composition chimique; les quantités, moments et mode d'addition.
- C – La composition et la température de la fonte.

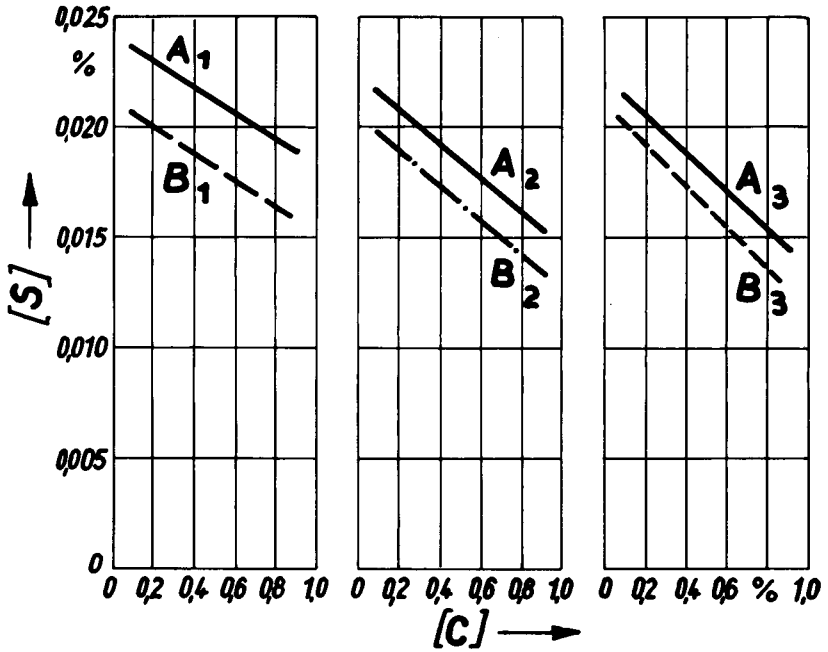


Figure 27: Teneur en soufre en fonction de la teneur en carbone à la fin du soufflage.

A₁, A₂, A₃ = chaux normale de 5 à 40 mm venant du four à cuve.

B₁ = chaux douce de 5 à 20 mm venant du four rotatif.

B₂ = chaux surcuite de 5 à 20 mm venant du four rotatif.

B₃ = chaux normale de 5 à 20 mm venant du four à cuve.

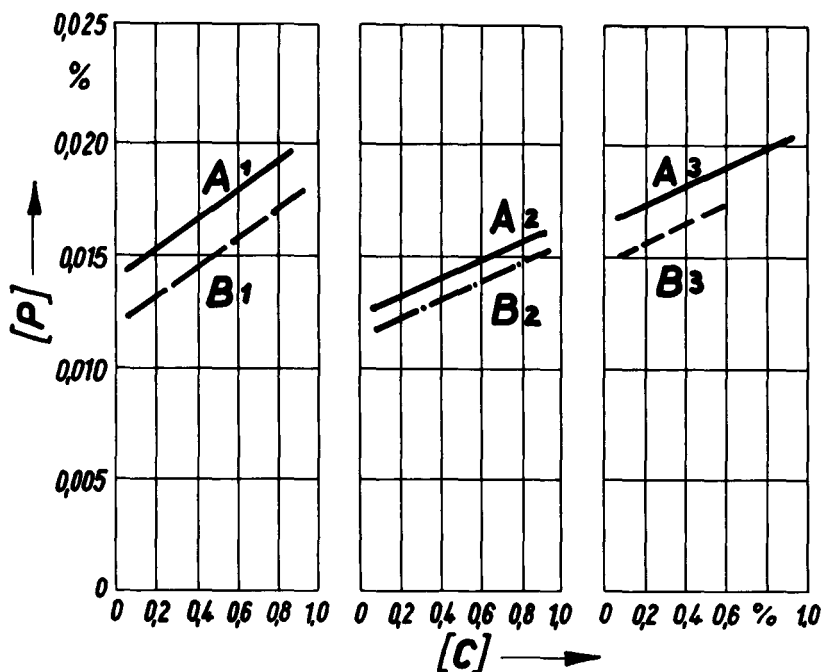


Figure 28: Teneur en phosphore en fonction de celle en carbone, à la fin du soufflage.

A_1, A_2, A_3 = chaux normale de 5 à 50 mm venant du four à cuve.

B_1 = chaux douce de 5 à 20 mm venant du four rotatif.

B_2 = chaux fortement calcinée de 5 à 20 mm venant du four rotatif.

B_3 = chaux normale de 5 à 20 mm venant du four à cuve.

Les vitesses d'affinage sont déterminées par l'apport d'oxygène par unité de temps. L'oxygène soufflé par la lance est, généralement, presque totalement fixé par le bain; mais, suivant le pouvoir oxydant de la scorie, elle peut soit oxyder elle aussi le bain, soit être oxydée par lui et l'état final du bain dépend donc du sens et de l'amplitude de ce déséquilibre. La pression de l'oxygène à l'impact est influencée par celle de l'oxygène à la buse et par la distance de celle-ci au bain.

Cette pression détermine les intensités respectives des réactions entre métal et gaz et entre métal et scorie. Alors qu'un soufflage «dur», avec une

courte distance entre le nez de la lance et le bain, favorise les échanges métal-gaz, le soufflage «mou», c'est-à-dire lance plus haute, avantage les réactions qui se passent entre métal et scorie, la pression pouvant, dans un cas extrême, ne plus suffire pour traverser la couche de scorie. L'oxygène disparaît en formant des oxydes ferreux et ferriques dans la scorie, ce qu'on appelle «scorification amortie». En augmentant la pression de l'oxygène de soufflage on peut, toutes choses égales d'ailleurs, rétablir de force l'échange métal-oxygène. Ces conditions de soufflage prennent de l'importance, comme il a été dit d'autre part, quand on souffle des fontes de nature particulière, par exemple de la fonte phosphoreuse.

Comme l'allure des réactions métal-scorie dépend de la durée du temps de la réaction, la vitesse de la scorification, qui dépend essentiellement du temps nécessaire à la dissolution de la chaux dans la scorie, doit avoir aussi de l'influence. Comme le montre la *figure 27*, la désulfuration à la chaux est meilleure avec une granulométrie de 5 à 20 mm qu'avec une grosseur de grain de 5 à 40 mm. Comme le fait voir la *figure 28*, la chaux donne aussi, pour la déphosphoration, des résultats d'autant meilleurs qu'elle est à grain plus fin et qu'elle est moins réactive. Plus une espèce de chaux est à grain fin, plus elle offre de surface et plus rapidement la chaux se dissout dans la scorie. De même une chaux faiblement réactive est plus rapidement soluble dans la scorie qu'une chaux fortement réactive.

Du fait de l'affinage à l'oxygène techniquement pur, sans ballast d'azote de l'air, certaines exigences relatives à la composition chimique des fontes à souffler et auxquelles les procédés Thomas ou Bessemer doivent répondre, deviennent inutiles. Le procédé au convertisseur à oxygène soufflé par le haut n'est donc pas tributaire de la présence dans la fonte de certaines impuretés thermogènes, comme le phosphore ou le silicium.

Soufflage de fonte hématite

Une fonte Martin courante pour le procédé de soufflage normal peut par exemple varier dans les gammes d'analyse suivantes :

4,0 – 4,2% C, 0,05 – 1,4% Si, 0,8 – 2,8% Mn, 0,08 – 0,250% P, max. 0,045% S (voir aussi le tableau ci-après).

L'allure du soufflage d'un bain dépend de la nature des réfrigérants employés, par exemple le minerai, les riblons ou autres. Dans les *figures 29 et 30*, la marche des bains refroidis respectivement au minerai et aux riblons est représentée. On peut y relever l'allure d'affinage pour les éléments C, Mn, Si et P, l'allure de la composition du laitier ainsi que celle de la température

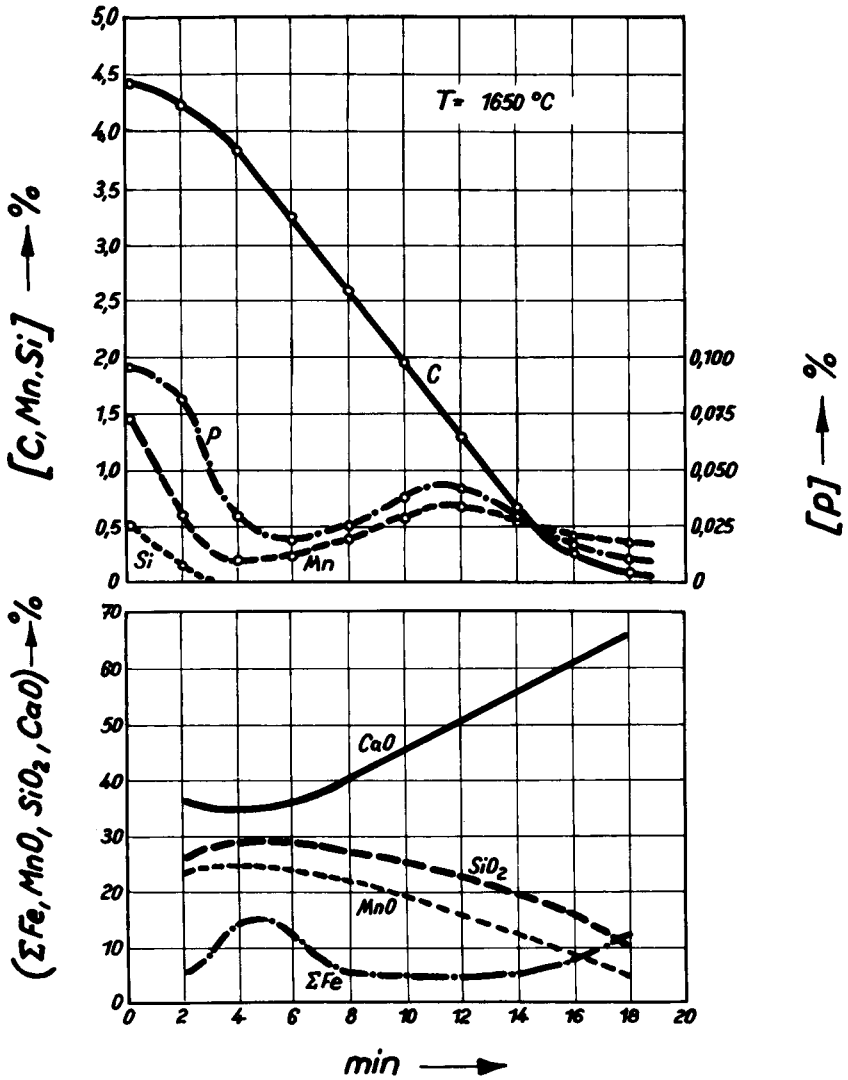


Figure 29: Courbes d'affinage de coulées LD avec refroidissement au minerai.

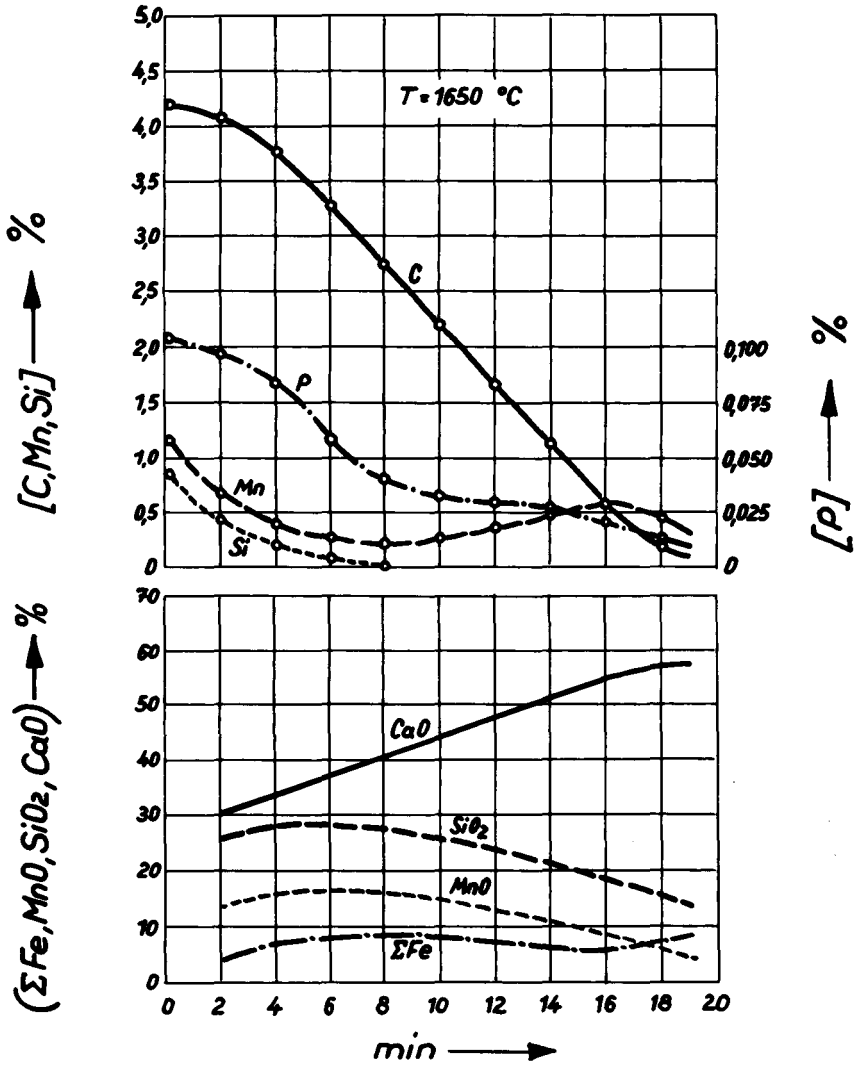


Figure 30: Courbes d'affinage de coulées LD avec refroidissement à la feraille.

(figure 31). On voit distinctement la combustion plus précoce de Si, Mn et P avec le refroidissement au minerai (figure 29). Il n'y a pas été constaté de teneurs surélevées en oxygène du bain métallique pendant la durée totale des charges, mais l'oxygène introduit avec le minerai est consommé jusqu'à la huitième minute. La consommation d'oxygène de soufflage est jusqu'à 15% inférieure à celle avec réfrigération aux riblons, car le minerai ajouté comme réfrigérant contient, certes, des quantités importantes d'oxygène.

Le rapport d'échange du riblon au minerai, employés comme réfrigérants, est d'environ 3,5 : 1. Le calcul des frais est déterminant pour le choix du réfrigérant parce qu'il peut différer d'un cas à un autre suivant les conditions de matières premières. On peut aussi employer simultanément diffé-

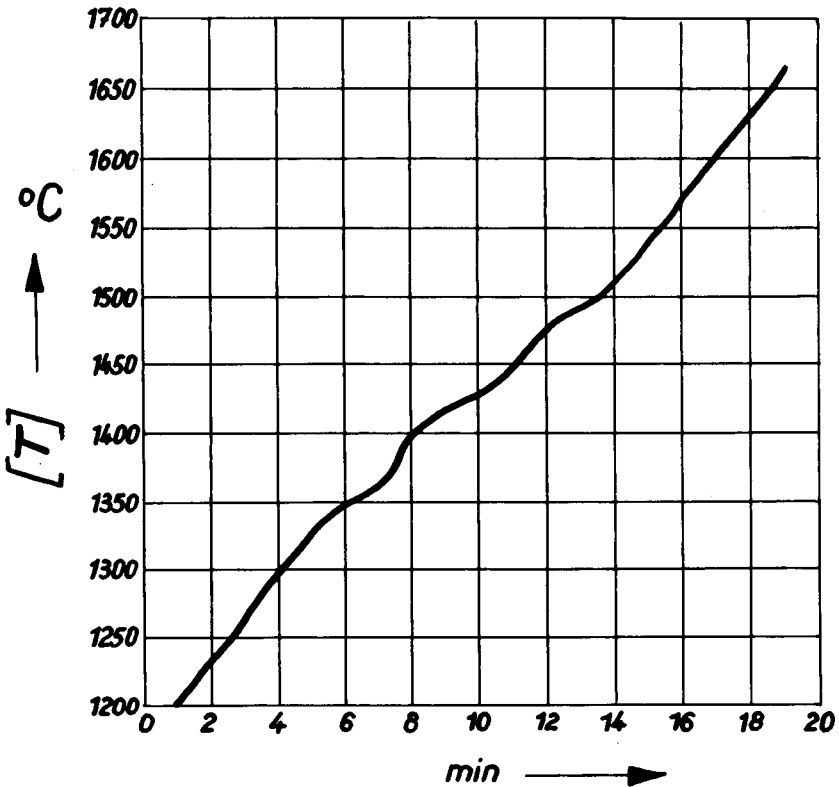


Figure 31 : Courbe de température de coulées LD avec refroidissement à la ferraille.

rents réfrigérants ou d'autres réfrigérants appropriés en même temps, ou d'autres additions réfrigérantes indiquées, par exemple de l'aggloméré de minerai, des pellets, de l'éponge de fer, des battitures de laminoir, etc. Il faut considérer comme un avantage particulier de la mise en œuvre du minerai ou de ses dérivés comme réfrigérant au lieu de riblons, qu'il n'est pas amené dans l'acier (ou très peu) d'éléments d'impureté indésirables tels que le cuivre, l'étain, etc.

	Pour la fonte hématite	Pour la fonte Thomas
Durée de charge de coulée à coulée	environ 40 minutes	environ 52 minutes
Durée de soufflage proprement dit	environ 20 minutes	environ 20 minutes
Fonte	environ 795 kg	environ 934 kg
Consommation à la tonne d'acier ferraille	environ 290 kg	environ 161 kg
Minerai	environ 15 kg	environ 30 kg
Chaux	environ 60 kg	environ 100 kg
Ferro-manganèse	environ 6 kg	environ 6 kg
Oxygène	environ 50 kg	environ 50 kg

En employant de la fonte hématite, il est possible de produire presque toutes les nuances d'acier au carbone et alliés.

Les *aciers doux au carbone* sont, en général, obtenus avec le procédé à un laitier précédemment décrit, dont la marche est représentée dans les *figures 29 à 31*.

Les aciers produits ont des caractéristiques identiques à ceux fabriqués par le procédé Martin; ils les surpassent même en partie, pour certaines d'entre elles. On obtient des teneurs en azote, par exemple, d'environ 0,002 N₂ contre 0,004 – 0,008 % N₂ pour l'acier Martin (*figure 32*). La teneur en hydrogène également est nettement inférieure (*figure 31*).

Les *aciers à haut carbone, non alliés* peuvent être fabriqués par la carburation ultérieure de l'acier d'affinage ou en arrêtant l'affinage à la teneur en carbone désirée.

Pour le dernier mode opératoire surtout, une technique a été développée avec succès. Ces coulées dites «par arrêt direct» sont soufflées avec un volume d'oxygène calculé d'avance avec précision en fonction de l'analyse et du poids de la fonte, de la quantité et de la nature des ferrailles. Le soufflage n'est arrêté, brièvement, pour l'analyse et le contrôle de la tempéra-

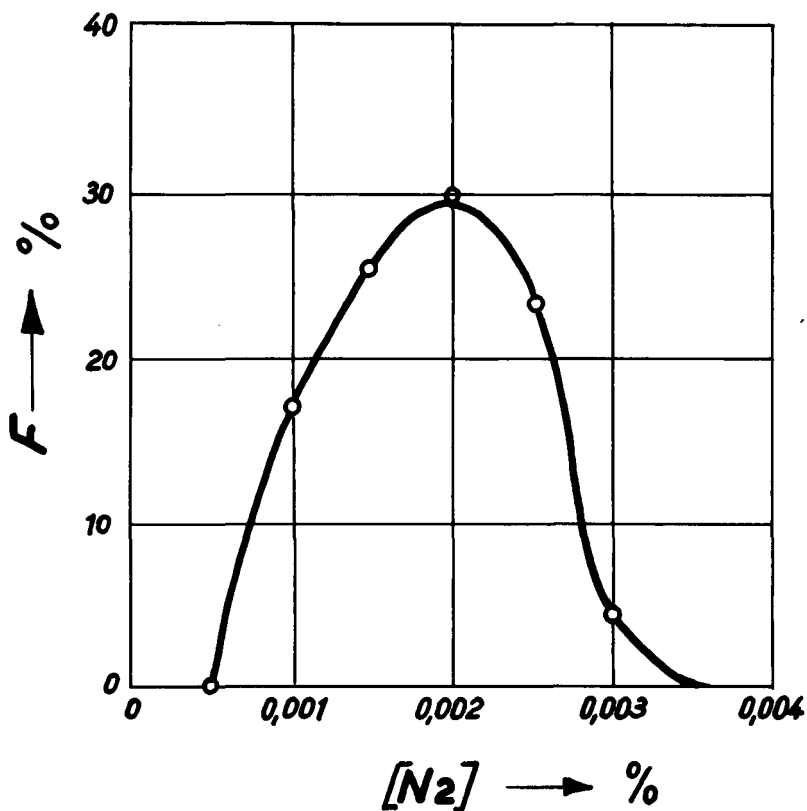


Figure 32: Courbe de fréquence de la teneur en azote pour les aciers élaborés avec refroidissement au minerai entre 0,04 et 0,07 C avant la coulée.

ture, qu'à quelques points au-dessus de la teneur finale en carbone désirée; après quoi, vient un court soufflage de correction. L'allure métallurgique de deux coulées de prise est représentée sur la figure 34: les tableaux analytiques a) et b) représentent les analyses avant le début du soufflage (RE), après 16 mn de soufflage dans un convertisseur basculé (K1) ainsi que du test final (F), de même que des scories (S₁). Les graphiques montrent les variations de la teneur en composants ferreux au cours du soufflage.

Les aciers faiblement alliés sont soufflés selon le procédé normal à un laitier. Les additions de désoxydants et d'éléments d'alliage sont introduites,

dans la poche, s'il s'agit d'éléments oxydables comme le chrome ou dans la charge s'il s'agit de nickel ou de molybdène. Les températures de coulée doivent être maintenues proportionnellement plus hautes pour la fusion des additions en poche, se qui s'obtient en diminuant l'enfournement de ferrailles. Pour les teneurs élevées en carbone, des coulées par arrêt direct peuvent être pratiquées. Quand de très faibles teneurs en phosphore et en soufre sont spécifiées, il faut avoir recours à des traitements spéciaux, par exemple, la pré-désulfuration de la fonte par traitement à la soude ou à la chaux pulvérisée-soude. Quand il est prescrit un maximum de P de 0,020%, un laitier moussant très réactif s'impose, comme pour le traitement de la fonte Thomas.

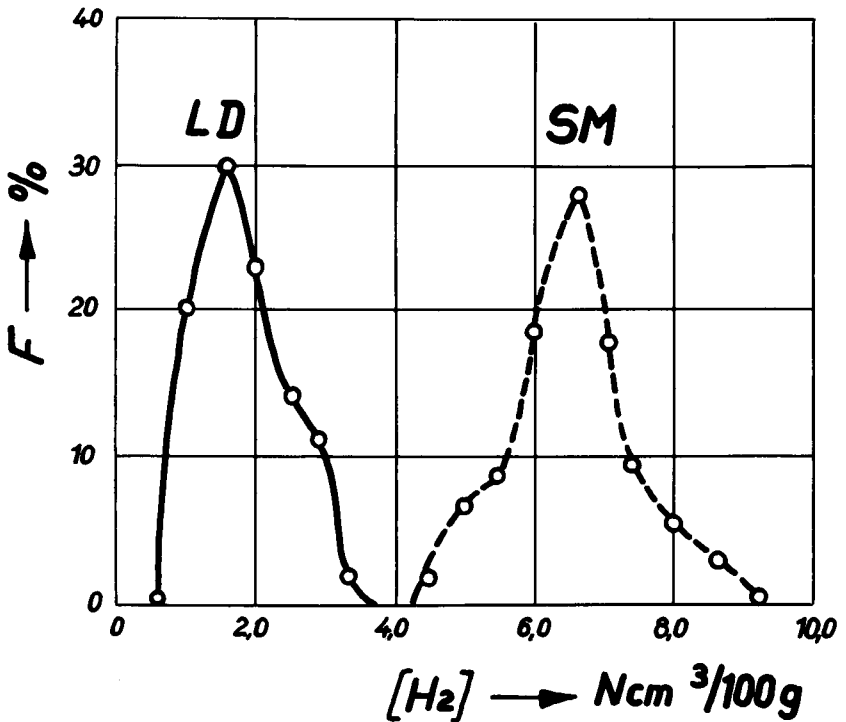


Figure 33: Fréquence de la teneur en hydrogène d'aciers LD élaborés avec refroidissement au minerai et d'aciers Martin de différentes teneurs en carbone, avant la coulée.

a

%	C	Mn	Si	P	S	N	[T] °C
RE	4,74	2,20	0,14	0,064	0,034	0,0074	
K ₁	0,53	0,52	—	0,009	0,015	0,0033	1585
F	0,62	0,74	0,14	0,016	0,018	0,0037	

%	SiO ₂	CaO	Fe	Mn	MgO
S ₁	7,70	48,72	10,58	12,40	1,86

b

%	C	Mn	Si	P	S	N	[T] °C
RE	4,15	2,06	0,05	0,050	0,038	0,0062	
K ₁	0,41	0,55	—	0,010	0,014	0,0029	1595
F	0,58	0,10	0,17	0,011	0,014	0,0045	

%	SiO ₂	CaO	Fe	Mn	MgO
S ₁	10,00	54,21	10,53	10,87	1,78

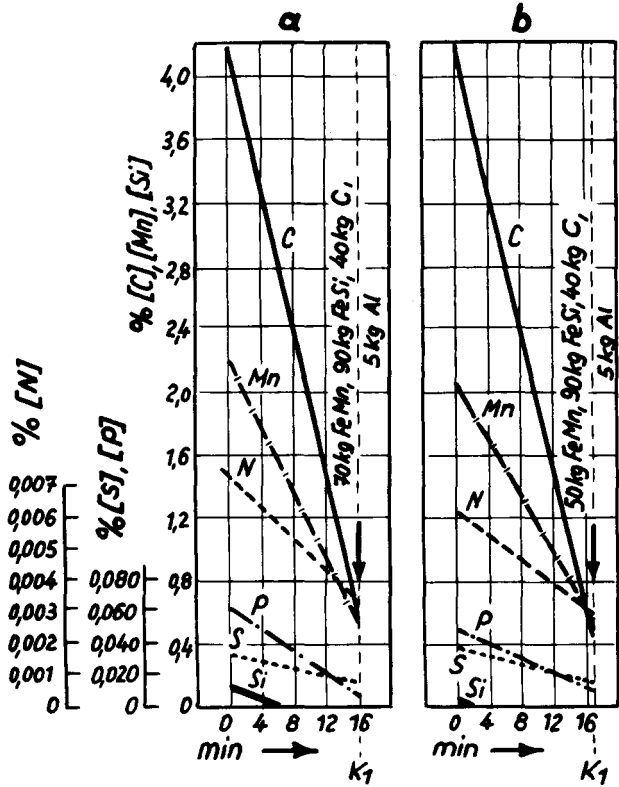


Figure 34:
 Courbes d'affinage
 de deux coulées
 d'acier au carbone
 obtenues par arrêt
 direct dans une
 cornue LD de 30 t.

Les aciers de construction et à outils, plus fortement alliés, reçoivent plus utilement leur alliage dans le convertisseur, la technique à deux laitiers devant être également le plus souvent appliquée pour éviter la rephosphoration.

De même on a développé, pour les aciers fortement alliés, un procédé à deux laitiers, avec lequel on charge de la ferraille alliée, pour rendre utilisables les métaux nobles contenus dans la ferraille (chrome, nickel et molybdène). Le rendement en chrome, par exemple, est de 65 – 95%. Les chiffres de rendement des éléments d'alliage de la ferraille sont déterminants pour la rentabilité du mode de travail. La figure 35 représente l'allure métallurgique d'une coulée d'acier de cémentation au chrome-nickel. Après

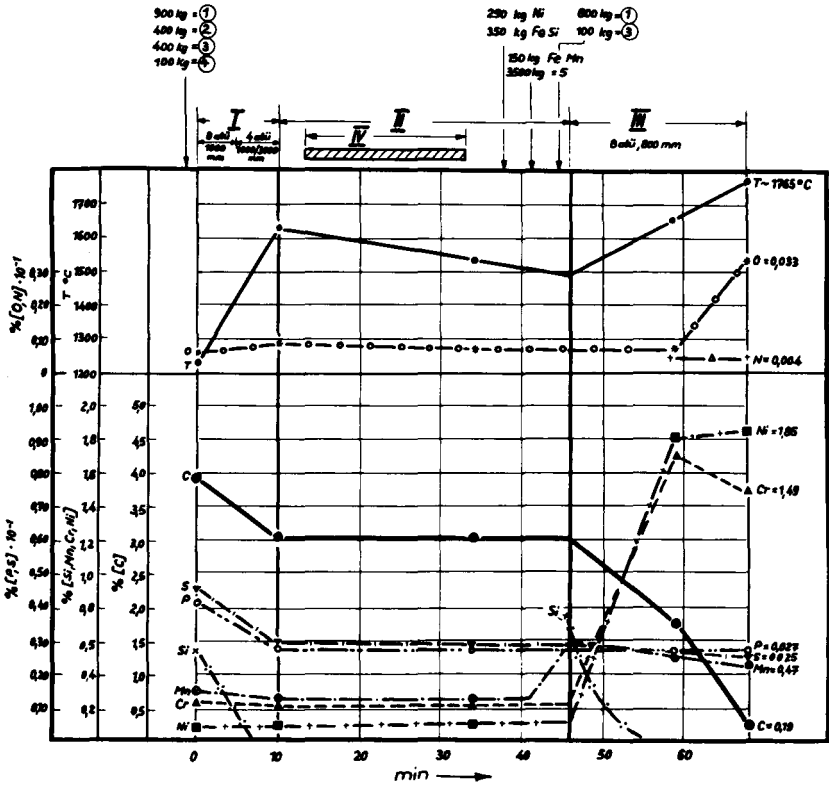


Figure 35: Évolution de l'affinage pour la fabrication d'un acier de cémentation Cr-Ni, avec de la ferraille alliée.

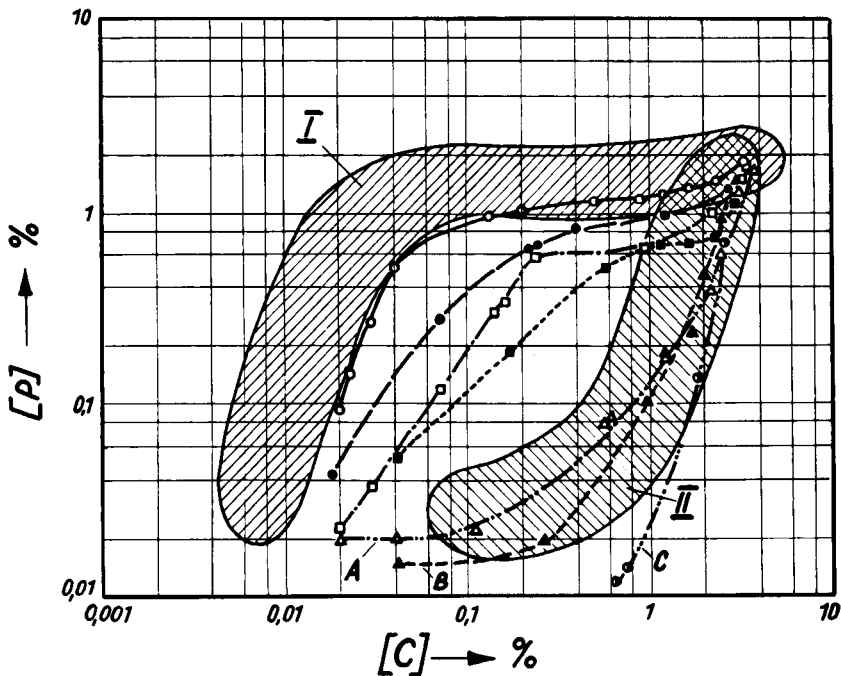


Figure 36: Relation entre les combustions du carbone et du phosphore.
I Procédé Thomas, II Procédé Martin.

chargement de fonte liquide traitée au cubilot à vent chaud et de ferraille contenant du chrome et du nickel, on ménage, après un soufflage de 10 minutes, une pause de 35 minutes pour le décarburage et une nouvelle adjonction par alliage de 290 kg de nickel et d'autres additifs, après quoi, on procède à un deuxième soufflage jusqu'à l'analyse finale.

Quand on veut couler des nuances d'aciers alliés d'aussi haute qualité, il faut tenir compte du fait que l'augmentation du temps employé a une répercussion importante sur les frais, car le maintien plus long du bain dans le creuset et les températures plus élevées détériorent considérablement plus vite le garnissage réfractaire, sauf s'il s'agit d'un acier à haute teneur en carbone.

Soufflage de fonte phosphoreuse

De nombreuses recherches ainsi que des essais étendus à l'échelle industrielle ont pour objectif de déterminer si, lors du soufflage à l'oxygène de la fonte Thomas à 1,5 – 2% P, on peut arriver, dans des conditions de marche suffisamment sûres, à éliminer le phosphore avant la fin de la réaction de décarburation. Cette question peut être considérée comme résolue depuis des années. La *figure 36* représente les relations entre la décarburation et la déphosphorisation.

Elle montre différentes possibilités d'évolution des réactions de combustion du carbone et du phosphore. Les tracés des courbes A, B, C indiquent des modes opératoires couronnés de succès pour promouvoir la déphosphoration sur la décarburation. A cet effet, il est indispensable de veiller à la formation rapide d'une scorie entrant facilement en réaction. L'introduction directe de chaux, sous forme appropriée, dans la zone d'impact du jet où les températures élevées assurent une bonne dissolution de la chaux, est une importante condition préalable. En outre, l'enrichissement de la scorie en oxyde de fer agit favorablement ainsi que des conditions de soufflage douces, c'est-à-dire un éloignement plus grand entre lance et bain. La chaux nécessaire peut être introduite sous forme pulvérulente par la lance ou sous forme de chaux en roche criblée. Cette scorie réactive possède un caractère moussant résultant du dégagement d'oxyde de carbone. La *figure 37* montre l'interaction du jet de gaz et de la scorie mousseuse. L'état b (côté droit de la figure) montre comment la scorie, qui rencontre le jet d'oxygène, est puissamment oxydée et chauffée, de sorte que se forme à la surface du bain une scorie très réactive, dont les propriétés favorisent la déphosphoration. La formation de la scorie mousseuse est, par conséquent, un indice important pour la conduite du processus et le fondeur reconnaît que sa méthode opératoire est la bonne lorsque la scorie mousseuse se forme rapidement. Il faut, toutefois, qu'il puisse en être maître, parce que cette scorie, quand son volume augmente, monte dans le convertisseur et tend même au débordement ou à la projection, ce qui entraîne des pertes en fer.

C'est pourquoi on a mis au point des possibilités de mesure appropriées pour déterminer l'état de la mousse. La variation d'intensité du son, lors de la formation de la mousse, est une de ces possibilités qui ont fait leurs preuves en exploitation; la *figure 38* montre le tracé de la courbe du son pendant la durée du soufflage. La chute d'intensité du son entre la troisième et la cinquième minute est le signe certain de la formation de scorie mousseuse.

Le décrassage, après la première période de soufflage d'environ 11 à 15 minutes, se fait en général avec des teneurs en carbone de 0,7 – 1,0%, la

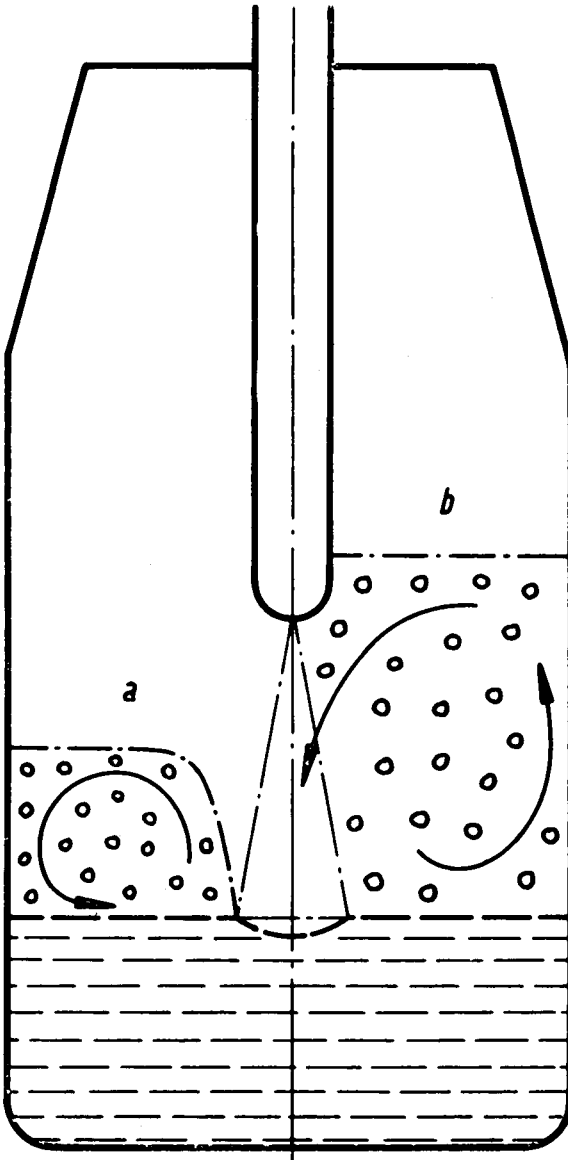


Figure 37: Schéma des mouvements provoqués par le soufflage d'oxygène dans une scorie mousseuse.

a = la buse de soufflage se trouve au-dessus de la mousse
b = la buse se trouve à l'intérieur de la mousse

teneur en phosphore étant inférieure à 0,3%. La scorie contient beaucoup d'anhydride phosphorique, plus de 20% P_2O_5 , et peu de fer, moins de 8% Fe; de ce fait, elle est exploitable comme engrais et la valeur qu'on en peut tirer réduit de façon appréciable les frais de transformation. Il est important que la première scorie soit éliminée aussi complètement que possible.

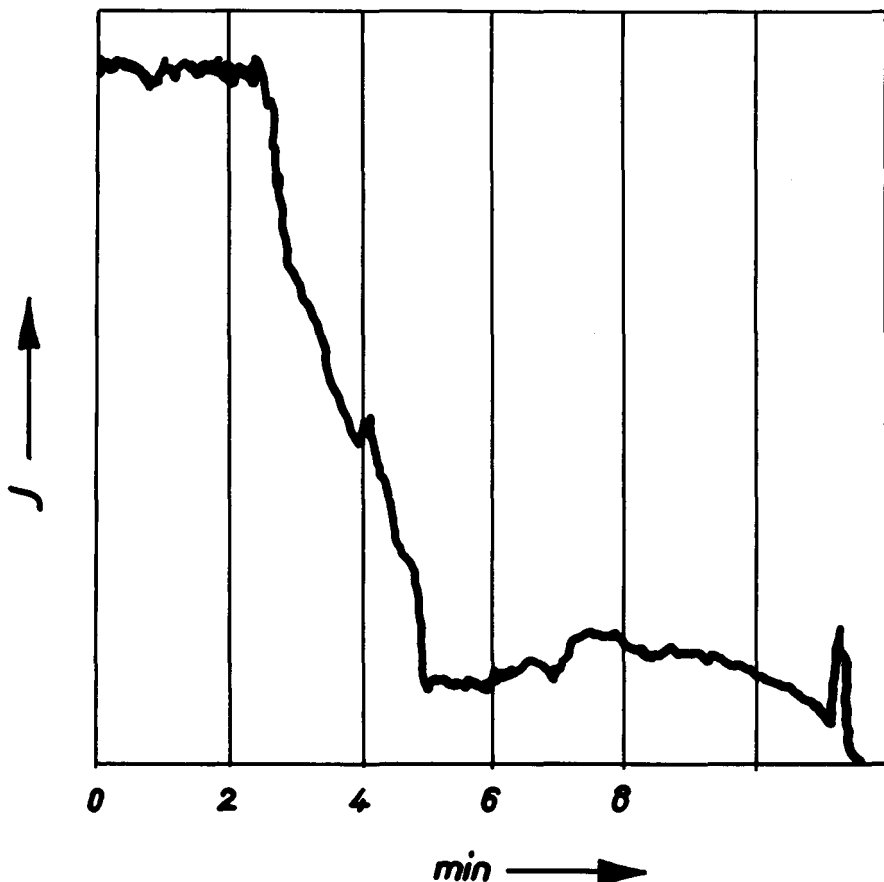


Figure 38: Variation de l'intensité du son émis lors de l'affinage de fonte Thomas à l'oxygène avec de la chaux en roche et décrassage intermédiaire, dans un convertisseur de 90 t.

Mesure du son à environ 650 Hz dans la 1ère période de soufflage.

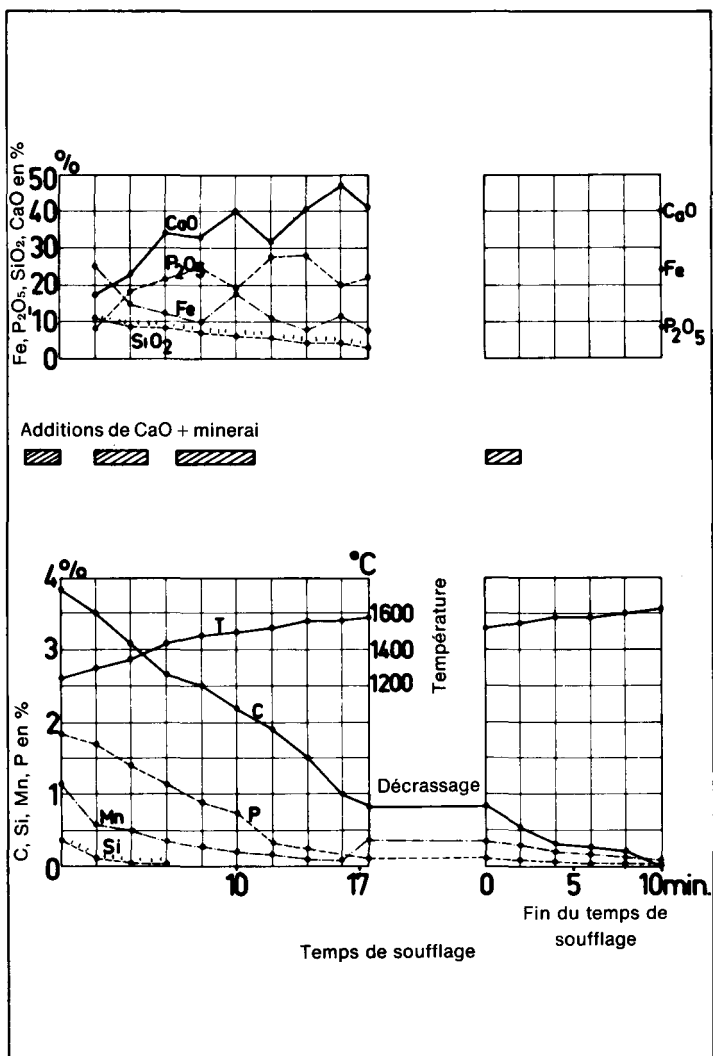


Figure 39: Allures d'affinage d'une coulée lors du traitement de fonte Thomas avec de la chaux en roche criblée.

Après le décrassage, il faut former de nouveau, dans la deuxième période de soufflage, une scorie possédant de bonnes propriétés de déphosphoration. Le temps de soufflage est d'environ 8 minutes. La composition de la scorie, après la deuxième période de soufflage, comporte de plus fortes teneurs en fer, environ 25% Fe et de plus faibles teneurs en acide phosphorique, environ 10% P_2O_5 . Pour réduire les pertes en fer de cette seconde scorie, celle-ci doit être recyclée dans le convertisseur, c'est-à-dire qu'après la coulée de l'acier, la scorie est maintenue dans le convertisseur pour la charge suivante.

La marche de l'affinage, lors du soufflage de la fonte Thomas ordinaire, avec emploi de chaux en roche criblée (granulométrie 5 – 40 mm) et de boulettes de minerai comme élément refroidissant, est indiquée par la *figure 39*. Elle montre l'évolution de l'affinage et celle de la composition de la scorie de coulées de 3 t et de 50 t. Les coulées produites de cette façon accusent une teneur en phosphore finale de 0,015 et 0,025% P.

En employant de la chaux en poudre au lieu de chaux en roche criblée, lors du soufflage de la fonte Thomas, les conditions sont à peu près les mêmes que dans l'exposé ci-dessus. Ici, de la chaux en poudre est injectée par les lances avec l'oxygène de soufflage et non plus de la chaux en roche qui, elle, ne passe évidemment pas par la lance.

La *figure 40* représente les deux modes opératoires, c'est-à-dire les teneurs en phosphore obtenues dans l'acier en fonction de la teneur en fer de la scorie, et cela pour la première et la deuxième périodes de soufflage, pour le procédé avec chaux en roche, et celui avec chaux en poudre.

On voit, d'après cela, qu'il n'y a pas de différence fondamentale entre les résultats selon les procédés avec chaux en roche ou avec chaux en poudre.

4.2.4 Installations de mesure, de commande et de réglage

Il y a encore une vingtaine d'années, la conduite de l'affinage en aciérie était confiée principalement à du personnel qualifié. Il lui appartenait, entre autres choses, de déterminer visuellement, sur la base de l'expérience acquise depuis des années, la température et l'analyse de l'acier avec une exactitude et une rapidité suffisantes.

Les exigences sont foncièrement différentes avec les grands convertisseurs en service de nos jours. Les poids très élevés des coulées – la plupart du temps au-dessus de 100 tonnes et même au-dessus de 200 tonnes – permettent d'atteindre, avec des cycles de coulée à coulée très courts, de 35-

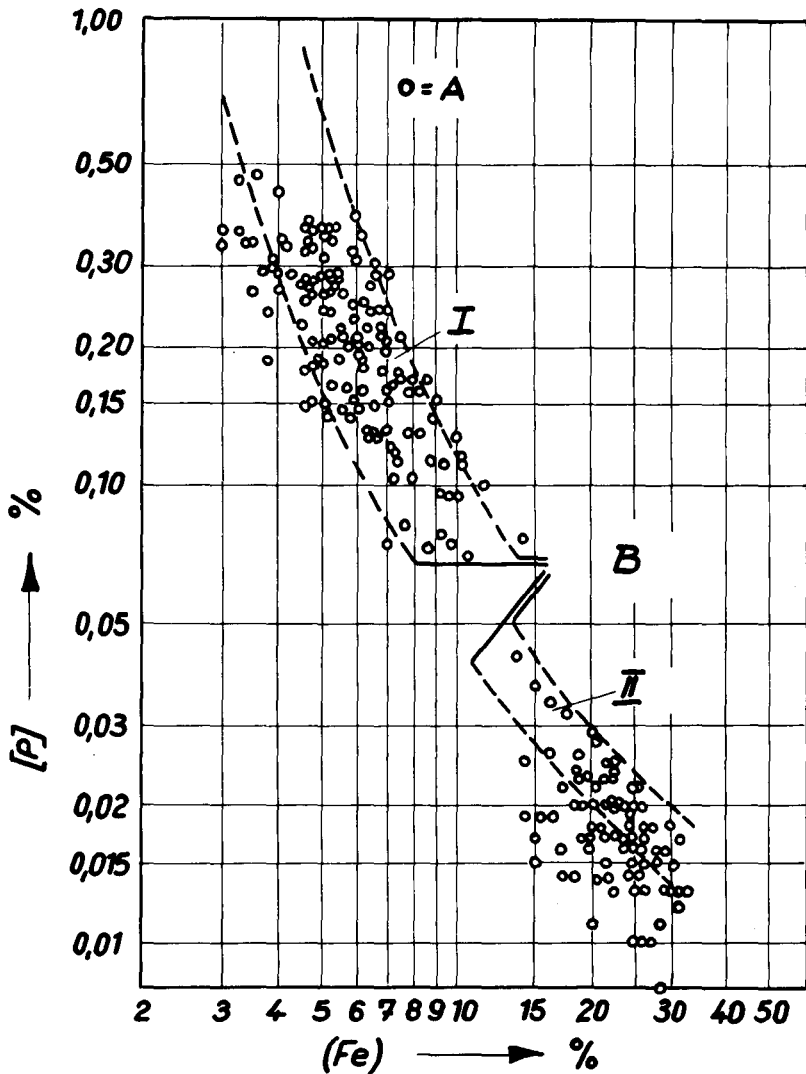


Figure 40: Relation entre la teneur en phosphore de la coulée et la teneur en fer de la scorie.

A = les cercles reproduisent la zone de dispersion lors du mode opératoire avec chaux en roche.

B = les lignes tiretées indiquent la zone de dispersion avec le mode opératoire à la chaux en poudre.

I = 1ère période de soufflage, II = 2ème période de soufflage.

40 minutes, des productions très élevées qui entraînent un débit considérable de matières de toutes sortes; en d'autres termes, le processus est essentiellement à haute productivité. En conséquence, il est d'importance primordiale de mesurer, de commander et de régler tous les facteurs gouvernant les opérations dans le temps le plus bref et avec la plus grande précision. Ces tâches ne peuvent être exécutées sans des dispositifs de mesure, de commande et de réglage importants; il en va de même pour la régularité de l'exploitation.

Tout réglage a pour objet d'obtenir et de maintenir, même en présence d'influences perturbatrices, le respect d'une condition mesurable (par exemple la température de l'acier dans le convertisseur) ou le déroulement normal d'une opération (par exemple le débit d'oxygène en fonction du procédé d'affinage).

Voici, par exemple, le détail des circuits de mesure et de réglage ou dispositifs de contrôle indispensables dans les aciéries à l'oxygène.

A. Installation de mesure et de réglage pour l'oxygène et l'eau de refroidissement de la lance.

La *figure 41* représente schématiquement toutes les installations de mesure et de réglage pour l'oxygène et l'eau de refroidissement d'une lance. Toutes les vannes de réglage et d'arrêt, de même que les diaphragmes de mesure, les appareillages de mesure de la pression et de la température avec leurs convertisseurs de mesure placés dans les conduites tubulaires reliées aux lances, sont rassemblés dans le même local.

B. Poste central de commande pour le contrôle de débit de toutes les matières en liaison avec différents postes de commande.

La *figure 42* montre schématiquement, à l'aide d'un exemple, le débit des matières dans une aciérie à l'oxygène ainsi que les liaisons du «poste central de commande» avec les différents autres postes de commande. Le poste central de commande transmet aux différents postes qui lui sont subordonnés toutes les données et informations diverses qui leur sont nécessaires. De même, ces postes de commande transmettent toutes les valeurs enregistrées (valeurs réelles) au poste central. Les postes de commande les plus importants sont par exemple :

- le poste de commande des convertisseurs,
- le poste de commande des mélangeurs,
- le poste de commande du parc à ferraille,
- le poste de commande des éléments d'addition et
- le poste de commande de coulée.

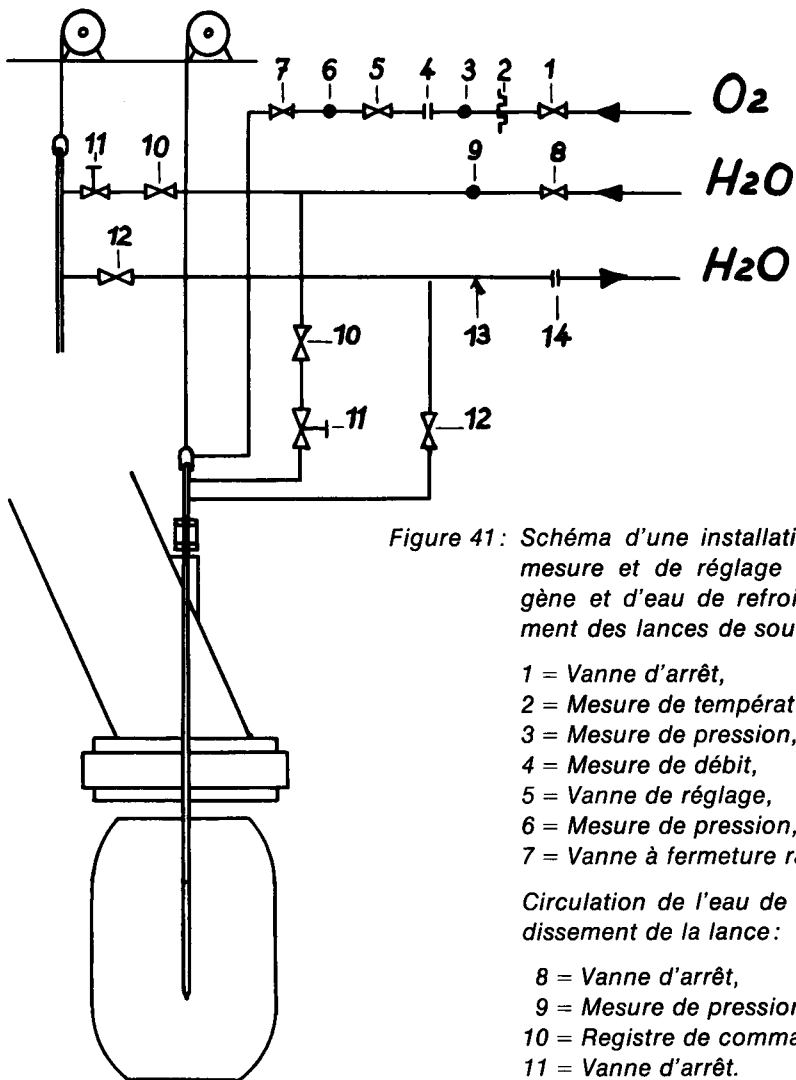


Figure 41 : Schéma d'une installation de mesure et de réglage d'oxygène et d'eau de refroidissement des lances de soufflage.

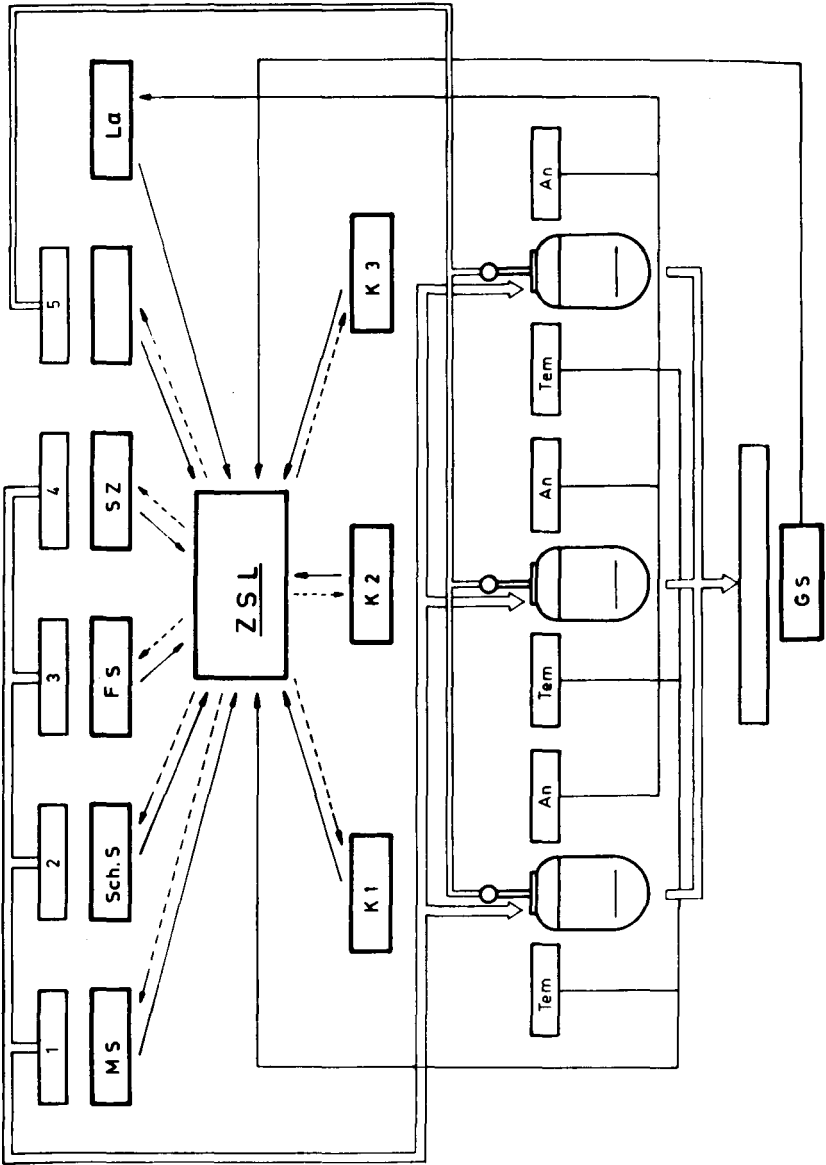
- 1 = Vanne d'arrêt,
- 2 = Mesure de température,
- 3 = Mesure de pression,
- 4 = Mesure de débit,
- 5 = Vanne de réglage,
- 6 = Mesure de pression,
- 7 = Vanne à fermeture rapide.

Circulation de l'eau de refroidissement de la lance :

- 8 = Vanne d'arrêt,
- 9 = Mesure de pression,
- 10 = Registre de commande,
- 11 = Vanne d'arrêt.

Circuit de retour de l'eau de refroidissement :

- 12 = Registre de commande,
- 13 = Mesure de la température,
- 14 = Mesure du débit.



Ces postes de commande et le poste central servent à contrôler et à commander directement l'ensemble du déroulement de la production.

En particulier, les données suivantes peuvent être connues :

a) Les poids :

- de la charge en fonte liquide, ferraille, fonte solide, minerai et battitures,
- des matières d'addition, principalement la chaux et les fondants, les additions de ferro-alliages, aluminium, etc.

En outre, il conviendrait de peser :

- le laitier décaissé à la fin de chaque phase, l'acier liquide en poche, les lingots, les quantités de poussière et de projections produites par campagne de four.

b) Les analyses :

- de la fonte liquide,
- de la fonte solide,
- des différentes sortes de ferrailles,
- du minerai, des fondants et des quantités de laitier, des échantillons d'acier liquide en cours d'affinage, à la fin de celui-ci et les témoins de coulée,

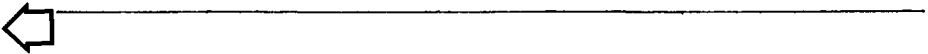


Figure 42: Schéma de production, avec circulation des matières, d'une aciérie à convertisseurs complète avec poste central de commande et différents postes de commande subordonnés.

1 = Fonte de mélangeur, 2 = Ferraille, 3 = Ferro-alliages, 4 = Fondants, 5 = Oxygène.

An = Analyse, FS = Poste de commande de ferro-alliages, GS = Poste de conduite de la coulée, K₁ = Convertisseur 1, K₂ = Convertisseur 2, K₃ = Convertisseur 3 (postes de commande), La = Laboratoire, MS = Poste de commande du mélangeur, SZ = Poste de commande des additions, SchS = Poste de commande du parc à ferrailles, ZSL = Poste central Aciérie, Tem = Température.

- des poussières, des éléments d'alliage, des gaz de combustion et de l'oxygène de soufflage.
- c) Les températures :
- de la fonte liquide,
 - de l'acier liquide après la fin du soufflage,
 - des gaz de combustion, en particulier dans la hotte.
- d) Les temps :
- moments du chargement des ferrailles, du relevé de la température de la fonte, du début et de la fin du chargement de la fonte, du chargement de la chaux (début-fin), du chargement du minerai (début-fin), de l'addition de fondants, de l'introduction d'oxygène (du commencement à la fin du soufflage), du décrassage (début-fin), de la mesure de la température de l'acier, du prélèvement d'échantillons d'acier et de laitier, de l'addition des ferro-alliages, de la coulée entre autres.
- e) Quantités, débits et pression
- débit d'oxygène (Nm^3/min), pression de l'oxygène en amont de la lance, consommation d'oxygène ($\text{Nm}^3/\text{charge}$), débits d'eau d'alimentation de la hotte et d'eau de refroidissement de la lance.

C. Laboratoire pour analyses rapides

L'analyse des échantillons prélevés au cours de l'affinage porte sur le carbone, le silicium, le phosphore, le soufre et, en tant que de besoin, d'autres éléments. A l'aide d'un appareil spectroscopique et de ses dispositifs, les échantillons sont analysés rapidement et avec certitude. Quand il y a un grand nombre d'échantillons, il est opportun de compléter l'analyseur spectroscopique par un calculateur analogique, un voltmètre numérique et une enregistreuse électrique.

Pour l'analyse rapide et automatique des teneurs en carbone et en soufre, on dispose de tours pour usiner les échantillons. Le laboratoire dispose en outre d'appareils pour la détermination de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'azote ainsi que de tous les autres appareils nécessaires pour fournir rapidement les analyses.

D. Centrale de collecte des mesures et des informations

La base du contrôle de la marche de l'exploitation jusqu'aux travaux préparatoires d'automatisation est l'enregistrement et la collecte de toutes les

mesures particulières et totales. Les informations issues des différentes installations de mesure et de réglage sont réunies dans une installation de collecte commandée par programme, mises en ordre et finalement transcrites dans un rapport de fabrication et de coulée.

L'installation centrale de collecte des mesures est essentiellement constituée par un ordinateur dont l'âme est un calculateur numérique.

Pour l'introduction des valeurs réelles, des indices, etc., dans l'installation de collecte centrale, il existe en différents endroits des claviers d'introduction particuliers.

Toutes les données relatives aux opérations sont centralisées, classées et, éventuellement, converties de façon que le rapport de fabrication soit établi dès la fin du soufflage. Puis, toutes les informations entre deux coulées, autrement dit, entre la fin d'une charge et la fin de la suivante, sont recueillies dans une mémoire.

Le moment initial et le moment final de l'addition des fondants dans le convertisseur, les moments des mesures de la température et des prélèvements d'échantillons, ainsi que ceux d'observations particulières sont également collectés.

La fin d'une charge et, par conséquent, le début d'une nouvelle charge, est donnée par le contact «fin de charge». Grâce à ce contact, toutes les valeurs cumulées et, éventuellement, jusqu'aux dernières données emmagasinées sont imprimées.

Conformément à la tendance actuelle, le soufflage est automatisé dans les aciéries et en particulier dans les aciéries à l'oxygène. Les procédés de fabrication à déroulement rapide ne peuvent être saisis et contrôlés de façon suffisamment précise et complète par les moyens traditionnels, c'est-à-dire par les simples observations du personnel. L'automatisation du procédé d'affinage à l'oxygène tend à atteindre les objectifs suivants: améliorer la précision du réglage en ce qui concerne la température et l'analyse de l'acier, améliorer le rendement en lingots et la qualité de l'acier, ainsi que la productivité afin de réduire le temps passé aux corrections de température et d'analyse et, de ce fait, les frais de fabrication.

A cet effet, différentes méthodes ont été essayées et certaines solutions ont été trouvées.

La technique actuelle permet à une machine à calculer de recevoir des informations concernant les analyses des matières chargées (fonte, ferraille,

minéral, chaux, etc.), la température de la fonte, les caractéristiques d'acier désirées, et de calculer en fonction de ces données le poids de la charge et le volume d'oxygène nécessaire. Ce n'est là, toutefois, qu'un premier pas sur la voie de l'automatisation totale du processus, dont l'objectif final est le contrôle et la commande automatique des charges et de la coulée au moyen d'un circuit de réglage autonome.

Cet objectif ne peut être atteint qu'en disposant de méthodes de mesure et d'appareils de mesure appropriés donnant avec le maximum de précision, de rapidité et de régularité, les informations ou résultats de mesure nécessaires. Pour le moment, on peut employer judicieusement les méthodes de mesure suivantes pour alimenter en informations un ordinateur :

a) Mesure continue de l'analyse et du volume des gaz sortants, ainsi que les grandeurs qui en sont déduites et qui pourront servir à commander l'affinage, telles que vitesse de décarburation et répartition de l'oxygène soufflé entre la scorie métal et les gaz de combustion.

b) Mesure de la température du bain :

Pendant le soufflage de l'oxygène, la température du bain peut être mesurée à l'aide d'une sonde de couple thermoélectrique ordinaire plongée dans le convertisseur.

Il existe également des méthodes de mesure qui utilisent des lances de mesure spéciales, mais toutes les mesures de température effectuées au cours du soufflage doivent encore être considérées comme extrêmement difficiles sur le plan industriel. Ces méthodes sont intéressantes lorsque l'acier n'est affiné qu'au cours d'une seule période de soufflage et, notamment, dans le cas des grands convertisseurs qui permettent le plus facilement de compenser les coûts supplémentaires de mesure.

c) Mesure de la conductibilité électrique entre la lance de soufflage suspendue et isolée électriquement et le bain de métal (repérage électrique).

d) Mesure du grondement du soufflage dans le convertisseur (mesure du son) et/ou mesures de température des gaz sortants et établissement de courbes de température standard.

Le *tableau ci-dessous* donne une représentation schématique et très simplifiée, à l'aide d'un exemple, du processus automatique de soufflage d'une charge.

avant le chargement

Comme les poids prescrits par le calculateur ne sont pas toujours scrupuleusement respectés, toute valeur effectivement constatée (valeur réelle) est retransmise au calculateur.

Outre les indications d'ordre (date, charges, N° de convertisseur, etc.) sont introduites dans l'ordinateur: analyses, températures de la fonte, nature et analyses des éléments refroidissants (ferraille, minerai, etc). De plus, le calculateur reçoit les grandeurs recherchées: analyse et température d'acier désirées, poids de coulée, etc.

A l'aide des bilans matières et thermique, le calculateur calcule les poids nécessaires en fonte, ferraille, minerai, chaux, etc. à charger, ainsi que les volume et débit (Nm^3/mn) d'oxygène nécessaires et la position des lances.

Les données sont transmises électriquement, directement du calculateur au poste de pesée de la fonte, de la ferraille, ou au régleur de consigne des dispositifs de dosage et de réglage pour les additions de l'oxygène.

Le personnel de l'aciérie exécute le dosage et le chargement de la fonte et de la ferraille conformément aux indications reçues; l'addition des autres matières se fait automatiquement.

pendant le soufflage

Conditions de soufflage: A l'aide des mesures précitées, le calculateur règle, par les organes de commande correspondants, le débit d'oxygène, la position des lances et l'apport des additions, chaux, minerai, etc., de façon que les réactions dans le convertisseur se fassent de la façon désirée.

Les mesures suivantes sont faites de façon continue: Repérage électrique, mesure du son, mesure du volume d'oxygène soufflé, du volume et de l'analyse des gaz sortants.

Le moment de l'amorçage est déterminé par le calculateur, par l'exploitation du repérage électrique, de la mesure des volumes d'oxygène et des gaz sortants ainsi que de l'analyse des gaz sortants.

Si le calculateur constate, par exemple, un retard à l'amorçage, il prend des contre-mesures; celles-ci peuvent être un changement de position des lances et du débit d'oxygène.

Ces mesures servent au contrôle et à la commande automatique des réactions d'affinage et de la formation de la scorie.

TABLEAU

Introduction dans le calculeur

Fonctionnement du calculeur

Signaux de sortie ou indications
du calculeur**Température du bain**

Durant le soufflage, la température du bain est mesurée par une sonde de thermocouple plongée dans le bain de métal.

A l'aide de la mesure du volume d'oxygène, du volume et de l'analyse du gaz sortant, le calculeur utilise cette température du bain pour vérifier le bilan thermique du bain. S'il en déduit que la température finale sera trop élevée, il prescrit une addition de minerai.

La quantité de minerai refroidissant prescrite est introduite automatiquement dans le convertisseur.

fin du soufflage d'oxygène

Au moyen du repérage électrique et surtout des mesures des volumes et analyse du gaz ainsi que du volume d'oxygène, le calculeur détermine le moment où la teneur en carbone recherchée est atteinte dans le métal.

Il indique, ce faisant, la fin du soufflage d'oxygène, provoque le retrait de la lance du convertisseur et l'arrêt de l'oxygène.

On couche le convertisseur; des échantillons de métal et de scorie sont prélevés, et la température de l'acier mesurée.

Les analyses sont transmises au calculeur directement du laboratoire, la température directement du convertisseur.

Le calculeur évalue sur ces bases les additions en convertisseur ou en poche (ferro-alliages, etc.) nécessaires pour obtenir l'analyse désirée.

Les additions sont pesées et introduites dans le convertisseur. Après la coulée, l'opération se termine par le vidage de la scorie (en ce qui concerne l'acier; dans le cas de l'affinage de fonte Thomas, cette scorie reste dans le convertisseur pour la charge suivante).

4.2.5. Mise en œuvre pratique des procédés à l'oxygène

Pour la mise en œuvre pratique des procédés à l'oxygène pur, on a, en principe, recours aux mêmes méthodes que celles utilisées dans les aciéries traditionnelles de conversion, les aciéries Thomas.

En conséquence, une exploitation de production d'acier à l'oxygène pur exige :

- a) Dans la halle du mélangeur, sur le parc à ferrailles et dans les installations de silos à fondants et à additions : le stockage ou l'emmagasinage des matières premières (cf. chap. 4.2.2.).
- b) Dans la halle des convertisseurs : le maçonnerie du garnissage des convertisseurs, le chauffage des convertisseurs nouvellement maçonnés, le chargement des matières du lit de fusion, la conduite de l'opération, son achèvement et la coulée, l'entretien et le maintien en état du garnissage des convertisseurs.
- c) Dans la halle de coulée : le garnissage, l'entretien et la préparation des poches pour la coulée en lingots, la préparation des plaques de coulée pour la coulée en source ou des plaques de base pour la coulée directe et la mise en place des lingotières, la coulée en lingots carrés, ou méplats, ou directement en demi-produits dans les installations de coulée continue (cf. chap. 4.6.), le démoulage et le chargement des lingots, l'entretien et le maintien en état des lingotières.

Les différences apparaissent seulement dans le mode et la manière d'exécuter quelques-uns des travaux cités. Celles-ci interviennent pour le maçonnerie du garnissage des convertisseurs, le chauffage des convertisseurs fraîchement maçonnés ainsi que pour la conduite de l'opération.

Garnissage des convertisseurs

La maçonnerie réfractaire des convertisseurs à l'oxygène pur est réalisée ou bien, comme pour les convertisseurs Thomas, en briques de dolomie goudronnée crue, ou bien en briques de dolomie goudronnée dite traitée, ou encore en briques de dolomie calcinée dites superréfractaires et en pisé de dolomie goudronnée, damé. On peut aussi employer des briques et du pisé de magnésie calcinée ou des produits de magnésie goudronnée.

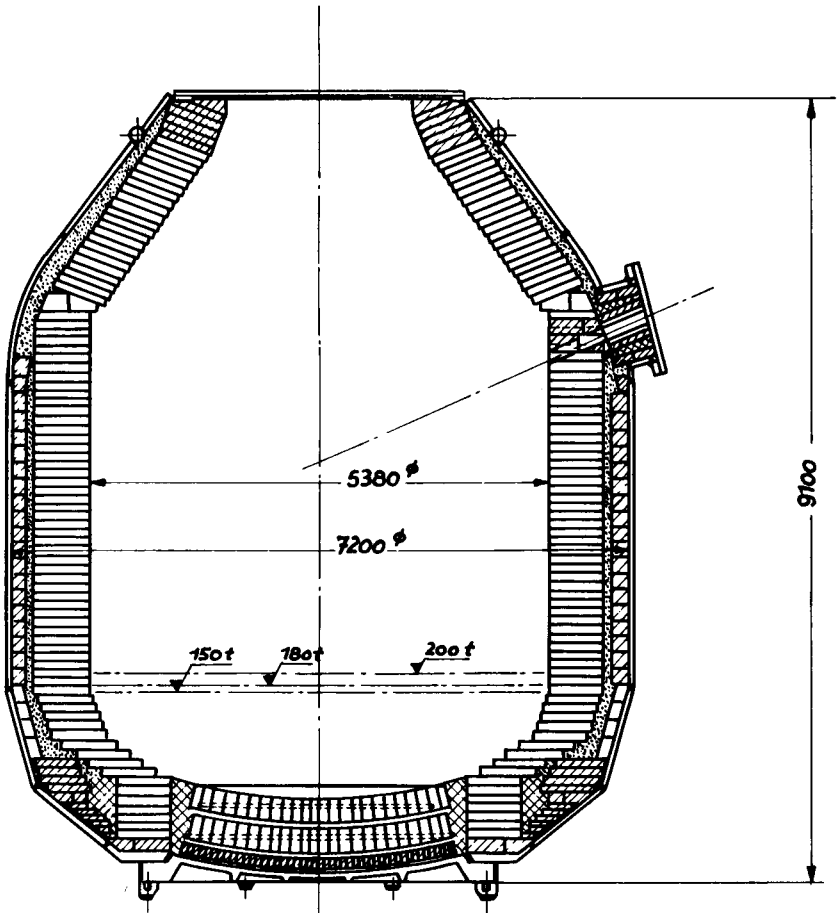


Figure 43 : Schéma du garnissage d'un convertisseur à lance verticale.

Le garnissage consiste normalement en un revêtement permanent de sécurité, appliqué directement contre la paroi intérieure de la carcasse en tôle du convertisseur. Puis vient une couche de pisé et, enfin, ce qu'on appelle la couche d'usure (figure 43).

Le matériau réfractaire de la couche de sécurité peut être constitué soit par des briques de magnésie, soit par des briques de dolomie superréfractaires. Il résiste pendant plusieurs campagnes du convertisseur, de sorte que les frais de la couche de sécurité ne jouent pas un rôle déterminant.

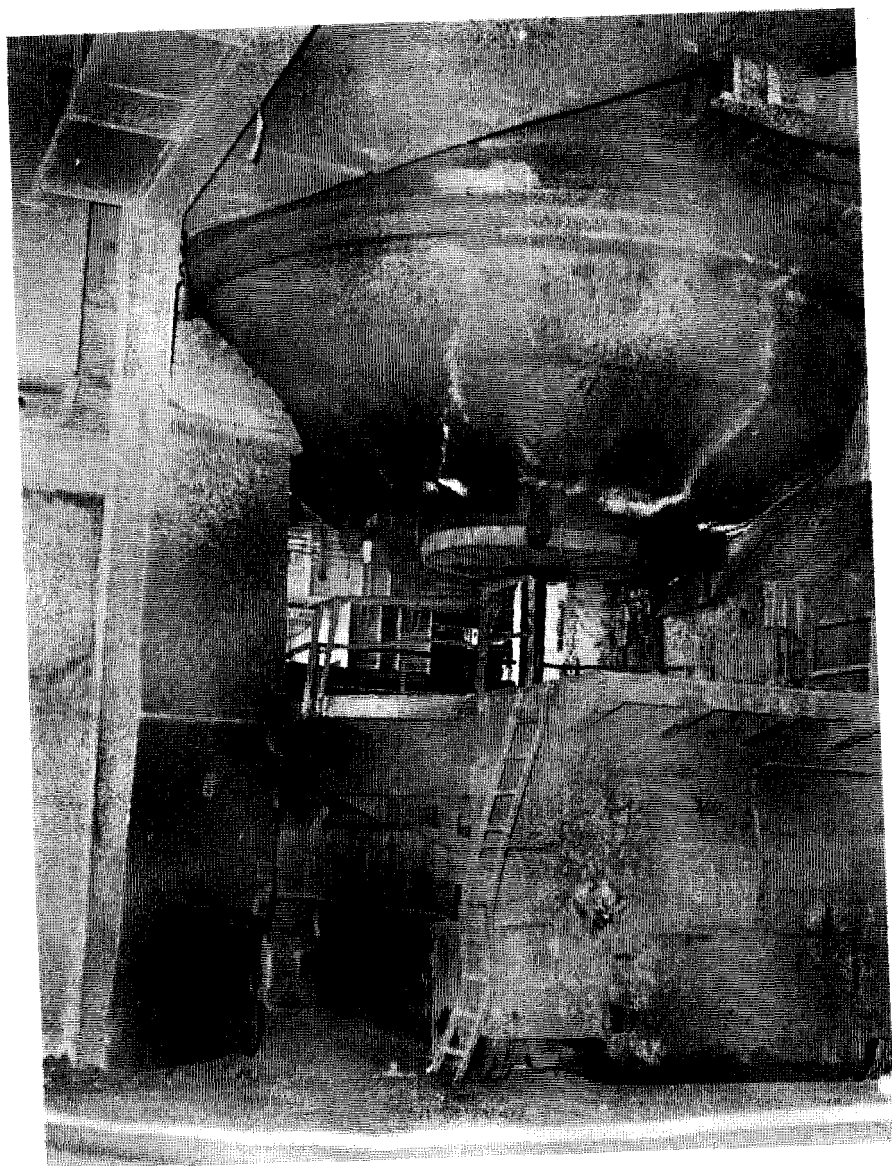


Figure 44 : Table élévatrice pour le montage et l'enlèvement de la plaque de fond.

Puis, vient une couche de pisé relativement mince entre le revêtement permanent et la couche d'usure, qui consiste en un pisé à grain fin de dolomie ou de manganèse goudronnée, avec une teneur en goudron d'environ 6 %. Cette couche est destinée, d'une part, à donner à la couche d'usure une certaine précontrainte pendant le garnissage afin que les différentes briques ne glissent pas et, d'autre part, à compenser les efforts de dilatation de la couche d'usure lors du chauffage du convertisseur.

La couche d'usure est, comme son nom l'indique, la partie de la maçonnerie qui, pendant le temps d'opération du convertisseur, donc le temps pendant lequel l'acier est produit dans l'appareil, est soumise à l'usure. L'usure est causée tantôt par les températures très élevées qui agissent sur la maçonnerie au cours de la fusion, tantôt par l'attaque chimique de la fonte liquide, mais surtout par l'attaque de la scorie liquide, par la contrainte mécanique lors du chargement des ferrailles et par la turbulence du bain lors du soufflage. A cela s'ajoutent les contraintes dues aux changements de température relativement brusques de la maçonnerie après la coulée et lors du chargement de la fonte liquide pour la coulée suivante. Quand la couche d'usure est hors d'usage aux endroits les plus éprouvés, surtout à la ligne d'affleurement de la scorie liquide et au bec, le convertisseur doit être arrêté en vue d'un nouveau garnissage.

L'épaisseur des trois couches de maçonnerie mentionnées, mais notamment de la couche d'usure, est déterminée d'après la dimension du convertisseur et les expériences faites au cours de nombreuses campagnes de l'appareil (nombre de coulées effectuées sur un revêtement permanent).

Pour l'exécution d'un garnissage de convertisseur, on commence, après mise à l'arrêt du convertisseur, par retirer la plaque de fond fixée par des clavettes. A l'aide d'une table élévatrice actionnée hydrauliquement (*figure 44*), la plaque de fond est maintenue pendant le détachement de la carcasse du convertisseur et finalement abaissée. Puis, au moyen d'une machine à arracher qui est, en principe un grand marteau pneumatique (*figure 45*), les briques de dolomie résiduelles sont arrachées du fond du convertisseur.

Pendant ces opérations, la maçonnerie, dans le convertisseur, refroidit considérablement et il se forme de grandes fissures dans la couche d'usure restante. Les fissures et, aussi, les endroits endommagés donnent de bons points de repère sur la mesure dans laquelle la couche d'usure doit être arrachée sans pour cela endommager le revêtement permanent. Particulièrement dans les grands convertisseurs, la couche d'usure se détache très fréquemment par grandes surfaces après que quelques briques aient été enlevées par la machine à arracher.

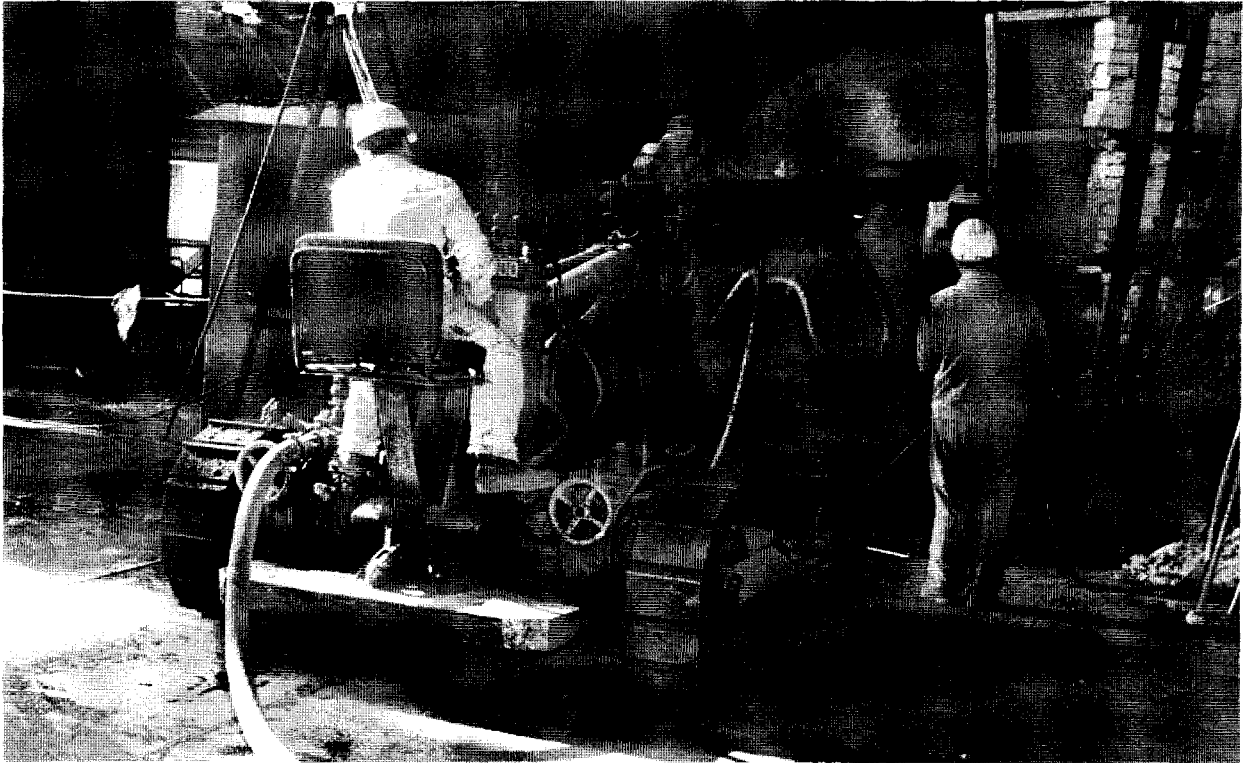


Figure 45 : Machine à arracher pour convertisseurs.



Figure 46 : Plate-forme de maçonnerie pour convertisseurs.

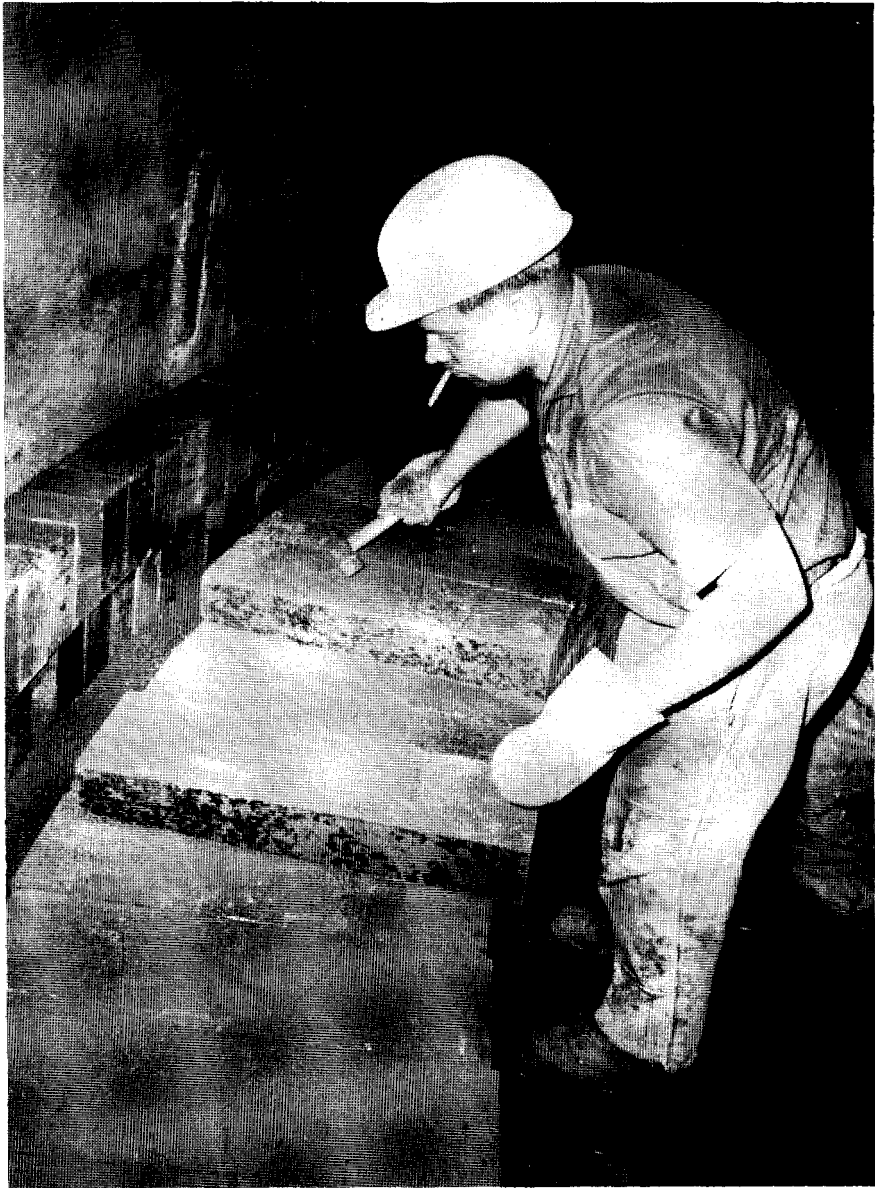


Figure 47 : Vue intérieure d'un convertisseur soufflé à lance verticale pendant le garnissage.

Après l'arrachement de la couche d'usure, une plate-forme réglable en hauteur est introduite dans le convertisseur (*figure 46*). Les types de ces plates-formes et leurs systèmes de fixation peuvent être très divers. Elles servent de plates-formes de travail pendant le maçonnerage et sont, en outre, équipées d'engins de levage pour y monter les briques réfractaires nécessaires et les pisés. Ces matériaux sont, la plupart du temps, amenés sur le lieu de travail par des chariots élévateurs.

Un maçonnerage sans lacune de la couche d'usure suppose plusieurs formats de briques en raison de la forme de la maçonnerie. En général, on emploie deux formats de conicités différentes. Ces deux formats sont préalablement triés sur les palettes. Par conséquent, une numérotation continue des palettes permet un maçonnerage sans difficultés.

Le pisé nécessaire est amené dans le convertisseur, tout comme les briques, dans des récipients, ou bien au bec du convertisseur par un convoyeur à bande. Le pisé qui tombe de la bande convoyeuse est alors amené directement à son point d'utilisation par un tube articulé.

La couche d'usure est maçonnerée par couches successives (*figure 47*), chacune d'une hauteur de brique. Le triage préalable des briques permet cette intégration sans difficultés. Lors du maçonnerage, chaque brique est frappée avec un petit marteau de bois, de sorte que les joints soient aussi étroits que possible. Quand une couche est terminée, une poudre de magnésie très fine est dispersée sur la surface des briques; en frappant légèrement avec le marteau de bois sur les différentes briques, on la fait pénétrer dans les joints encore ouverts et dans les creux. La couche maçonnerée est alors recouverte de pisé qui est damé avec des marteaux pneumatiques.

Au bord du bec (*figure 48*), on maçonnerie une couche de briques bi-coniques dont la conicité horizontale correspond à l'inclinaison du bec. Grâce à la mise en place de cette couche conique, on peut maçonner les briques perpendiculairement à la paroi du convertisseur, même au bec. Ce mode de maçonnerage assure une couche d'usure de résistance égale depuis le fond jusqu'au bec du convertisseur. Les briques de la dernière couche sont maintenues par une tôle de fer soudée à l'enveloppe du convertisseur. La tôle de fer recouvre les briques d'environ 20 %, pour les maintenir en place lors du basculement du convertisseur aux premières coulées, alors que ces briques ne sont pas encore scorifiées.

Pour le maçonnerage du trou de coulée, on dispose de briques de formes spéciales (*figure 49*). Le trou de coulée est en magnésie calcinée, plongée dans du goudron après calcination. Ce trou de coulée est maçonnerie en briques de forme, en dolomie goudronnée ou en magnésie. Le passage du trou

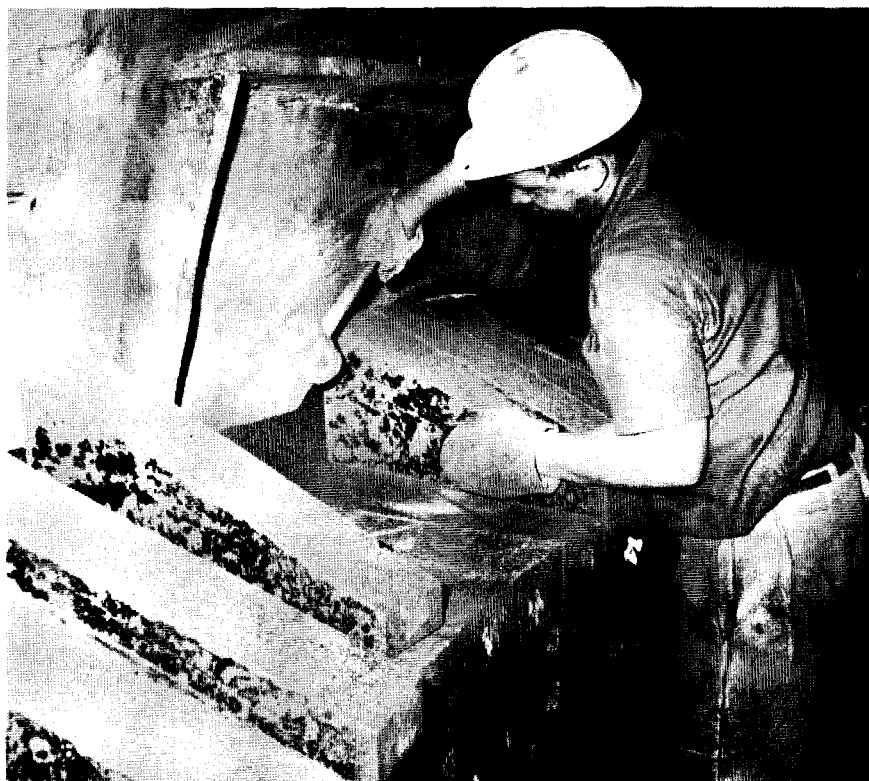


Figure 48 : Vue intérieure d'un convertisseur à lance verticale au début du garnissage du bec.

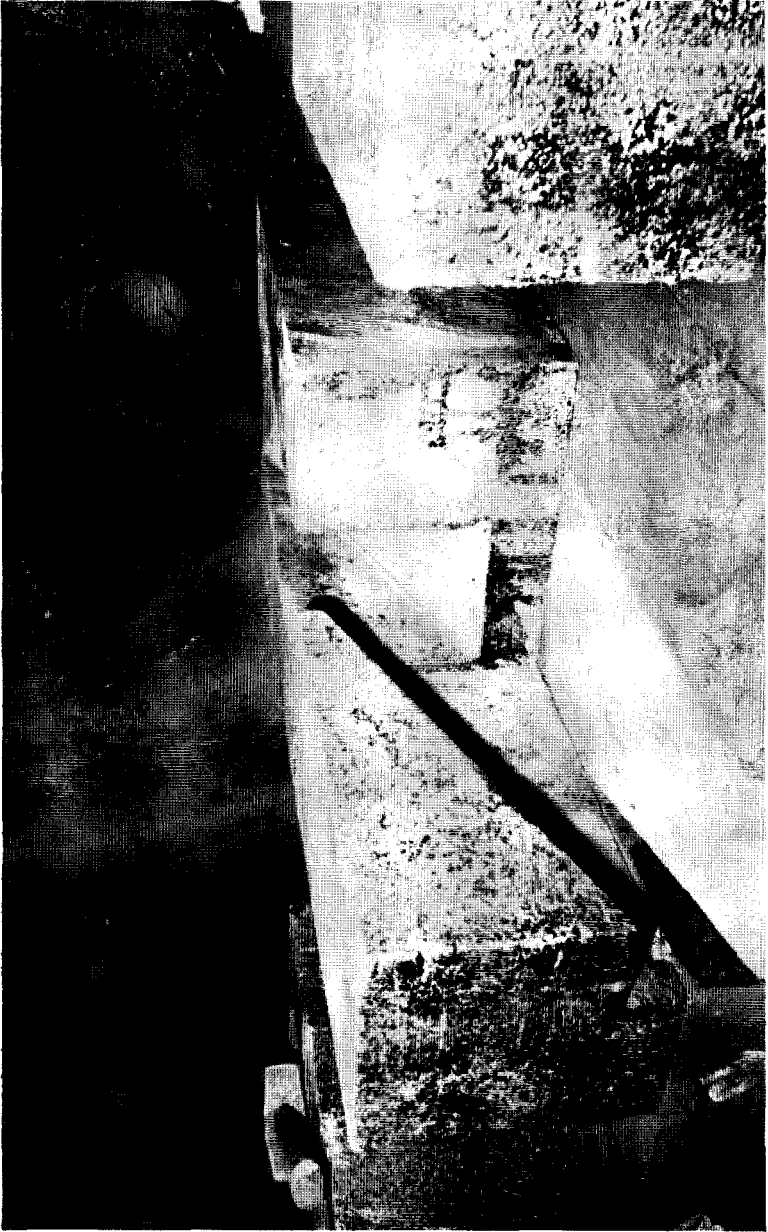


Figure 49 : Briques de forme pour le garnissage du trou de coulée.

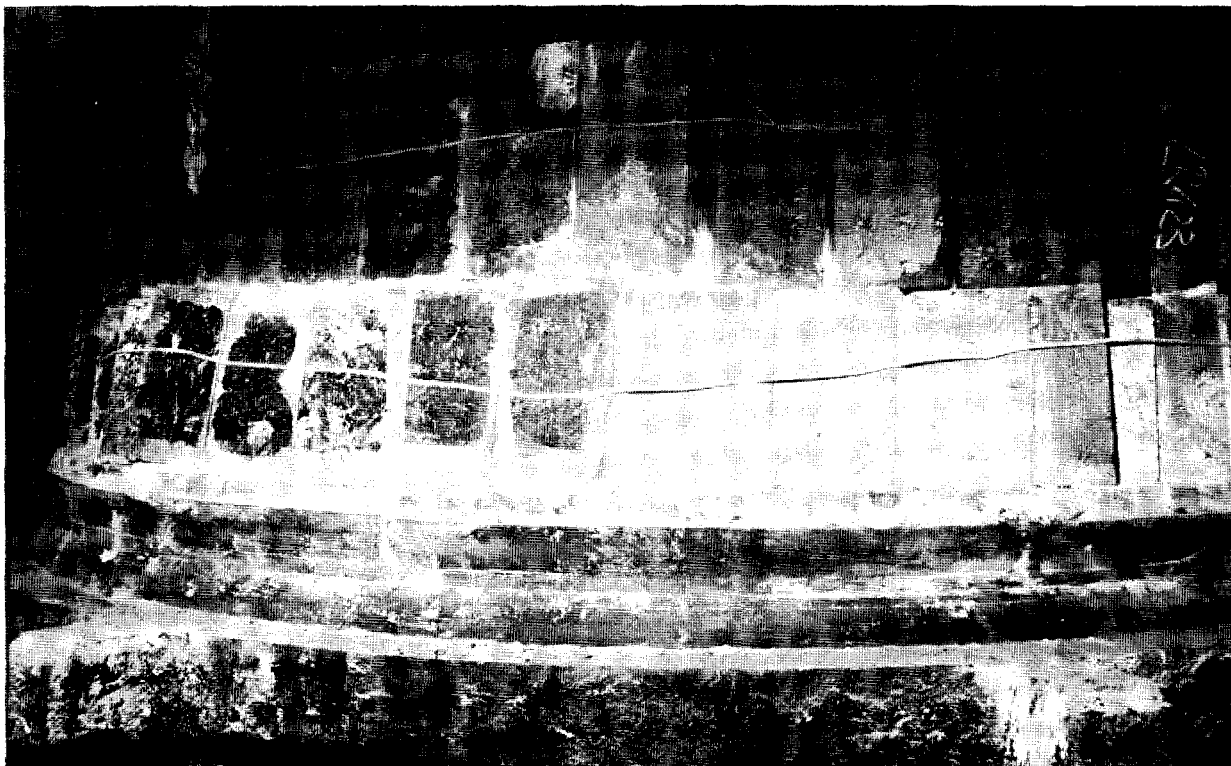


Figure 50 : Plaque de fond garnie avant montage sur un convertisseur à lance verticale.

de coulée maçonné à la couche d'usure doit être aussi continu que possible, de sorte que, là aussi, on emploie ou du pisé pour les grands convertisseurs, ou de la dolomie ou de la magnésie pulvérisée pour les joints étroits.

Le fond (*figure 50*), constitué par la plaque de fond sur laquelle sont placées deux assises à plat de briques de magnésie et deux assises de briques de dolomie ou de manganésie placées verticalement, est amené dans le convertisseur au moyen d'une table élévatrice, puis solidement claveté à l'enveloppe du convertisseur. L'espace intermédiaire, nécessaire entre le garnissage du convertisseur et la maçonnerie du fond, est rempli avec du pisé et damé à l'aide de marteaux pneumatiques.

Le garnissage des convertisseurs à l'oxygène pur, à partie inférieure amovible, s'effectue également d'après les mêmes principes (cf. chap. 4.2.1.).

Pour les convertisseurs à l'oxygène pur, à partie inférieure amovible, celle-ci est retirée avant l'arrachage; après arrachage elle est remontée, nouvellement garnie et fixée à la partie restante du convertisseur ayant subi l'arrachage. Toute l'amenée de matériaux pour le garnissage de la partie restante du convertisseur doit alors, évidemment, s'effectuer par le bec de l'appareil, ce qui, au point de vue de la sécurité de travail, est plus désavantageux que le mode opératoire précédemment décrit. Les maçons du convertisseur, avec une pareille méthode de travail, doivent être particulièrement prudents.

Chauffage du convertisseur

Après avoir terminé le maçonage du convertisseur, il faut le préparer en le chauffant. Sur le fond du convertisseur froid, on empile successivement des bûches de bois, des fagots et, suivant la grandeur du convertisseur, 2 à 3 t de coke. L'allumage se fait avec du coke incandescent jeté dans le convertisseur, peu avant le début du chauffage, pour enflammer le bois et les fagots. La forme du convertisseur, avec l'orifice relativement petit du bec, rend nécessaire un apport artificiel d'oxygène pour la combustion du coke. Cet apport d'oxygène est réalisé grâce à la lance de soufflage normale, que l'on plonge dans le convertisseur comme pour le soufflage normal. La grande capacité de réaction de l'oxygène sur le coke produit rapidement une flamme très chaude dans le convertisseur, qui déclenche alors le chauffage. A une certaine température, quand le convertisseur a été garni de dolomie ou de magnésie goudronnée, le goudron des briques du garnissage s'enflamme aussi et, par là, concourt au chauffage du garnissage du convertisseur. Pour éviter le risque d'une surchauffe locale en certains points du convertisseur, on élève et on abaisse la lance constamment. Après avoir consommé environ 1 000 m³ d'oxygène on retire la lance, on interrompt le chauffage et on

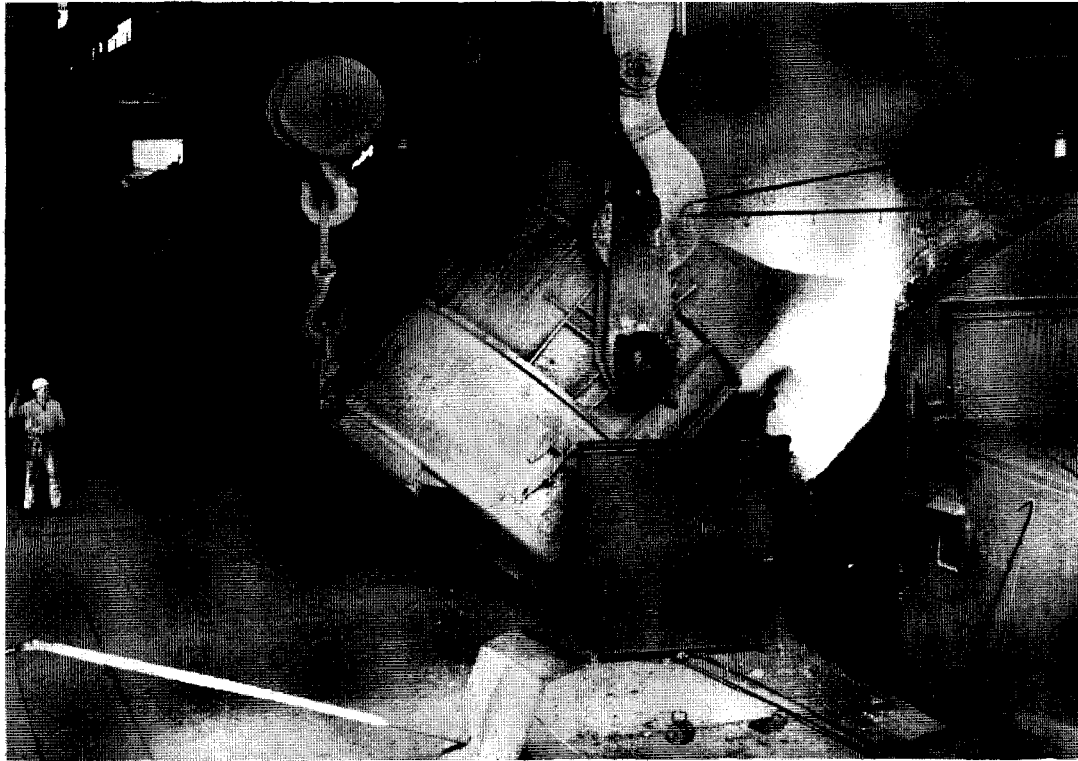


Figure 51 : Déversement de fonte dans un convertisseur à lance verticale.

recharge environ 1 t de coke. Pendant cette interruption, il s'opère un certain équilibre de température dans le convertisseur. Après le chargement du coke, le chauffage se poursuit. Ce processus se répète environ 2 à 3 fois, jusqu'à ce que le convertisseur ait atteint la température voulue.

Travaux préparatoires jusqu'au début du soufflage de la première coulée

Avant de verser la fonte pour la première coulée, le fondeur doit vérifier l'uniformité du chauffage du convertisseur et l'état de marche de l'ensemble de l'installation. Il se met d'abord d'accord avec le poste de conduite des chaudières pour s'assurer que les eaux de chaudière et de refroidissement ainsi que le système d'épuration des fumées sont prêts à fonctionner. Il contrôle également, au moyen des indicateurs de contenance des silos à bascule, les provisions de chaux, de minerai et autres matières d'addition nécessaires à une coulée. Si tout est en ordre, il bouche le trou de coulée avec un mélange de dolomie et de cendre de coke et fait verser la fonte pour la première coulée (*figure 52*). La verse de la fonte de la première coulée peut se faire relativement vite et sans mesures de précaution particulières, parce qu'on est assuré, évidemment, qu'il n'y a pas de scories oxydées. Après la verse de la fonte, le premier fondeur met le convertisseur en position de soufflage (*figure 53*), enfonce la lance et commence l'opération.

Opération de soufflage

La marche du soufflage est analogue pour les différents procédés à l'oxygène pur. Lors du soufflage de fonte hématite, pauvre en phosphore, selon le procédé LD, il faut surtout observer et contrôler la décarburation de la charge, car les teneurs en phosphore et en soufre du bain à la fin du soufflage dépendent largement de l'importance des teneurs en phosphore et en soufre de la charge. Le soufflage s'effectue donc normalement *d'une seule traite*, c'est-à-dire qu'on affine à l'oxygène jusqu'à ce que la teneur voulue en carbone soit atteinte.

L'opération de soufflage est différente quand il s'agit de fonte riche en phosphore. Ici on interrompt le soufflage au bout d'un certain temps, on enlève le laitier, on recommence à souffler après une nouvelle addition de chaux et éventuellement de fondant. L'opération de soufflage de la fonte riche en phosphore est considérablement plus difficile à contrôler qu'avec la fonte pauvre en phosphore. En conséquence, elle sera décrite plus en détail dans le chapitre suivant.

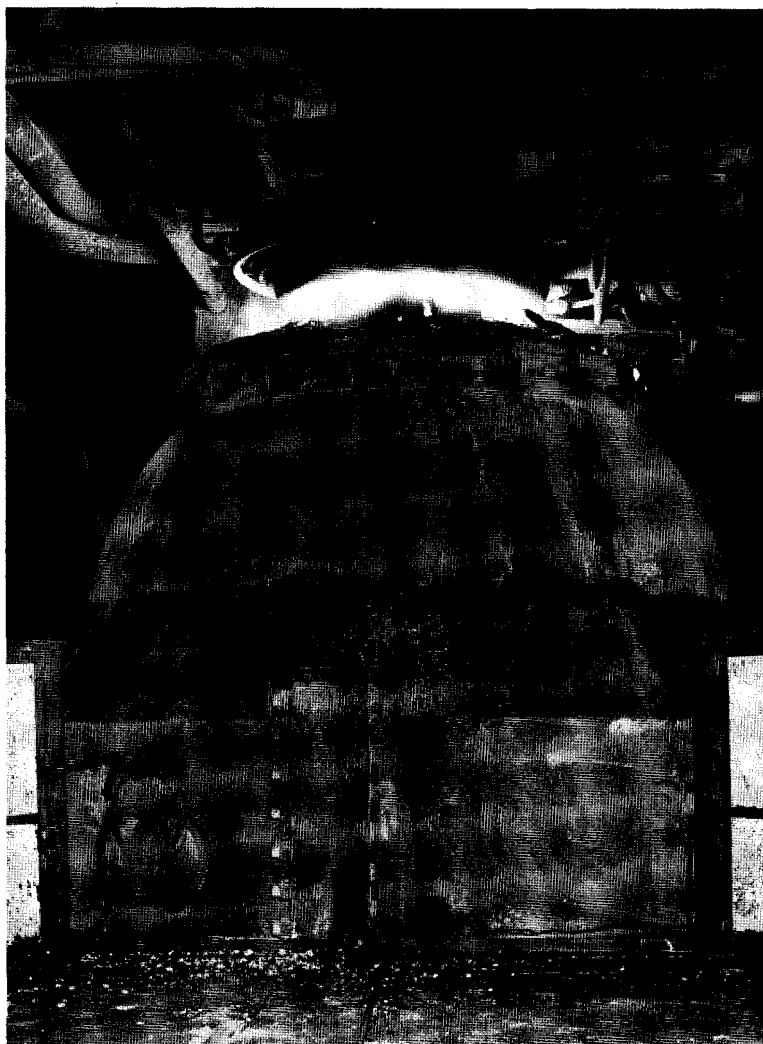


Figure 52 : Convertisseur à lance verticale en position de soufflage.

Marche du soufflage

Lorsqu'on descend la lance, les soupapes à oxygène correspondantes s'ouvrent automatiquement. Le fondeur surveille la position des soupapes au moyen des appareils indicateurs placés sur son pupitre de distribution, au poste de commande. Après l'ouverture des soupapes à oxygène, il règle la quantité d'oxygène nécessaire. On compte environ 3 m³ par minute et par tonne de fonte, autrement dit, pour 200 t, il faut une quantité d'oxygène de 600 m³/mn.

Le fondeur reconnaît la réaction de l'oxygène sur la fonte, appelée aussi allumage, à l'apparition de la flamme au bec du convertisseur. Peu de temps après l'allumage, on ajoute la quantité prescrite de chaux menue par unité de temps (cf. chap. 4.2.1.). Les quantités de chaux par mètre cube d'oxygène, réglées par le fondeur, sont contrôlées avec précision par un système de réglage, cependant que le fondeur doit couramment s'assurer, au moyen des indicateurs correspondants, de l'exactitude des additions. Les réactions dans le convertisseur sont influencées par les conditions de cette addition et par la distance de la lance. C'est pourquoi le fondeur dispose d'installations de surveillance pour le contrôle des réactions (cf. chap. 4.2.4.). En outre, l'observation directe de la projection des scories au bec du convertisseur fournit une indication sur la formation du laitier dans le convertisseur. Comme les quantités d'oxygène et de chaux par unité de temps sont, le plus souvent, données d'avance, le fondeur doit conduire la marche de l'affinage, le plus possible, en réglant la distance de la lance. Le soufflage doit être conduit de telle façon qu'il se forme très tôt un laitier moussant qui remplisse le volume total du convertisseur sans, pour autant, déborder du bec. On peut estimer à peu près la hauteur du laitier dans le convertisseur d'après les bruits qui s'y produisent. Plus le laitier s'élève dans le convertisseur, plus faibles sont les bruits, ceci est dû à l'amortissement du son par le laitier moussant. En même temps, la projection de scories diminue.

En outre, il est possible, par une analyse constante des fumées du convertisseur, de calculer la combustion de carbone par unité de temps. Une intégration de ces valeurs permet de calculer la quantité de carbone brûlée pendant le soufflage (cf. chap. 4.2.4.). Le fondeur a ainsi la possibilité de déterminer le point d'arrêt des première et seconde périodes de soufflage (cf. chap. 4.2.3.) pour une teneur en carbone déterminée, c'est-à-dire que, même avec une répartition inégale d'oxygène entre le laitier et le bain d'une coulée à l'autre, il peut toujours procéder au décarburage, avec la teneur voulue en carbone du bain. Après la première période de soufflage, le fondeur retire la lance, et les registres à oxygène se referment automatique-

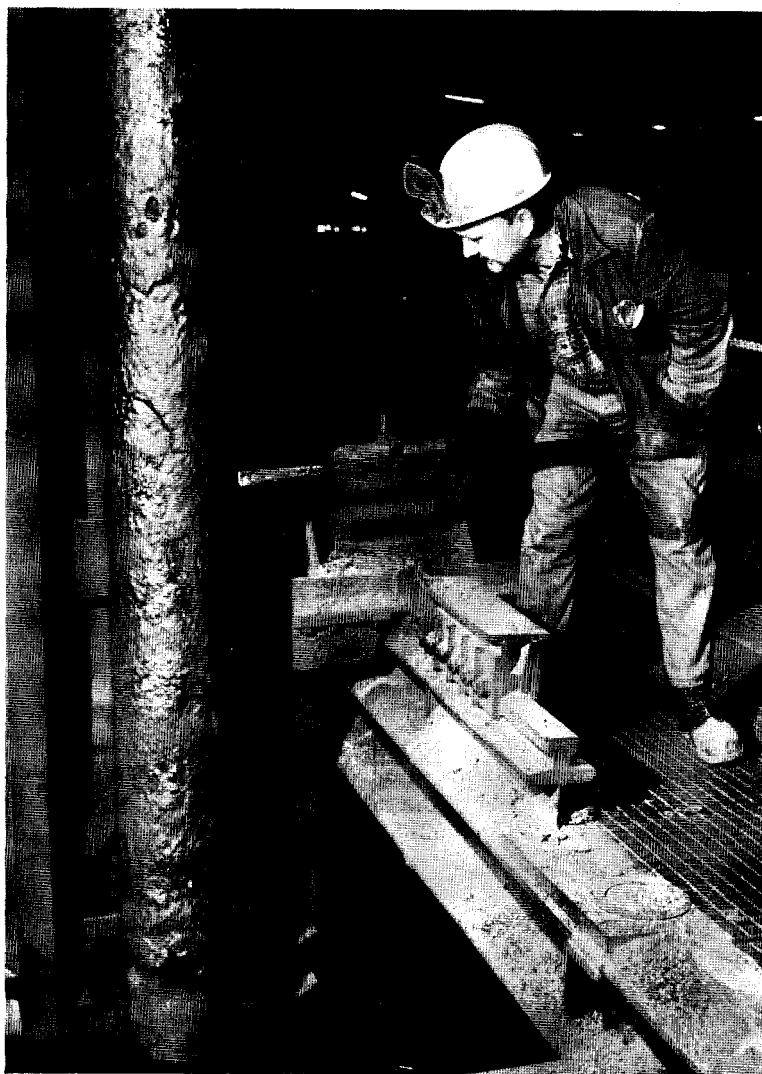


Figure 53 : Lance de soufflage avec projections d'acier et de laitier adhérentes.

ment. Il examine la lance pour voir si des lousps s'y sont déposés, c'est-à-dire si une couche d'acier ou de laitier s'est déposée sur l'enveloppe refroidie de la lance (*figure 53*). Nous reviendrons en détail sur les mesures pour éliminer ces lousps. Après l'enlèvement de la lance, le fondeur fait basculer lentement le convertisseur (*figure 54*) de sorte que le laitier puisse s'écouler continuellement (*figure 55*). Après la première période de soufflage, le laitier doit être éliminé dans la plus large mesure possible. Pour le contrôle, il est utile de peser le laitier pendant le décrassage. Le fondeur peut calculer la quantité minimale à décrasser sur la base de sa charge en chaux. Le niveau du décrassage est disposé de telle façon au convertisseur que, pendant l'opération, on peut voir en dessous du laitier qui s'écoule, de sorte qu'on s'aperçoit immédiatement que de l'acier commence à passer avec le laitier. Pendant le décrassage, on jette du sable dans la cuve à laitier, pour éviter le moussage du laitier. Après le décrassage, on prélève un échantillon d'acier et un de laitier (*figure 56*). Comme l'échantillon d'acier fournit les bases de calcul pour la quantité d'oxygène et la charge froide pour la deuxième période de soufflage, il doit être prélevé avec un soin particulier. La louche de prise d'échantillon doit être bien recouverte de laitier avant d'être plongée dans le bain d'acier, autrement dit, elle doit être entièrement enrobée d'une couche de laitier. En outre, l'échantillon d'acier liquide prélevé doit être couvert de laitier. L'échantillon dans la louche doit être calmé aussi vite que possible: on y plonge un fil d'aluminium avant de le couler dans une petite lingotière de cuivre ad hoc. Lors de la coulée dans la lingotière de cuivre (*figure 57*), il faut éviter tout entraînement de laitier, sinon le laitier réagirait sur l'acier calmé, et la composition de l'échantillon pourrait être considérablement altérée. L'échantillon, après solidification dans la lingotière, est expédié au laboratoire par tube pneumatique. Après le prélèvement de l'échantillon, on mesure la température du bain au moyen d'un thermocouple (*figure 58*). La température du bain, elle aussi, doit être prise en compte pour le calcul de la charge en produits refroidissants pour la deuxième période. Le maniement correct du chariot de prise de température est contrôlé automatiquement dans la plus large mesure possible (cf. Volume 1, chap. 2.1.3.). Avant chaque mesure, un nouveau thermocouple, qui est fixé à l'extrémité d'une enveloppe en carton, est branché par le fondeur sur le bras de mesure proprement dit. L'établissement d'un contact correct entre le thermocouple et la ligne qui le relie à l'appareil indicateur se manifeste au fondeur par un signal lumineux. Le fondeur se rend alors avec le chariot devant le convertisseur et plonge l'élément proprement dit dans le bain. Il est avisé de la durée nécessaire à une mesure exacte par un signal acoustique. Il peut alors lire la température mesurée sur un appareil enregistreur. Il reçoit, par ailleurs, les valeurs d'analyse de son échantillon,

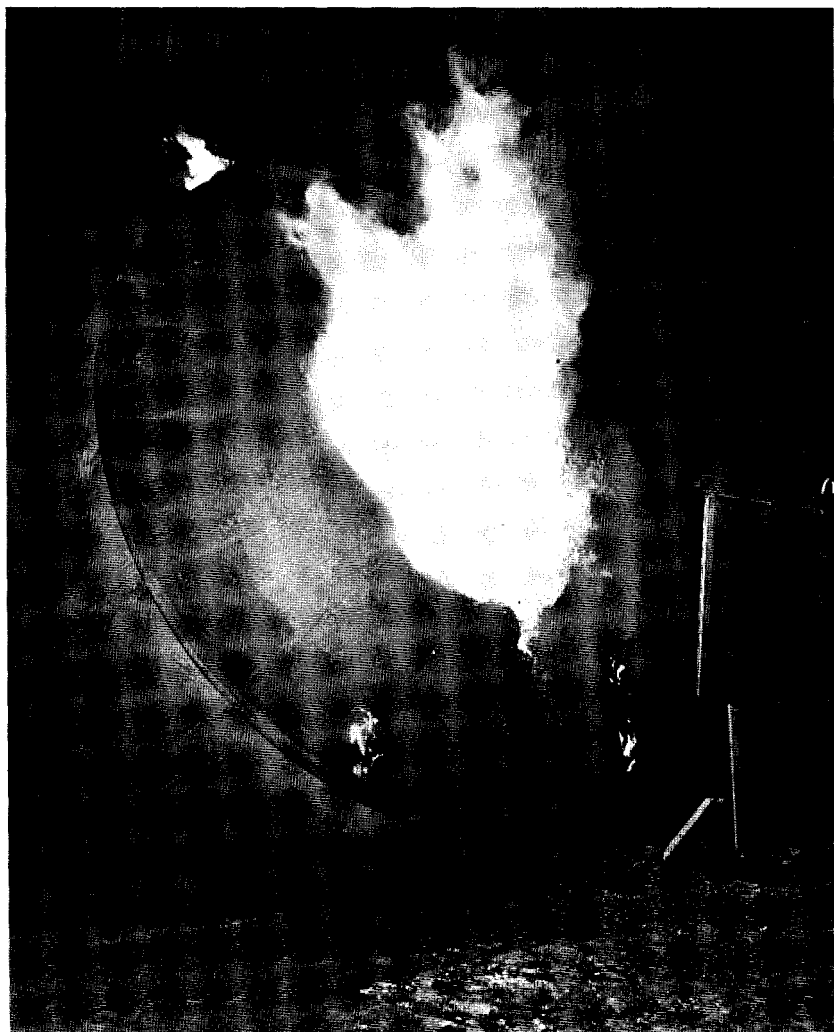


Figure 54 : Convertisseur à lance verticale pendant le basculement pour le décrassage.

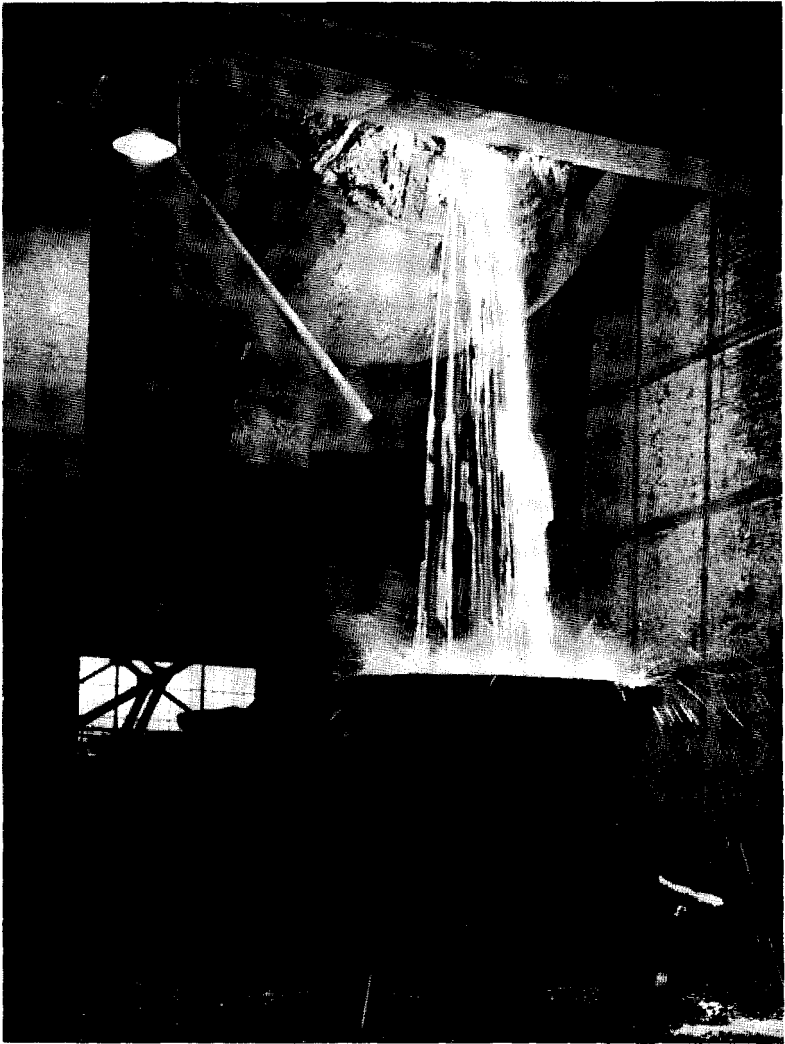


Figure 55 : Convertisseur à lance verticale pendant le décarbage.

que le laboratoire indique par téléspecteur. Sur la base des résultats de mesure et d'analyse, il peut alors déterminer, par exemple à l'aide de tableaux, la quantité d'oxygène et la charge refroidissante nécessaire pour la deuxième période de soufflage. Les valeurs des tableaux lui indiquent les quantités par tonne d'acier, ce qui l'oblige à les multiplier par la charge



Figure 56 : Prélèvement d'un échantillon d'acier dans un convertisseur à lance verticale.

du convertisseur. Ce procédé quelque peu incommode peut être simplifié au moyen d'une machine à calculer. On introduit dans cette machine les valeurs trouvées et les quantités fixées ainsi que les valeurs désirées. La machine indique alors les valeurs exigées pour la coulée terminée. A l'aide du pont de levage, le fondeur charge alors dans le convertisseur (*figure 59*) les quantités de ferrailles qu'il a calculées et commence la deuxième période de soufflage.

La courte durée de la seconde période de soufflage exige un soin particulier de la conduite du laitier. Le fondeur doit très rapidement, à l'aide de la position de la lance, viser à produire un laitier moussant afin d'obtenir, à la fin de la seconde période de soufflage, les compositions de bain et de laitier désirées. Même de faibles erreurs de conduite du laitier de la deuxième période de soufflage peuvent rendre indispensable une correction qu'il vaut mieux ne pas faire.

Lorsque la deuxième période de soufflage est terminée, le fondeur retire la lance du convertisseur et en change la position afin d'opérer de nouveau un prélèvement d'échantillon et une mesure de la température. Pendant la durée de l'analyse de l'échantillon au laboratoire, le fondeur exécute les préparatifs de coulée. Il s'assure de la quantité des additions nécessaires en poche et se prépare à couler. Il faut d'abord dégager le trou de coulée, puis le reboucher avec de la laine de verre qui, lors du basculement du convertisseur, permet d'assurer une coulée aussi exempte de laitier que possible. Si, pendant le soufflage, du laitier adhérant à l'enveloppe du convertisseur ou répandu en dessous doit être éliminé afin que le chariot sur rails véhiculant la poche de coulée ne soit pas gêné dans sa circulation. Si tous les préparatifs ont été faits soigneusement et si le bain est conforme aux analyses et températures voulues, on peut alors commencer la coulée.

Après avoir amené le chariot de coulée sous le convertisseur, celui-ci doit être incliné pendant la coulée (*figure 60*) de telle façon que l'acier s'écoule sans laitier hors du trou de coulée. Le chariot de coulée doit suivre synchroniquement le mouvement de bascule du convertisseur, afin que le jet tombe toujours au centre de la poche de coulée. Lorsque la poche a été remplie environ d'un tiers, le fondeur y ajoute les alliages et les désoxydants nécessaires. Peu avant la fin de la coulée, il verse au moyen d'une goulotte de la menue de chaux dans la poche afin de neutraliser les résidus de désoxydation qui se forment, et figer, s'il le faut rapidement, le laitier qui pourrait être entraîné en fin de coulée, en dépit de toutes les mesures de précaution prises. Faute d'addition de menue chaux, ce laitier de poche est très facilement réactif et il attaque le garnissage de la poche aussi bien que la que-

nouille. Pour éviter que la quenouille ne se bloque dans la couche de laitier qui se forme, il faut, après la fin de la coulée, répandre un peu de menu coke autour de la quenouille.

Après la coulée, le fondeur vérifie le garnissage du convertisseur, surtout aux endroits endommagés. Il faut accorder une attention toute particulière



Figure 57 : Coulée de l'échantillon d'acier dans la lingotière à échantillon.

au trou de coulée, pour déterminer jusqu'à quel point il s'est évasé en forme d'entonnoir dans le garnissage du convertisseur. En outre, le bec du convertisseur doit être nettoyé au cas où des loups d'acier ou de laitier s'y seraient déposés. Les dépôts plus importants de laitier sont enlevés à l'aide du pont à ferrailles ou à fonte en employant des dispositifs idoines.

Avant le début de la coulée suivante, le fondeur charge environ 10 % de la quantité de chaux en morceaux, pour figer le second laitier quelque peu réactif. En outre, il doit charger une partie des ferrailles nécessaires avant le remplissage de fonte. Malgré ces mesures de précaution, il doit agir avec le plus grand soin lors du chargement de la fonte. Au début, la fonte doit être versée très lentement parce que le carbone qu'elle contient réagit très fortement dans le convertisseur avec le laitier restant de l'opération précédente et qui a une haute teneur en oxyde de fer. Le fondeur reconnaît l'intensité de la réaction à la flamme qui sort du bec du convertisseur. Si cette flamme n'apparaît pas au début, il faut interrompre le remplissage et «balancer» le convertisseur afin de déclencher la réaction. On ne peut accélérer la vitesse du remplissage que quand la réaction du carbone s'est pleinement établie. Il est indiqué, lors du remplissage de la fonte, d'incliner le plus possible le convertisseur afin d'obtenir une surface de réaction laitier-fonte aussi grande que possible. Après le déversement complet de la fonte, on charge la ferraille restante et l'on peut commencer l'opération de soufflage.

Entretien du bec et du trou de coulée

L'entretien du convertisseur proprement dit au cours d'une campagne se borne essentiellement au trou de coulée et au bec. En ce qui concerne le trou de coulée, on distingue entre un élargissement du trou de coulée proprement dit et un affouillement en entonnoir dans le garnissage du convertisseur. Le fondeur doit surveiller attentivement les deux phénomènes. Si la durée de la coulée lui fournit une indication approximative pour la dimension du trou de coulée, il ne peut surveiller l'évasement en entonnoir dans la maçonnerie du convertisseur que par des observations répétées après chaque coulée.

Dans le cas d'un élargissement normal du trou de coulée, il faut garnir soigneusement la partie avoisinante d'un mélange de dolomie goudronnée ou de pisé de magnésie, à des intervalles de deux à trois coulées. Il faut ici avoir soin que les pisés soient uniformément répartis. Les irrégularités d'usure conduisent le plus souvent, lors de la coulée suivante, à des affouillements, plus prononcés dans différents endroits, dont l'élimination n'est

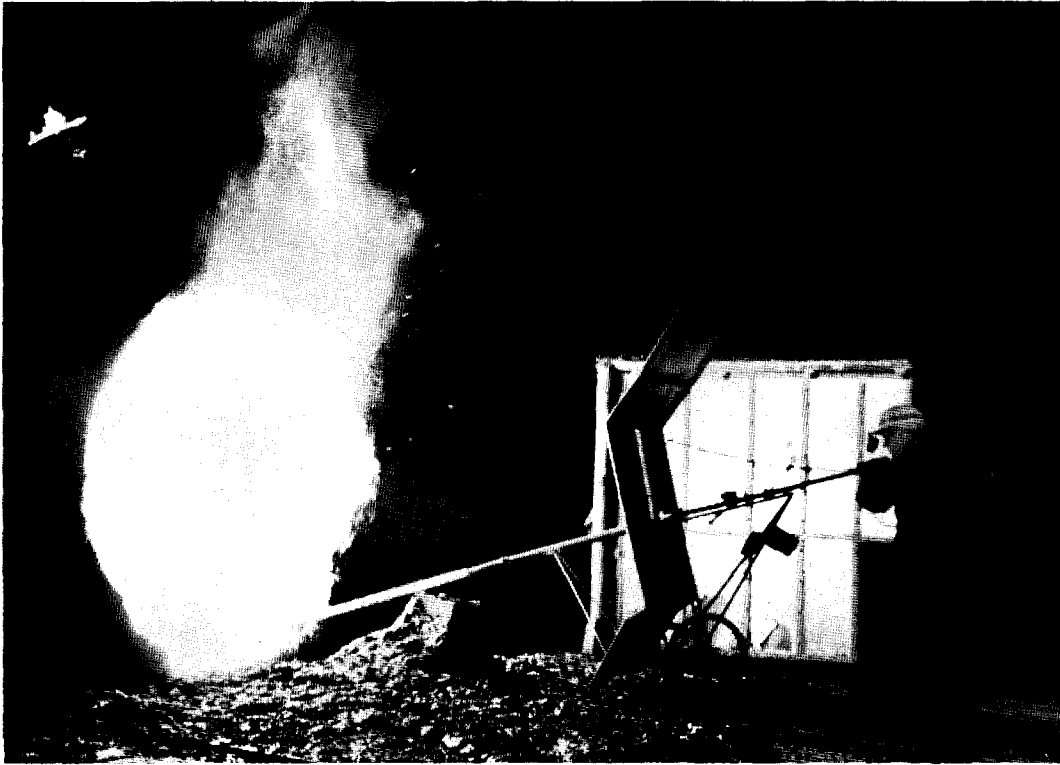


Figure 58 : Mesure de la température du bain dans un convertisseur à lance verticale.

possible qu'au prix de réparations plus importantes et donc, de la prolongation des arrêts du convertisseur.

Tandis que ce genre de réparation peut s'exécuter pratiquement en exploitation courante sans trop de perte de temps, on ne peut remédier à un évasement en entonnoir du trou de coulée à l'intérieur du convertisseur qu'après avoir arrêté celui-ci. Cette importante réparation doit être soigneusement préparée; autrement dit, tous les matériaux nécessaires à la réparation doivent être apprêtés pendant que s'effectue la dernière coulée. Outre la perte de temps à éviter, la réparation doit être effectuée dans un convertisseur très chaud afin que les pisés réfractaires mis en place puissent adhérer immédiatement à la maçonnerie existante. Après la dernière coulée, le convertisseur est complètement vidé, y compris le laitier. Ensuite, le trou de coulée est complètement débarrassé des résidus de laitier ou d'acier qui y collent, de façon que la surface intérieure soit de nouveau un garnissage de dolomie sain. Après ces travaux préparatoires, le fondeur monte une sorte de gabarit constitué par un tube de fer qui a le diamètre du nouveau trou de coulée. Le tube de fer doit dépasser quelque peu à l'extérieur comme à l'intérieur du convertisseur. Le tube de fer est serré par pilonnage exécuté de l'extérieur avec un mélange de dolomie et de goudron. Il est calé au moyen de coins en dolomie et, en même temps, centré. On bascule alors le convertisseur jusqu'à amener ce tube à la verticale. Finalement, la zone d'alentour est revêtue, de l'intérieur, d'un pisé de magnésie. Ces travaux doivent être menés très rapidement pour que le pisé mis en place puisse se souder à la dolomie grâce à la chaleur emmagasinée par le garnissage du convertisseur. Après la réparation, le convertisseur doit rester encore environ 20 minutes dans cette position pour permettre la liaison du pisé mis en œuvre en dernier lieu. Avant la remise en marche, le fondeur vérifie avec une barre de fer si le pisé est entièrement solidifié. Quand les réparations sont trop tardives, on doit souvent amener une telle quantité de pisé que le volant de chaleur du convertisseur ne suffit plus à assurer la prise. En pareil cas, on est obligé de recommencer la réparation après quelques coulées, ce qui conduit encore à un arrêt prolongé. Cette deuxième réparation indispensable est très souvent plus difficile que la première parce qu'une partie du pisé de réparation se désagrège, encombre le trou de coulée et, de ce fait, crée de sérieuses difficultés à l'introduction du tube de fer à travers le pisé solidifié restant. En conséquence, le trou de coulée doit être d'abord dégagé. Si le convertisseur refroidit trop pendant cette opération, il faut le réchauffer avec une flamme de gaz de four à coke après réparation du trou de coulée, ce qui conduit à une perte de temps importante. Si la réparation du trou de coulée est entreprise trop tôt et si la distance entre le tube rapporté et le garnissage de dolomie est trop minime, on

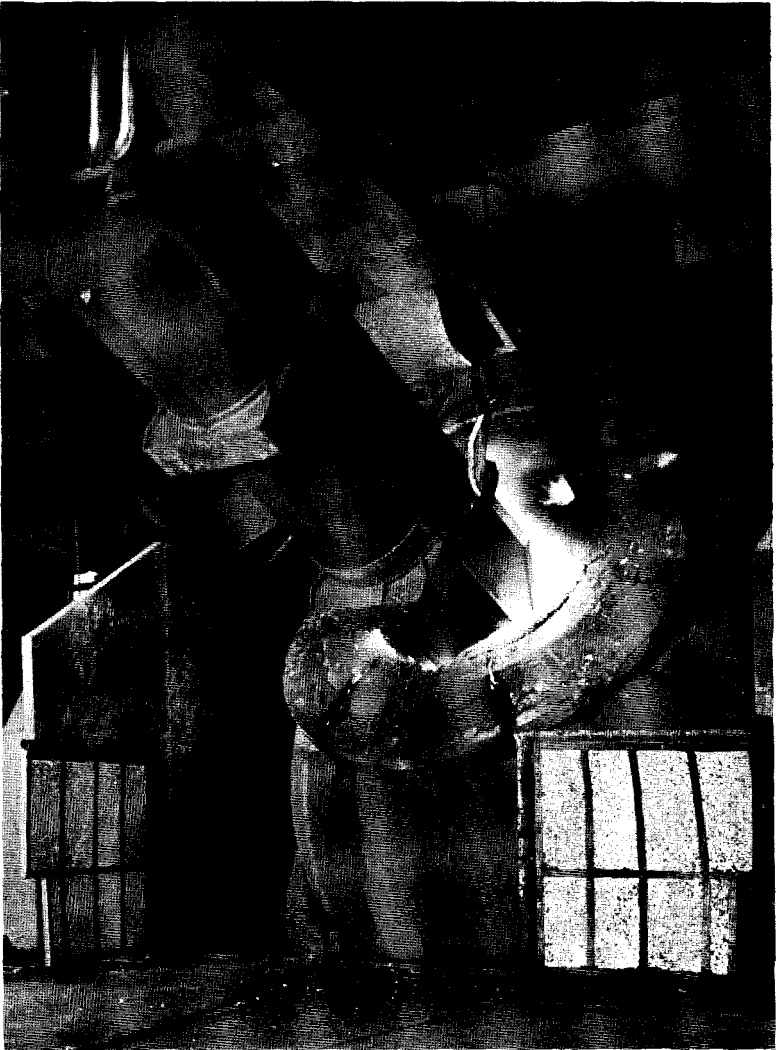


Figure 59 : Chargement de ferrailles dans un convertisseur à lance verticale.

court le risque que le pisé réfractaire mis en place ne remplisse pas complètement tous les vides. Dans ce cas, il se produit souvent une usure irrégulière du trou de coulée et il faut alors recommencer la réparation.

Ainsi que le trou de coulée, le bec du convertisseur réclame la plus grande attention. En raison du système de maçonnerie du convertisseur, par anneaux successifs superposés dont les briques se soutiennent mutuellement, les briques du bec manquent d'appui sur un côté. En outre, le pilonnage de la dolomie goudronnée confère à la couche d'usure une certaine précontrainte qui ne s'exerce plus que faiblement dans les dernières couches. La dernière couche n'est pratiquement maintenue que par un étroit entourage d'acier soudé à l'enveloppe. Dès lors, si cette première couche est endommagée lors de l'enlèvement des lousps ou lors du chargement de ferrailles, elle doit être réparée sans délai. Suivant l'étendue des dégâts, il faut, le cas échéant, remplacer une partie de l'entourage d'acier afin que les rouleaux de briques du bec soient soutenus. Souvent grâce à une réparation du bec en temps utile, la campagne du convertisseur peut être notablement prolongée. Avec les anciens convertisseurs à maçonnerie relativement mince, les couches de briques supérieures pouvaient s'écrouler parce que la cornière d'arrêt était endommagée et par là, motiver l'arrêt du convertisseur. C'est pourquoi il incombe au fondeur, notamment dans la seconde moitié de la campagne du convertisseur, de surveiller étroitement toute la maçonnerie. Normalement, il faut regarnir le convertisseur quand la couche d'usure est complètement hors d'usage en un endroit. Une avarie au garnissage permanent y rend souvent nécessaires des réparations importantes. Comme fréquemment on utilise pour le garnissage permanent des briques de dolomie ou de magnésie calcinée superréfractaires, on augmente ainsi considérablement les frais de réparation.

La lance

Outre le convertisseur, la lance de soufflage d'oxygène est l'outil le plus important du fondeur: elle exige de sa part autant de soin et d'attention qu'il en consacre au convertisseur. Suivant le mode de construction de la lance et la technique de soufflage adoptée, des croûtes de laitier ou d'acier peuvent adhérer au tube d'enveloppe de la lance refroidie à l'eau. Les croûtes d'acier, appelées aussi lousps, sont formées par de très nombreuses petites projections qui refroidissent quelque peu, puis s'agglomèrent. S'il y a d'abord une croûte mince, l'action refroidissante ne peut plus s'exercer aussi efficacement sur les particules d'acier qui s'y déposent, de sorte que ces dernières s'y soudent régulièrement. Le fondeur doit donc, quand des croûtes minces se sont formées, les enlever immédiatement car, pour les

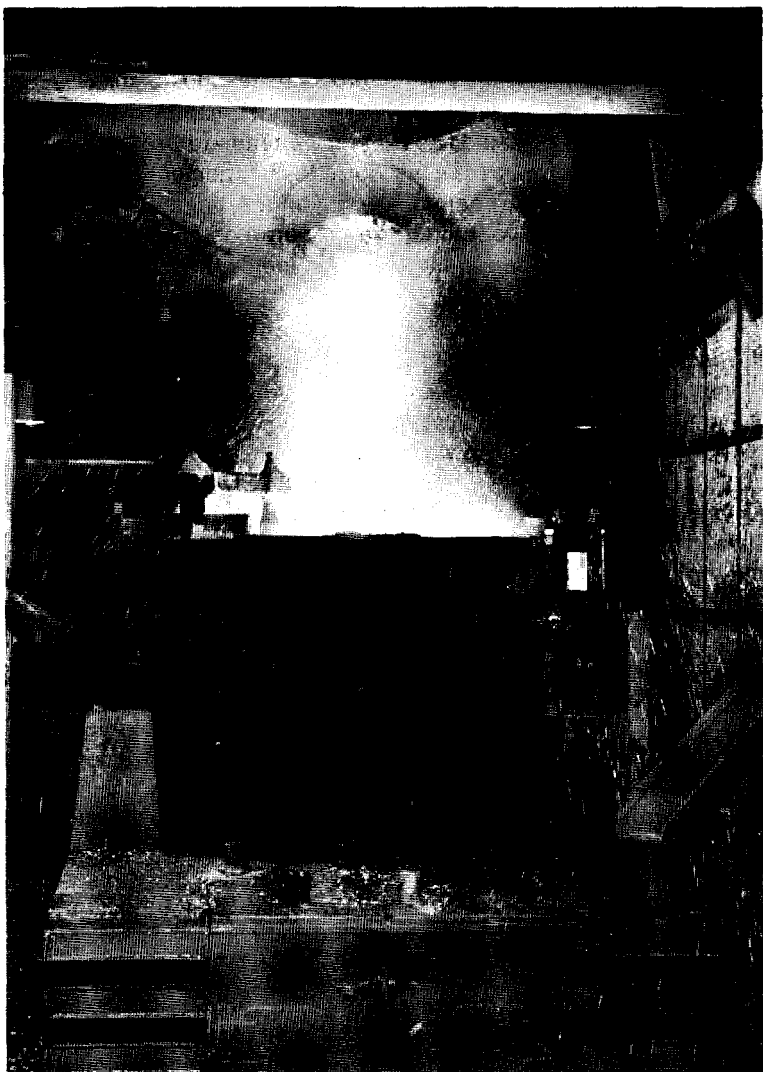


Figure 60 : Déversement dans une poche de coulée d'une coulée de convertisseur à lance verticale.

loups épais, le nettoyage prend plus de temps qu'un changement de lance complet. Pour se débarrasser des loups, le fondeur dispose de plusieurs moyens. S'il s'agit de laitier, il suffit, la plupart du temps, d'un arrosage à l'eau des loups incandescents. Quant aux minces lousps d'acier, le fondeur peut les fendre à chaud à l'aide d'un marteau pneumatique : lors de l'introduction dans le convertisseur, la variation de température les dilate et les fait tomber. Pour les lousps très épais, outre le changement de lance, il reste la ressource de les brûler au chalumeau oxyhydrique, un par un. En pareil cas, il convient d'apprécier si l'opération ne prendra pas plus de temps que le changement de lance, afin que la durée de l'incident soit aussi courte que possible.

Comme il a déjà été dit, dans l'opération de soufflage, le processus métallurgique est influencé par la distance de la lance (distance de l'extrémité de la lance à la surface du bain). En pratique, cette distance se modifie, au cours d'une campagne, en fonction de l'usure de la maçonnerie car, pour un poids de charge constant, la surface du bain descend et, par conséquent, augmente la distance de l'extrémité de la lance. Outre cette variation naturelle, des influences d'ordre mécanique, comme l'allongement du câble de soutien, le dérèglement d'un appareil indicateur de position, etc., peuvent agir sur la position de la lance; il est donc nécessaire de la contrôler, à espaces de temps déterminés. Le fondeur fixe la distance normale au début de chaque campagne de convertisseur. La mesure la plus simple et la plus connue consiste à fixer une tige à l'extrémité de la lance au moyen d'un système de serrage. Le fondeur descend alors la lance dans le convertisseur jusqu'à ce que la tige plonge dans le bain, puis il note l'indication de la position. Enfin, il retire la lance et détermine la distance entre son extrémité et la marque de repère que l'acier liquide a laissée sur la tige. Il compare cette distance mesurée avec la valeur qu'il a lue sur l'indicateur de position. Si les valeurs diffèrent, il corrige alors l'indicateur de position. Si des différences notables apparaissent à la mesure, le fondeur doit exécuter de la même manière une nouvelle mesure de contrôle à la coulée suivante.

Arrêts du convertisseur les dimanches et jours fériés

Lors des interruptions de travail prolongées comme, par exemple, les dimanches et jours fériés, ou lors de grosses réparations à la partie mécanique de l'installation, le convertisseur doit être maintenu chaud. Le procédé le plus simple de maintien à température consiste à couvrir le convertisseur immédiatement après la dernière coulée, avec un couvercle. Ici, il est important que ce couvercle ferme hermétiquement le bec du convertisseur afin qu'il ne puisse y pénétrer une quantité d'air notable. Le convertisseur étant incliné, le fondeur dispose le couvercle de telle façon qu'il pèse de son

propre poids sur le bec. En outre, le joint couvercle-bec du convertisseur doit être étanchéifié avec du pisé réfractaire. Lors des arrêts très longs, dépassant 24 heures, en dépit de sa fermeture hermétique, le convertisseur devient trop froid, autrement dit, différents endroits sont déjà noirs. En pareil cas, le convertisseur doit être réchauffé avec environ 2 t de coke et de l'oxygène.

La technique de réchauffage correspond alors au chauffage après un nouveau garnissage. Si l'on néglige ce réchauffage, il se produit souvent un éclatement plus prononcé de la couche d'usure lors de la première coulée.

Perturbations intervenant pendant la marche du soufflage

Une perturbation qui se présente toujours lors de l'exploitation des cornues à l'oxygène pur est l'allumage défectueux du convertisseur, c'est-à-dire que la réaction carbone-oxygène ne s'établit pas. Si cela se produit dès le premier soufflage, les morceaux de ferraille les plus gros placés directement sous la lance en sont souvent la cause. Le fondeur doit alors retirer la lance encore une fois et incliner le convertisseur le plus bas possible en évitant que la fonte ou le laitier ne s'échappent. Normalement, la ferraille se déplace quelque peu par le mouvement du convertisseur, de sorte qu'au début du soufflage suivant, la charge s'allume. Lors des perturbations imprévues plus prolongées qui interviennent pendant une coulée, il arrive souvent que le laitier se solidifie ainsi qu'une partie de la fonte, de sorte que l'allumage, lors de la remise en marche, est pratiquement impossible. En pareil cas, le fondeur doit recharger environ 20 à 30 % de la charge sous forme de fonte liquide puis, seulement, commencer le soufflage. Avec des coulées de ce genre, il doit aussi interrompre l'opération à des intervalles de temps fréquents et déterminer la continuation de la conduite du soufflage en fonction de la température mesurée et de l'analyse.

4.2.6. Le procédé Kaldo

Le procédé Kaldo (cf. chap. 4.1.) a été employé pour la première fois à l'échelle industrielle en 1956. Contrairement aux procédés dans lesquels l'affinage à l'oxygène s'effectue dans une cornue en position verticale fixe, les réactions métallurgiques se font ici dans un récipient d'affinage qui tourne rapidement autour d'un axe longitudinal incliné, ce qui permet, moyennant des conditions de soufflage appropriées, d'avancer la déphosphoration. On obtient par là un bon mélange du métal et du laitier.

Il a été développé à l'origine pour le traitement de la fonte phosphoreuse, en vue de fabriquer de l'acier aux mêmes caractéristiques mécaniques que l'acier Martin. Jusqu'à ce jour, il existe au total une dizaine d'aciéries Kaldo, avec une capacité annuelle d'environ 4 millions de tonnes d'acier brut, en

service ou en construction. Toutefois, dans le nombre, il y a aussi quelques usines qui traitent de la fonte non phosphoreuse au four Kaldo et dont le programme de fabrication comprend les aciers doux, durs, ainsi que les aciers alliés.

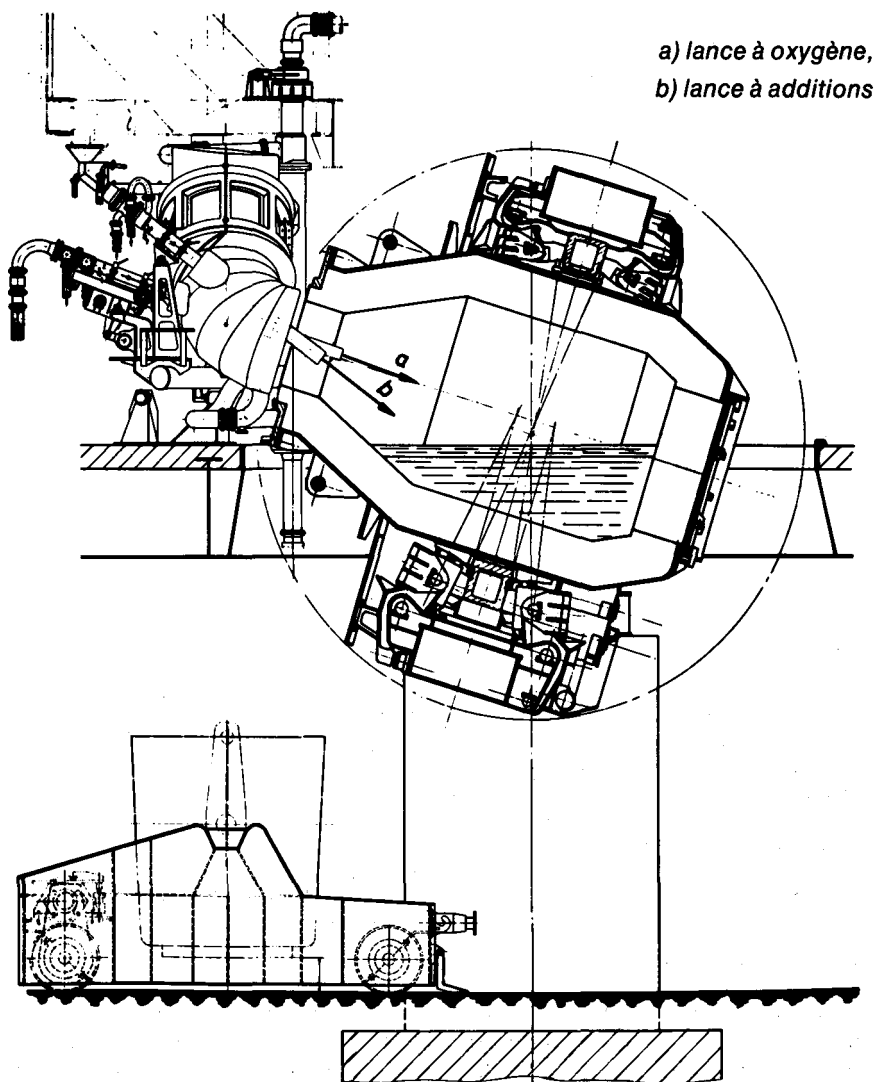
Structure d'une installation de four Kaldo

La *figure 61* reproduit la structure fondamentale d'une installation de four Kaldo. L'oxygène est soufflé par une ou deux lances (a) qui sont introduites par l'ouverture de chargement de la cornue. Le récipient, incliné d'environ 18° par rapport à l'horizontale pendant le soufflage, tourne à des vitesses comprises entre 0 et 30 révolutions par minute et réglables de façon continue. Les fours Kaldo les plus récents permettent des vitesses qui vont jusqu'à 40 révolutions par minute.

La carcasse est de forme bi-conique avec un rapport de la hauteur au diamètre intérieur D (sans maçonnerie) de 1,5 : 1. Le poids de coulée (en tonnes) est de 0,7 à $0,8 \times D^3$ (m). Pour chaque tonne d'acier, un volume de $0,4 \text{ m}^3$ suffit pour la fonte non phosphoreuse ou de $0,45 \text{ m}^3$ pour la fonte phosphoreuse. L'affinage de la fonte s'effectue par soufflage oblique d'oxygène sous pression relativement faible d'environ 3 bars en aval de la vanne de réglage. Une partie de l'oxygène sert à la post-combustion en CO_2 de l'oxyde de carbone qui se forme pendant l'affinage, ce qui permet d'obtenir une utilisation de chaleur plus importante. Avec une position correcte des lances, il est possible de brûler en moyenne 90 % du carbone en anhydride carbonique, en utilisant environ 6 000 kcal/kg de carbone. En raison des grandes quantités de chaleur qui doivent être transmises au bain, principalement par la phase gazeuse, le procédé Kaldo nécessite de plus longues durées de soufflage que les autres procédés à l'oxygène. Les gaz de combustion chauds sont aspirés par une hotte de captation éclipable, refroidie à l'eau, placée au bec du four, et emmenés dans une installation de refroidissement et de dépoussiérage. Les lances à oxygène, ainsi que celles à additions (b) — ces dernières servent à l'introduction de chaux, minerai, éponge de fer ou autres matières d'addition sous forme granulée — sont introduites à travers la hotte. Celle-ci est disposée de façon idoine, mobile dans le sens longitudinal; elle peut pivoter autour d'un axe vertical. Afin de permettre au four Kaldo de se placer dans les différentes positions opératoires, par exemple pour le chargement, le soufflage, le décrassage et le prélèvement d'échantillons, ainsi que pour la coulée, elle peut tourner de 360° .

Matières chargées

Le tableau suivant indique les quantités moyennes et la composition des matières enfournées et des additions de trois fours Kaldo. On peut traiter des



a) lance à oxygène,
b) lance à additions

Figure 61 : Structure d'une installation de four Kaldor

fontes de composition quelconque. On peut aussi employer comme refroidissants différentes matières comme la ferraille, la fonte solide, l'éponge de fer, le minerai de fer, entre autres. De plus, on voit qu'en raison de la bonne utilisation de chaleur, grâce à la post-combustion du gaz carbonique

dans le four d'affinage, on peut mettre en œuvre des quantités d'éléments refroidissants considérablement plus importantes qu'avec les autres procédés à l'oxygène.

Acieries	A	B	C
Composition de la fonte :			
% C	3,60	4,45	3,60
% Si	0,50	1,00	0,30
% Mn	0,35	0,40	0,70
% P	1,75	0,08	1,85
Teneur moyenne en carbone de l'acier soufflé, %	0,05	0,25	0,08
Quantités chargées en :			
fonte liquide, kg/t	670	650	1 016
ferraille, kg/t	405	430	—
minerai, kg/t	(0,05 % C, 0,30 % Mn) 20 (boulettes)	8 (boulettes)	170 (61 % Fe en Fe 304)
chaux, kg/t	103	40	135
Consommation d'oxygène Nm ³ /t	62	58	60
Charge métallique totale, y compris minerai-Fe, kg/t	1 089	1 085	1 120
Quantités oxydées en C, Si, Mn, P, kg/t	41	36	64
Quantité de fer oxydé (laitier), kg/t	25	13	32
Autres pertes en fer (poussières), kg/t	23	36	24
Dépense de chaleur pour la fusion de la ferraille et la réduction du minerai, Kcal totales	161 × 10 ³	153 × 10 ³	212 × 10 ³
Idem par tonne de fonte liquide, Kcal/t	240 × 10 ³	235 × 10 ³	209 × 10 ³

Conduite de l'opération

La teneur en fer du laitier et, par là, l'évolution métallurgique des réactions, sont influencées par le réglage du nombre de révolutions, la position des lances et l'adduction d'oxygène. Avec une position plus relevée de la lance et une plus grande vitesse de rotation, la vitesse de décarburation s'accélère. D'autre part, pour une bonne déphosphoration avec une haute teneur en carbone, il convient de réduire le nombre de révolutions, afin qu'il se crée une teneur en fer suffisamment élevée du laitier et afin de combattre la formation d'oxyde de carbone au-dessus du bain. Le tableau établi ci-après montre, par l'exemple d'une conduite de coulée d'acier «dur», le déroulement de la déphosphoration de la fonte Thomas à haute teneur en carbone.

Production d'un acier dur au four Kaldo

temps écoulé de à min.	Nombre de min.	Opérations	Quantités amenées		Composition chimique					Température °C
			kg	Nm³	% C	% Si	% Mn	% P	% S	
0 - 6	6	Chargement :								1250 (évaluations)
		Fonte liquide	81 000		3,33	0,66	0,36	1,81	0,049	
6 - 45	39 incl.	Ferraille	41 000							
		Chaux	1 600							
6 - 45	39 incl.	Soufflage d'oxygène		6 200						
		Chargement :								
45 - 53	8 4	Chaux	5 500							
		Boulettes de minerai	1 500							
45 - 53	8 4	Décrassage								
		Prise d'échantillon			0,76	—	0,21	0,074	0,026	
53 - 57	incl.	Soufflage d'oxygène		500						
		Chargement :								
53 - 57	incl.	Chaux	300							
		Boulettes de minerai	800							
57 - 64	7 3	Décrassage								
		Prise d'échantillon			0,62	—	0,16	0,042	0,022	
57 - 64	7 3	Soufflage d'oxygène		350						
		Chargement								
64 - 67	incl.	Boulettes de minerai	400							
		Prise d'échantillon			0,41	—	0,12	0,028	0,022	
64 - 67	incl.	Chargement								
		Chaux	2 900							
67 - 82	15	Finissage								
		Perçage (coulée)								
82 - 86	4	Additions en poche :								
		Ferromanganèse affiné	300							
82 - 86	4	Ferromanganèse carburé	1 000							
		Silicate de chaux	175							
82 - 86	4	Ferro-silicium	300							
		Echantillon en poche			0,43	0,25	0,96	0,034	0,021	
Total :	86									

L'analyse chimique prescrite de l'acier comporte : 0,45 % C, 0,25 % Si et 1 % Mn

Lors de la fabrication d'aciers doux à très faibles teneurs en phosphore, en partant de fonte Thomas, de très grandes vitesses de rotation sont indispensables afin d'éviter une teneur en fer inutilement élevée du laitier. Un «tour de valse» de la coulée (rotation du convertisseur avec addition de chaux, sans soufflage d'oxygène) permet de réduire encore la teneur en phosphore avec épaissement simultané du laitier. On évite ainsi la rephosphoration de l'acier en poche. On peut, de cette façon, produire, en partant de fonte Thomas, un acier avec une teneur en phosphore de 0,015 % max. sans grande perte de fer.

Le tableau ci-dessous montre la variation de la composition chimique de l'acier pour une coulée de 120 t au four Kaldo, pour laquelle on exigeait des teneurs en phosphore et en oxygène particulièrement basses.

Échantillon	% C	Composition				
		% Si	% Mn	% P	% S	% N
De la fonte lors du chargement . . .	3,65 (évaluation)	0,42	0,33	1,72	0,036	—
Lors du décarbone du four Kaldo .	0,47	—	0,13	0,050	0,024	—
Après le dernier soufflage en four Kaldo	0,063	—	0,055	0,016	—	—
Analyse de coulée	0,065	—	0,36	0,013	0,016	0,0026

Durée de la maçonnerie réfractaire

Les hautes températures intervenant lors de la post-combustion de l'oxyde de carbone ainsi que la forte sollicitation résultant de la rotation de l'appareil, produisent une usure importante de la maçonnerie réfractaire au four Kaldo. Celle-ci peut encore s'aggraver dans les cas où l'on emploie des ferrailles comme refroidissant, notamment de la ferraille lourde. Initialement, on a utilisé pour le revêtement réfractaire du four Kaldo un matériau analogue à celui habituel aux convertisseurs LD; à savoir des briques de dolomie goudronnée. Avec ce matériau, on peut prévoir par exemple, pour un four Kaldo de 60 tonnes qui doit avoir un revêtement réfractaire d'environ 700 mm d'épaisseur totale, le mode de maçonnerage suivant :

- 150 mm de revêtement de sécurité en briques de magnésie,
- 50 mm de pisé de dolomie goudronné damé,
- 500 mm de couche d'usure en briques de dolomie goudronnée.

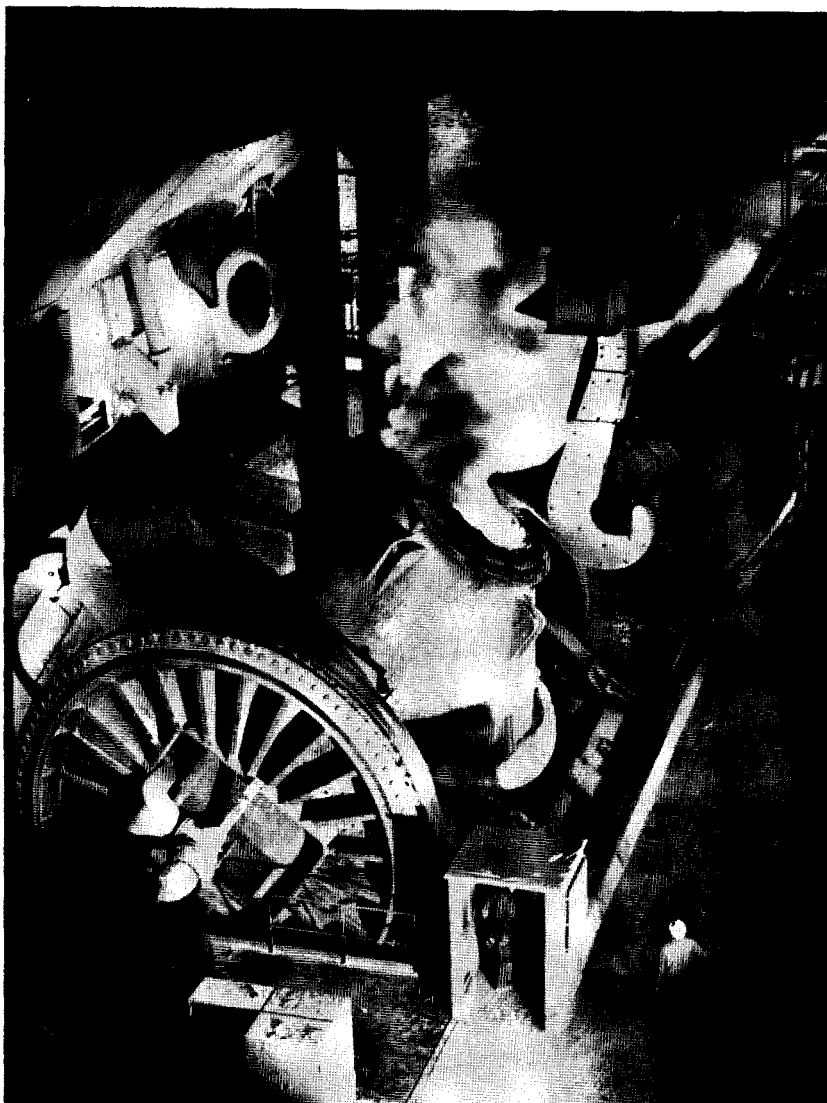


Figure 62 : Four Kaldo de 130 t en service dans une aciérie suédoise.

Le four Kaldo est en position de chargement lors du remplissage de fonte.

Dans des zones particulières où la fatigue est accentuée comme, par exemple, à l'orifice de l'appareil ou dans la partie conique inférieure, on peut aussi garnir partiellement avec des matériaux de qualité supérieure.

On a constaté que, pour plusieurs aciéries Kaldo, la durée d'une maçonnerie de four, est de l'ordre de grandeur de 100 coulées en hématite et de 50 à 60 coulées en fonte phosphoreuse. La consommation de matières réfractaires s'élève ici à environ 20-25 kg de dolomie goudronnée par tonne d'acier. C'est là une consommation relativement élevée, comparée aux chiffres correspondants pour les convertisseurs à lance verticale.

Actuellement, on tend à utiliser de plus en plus des matériaux réfractaires de qualité supérieure, par exemple, des briques de magnésie goudronnée, des briques de chrome magnésie électro-fondues.

Les durées peuvent alors être prolongées, par exemple jusqu'à 110-130 coulées en fonte phosphoreuse et 150-200 coulées en fonte hématite par campagne de four, avec une consommation de briques par tonne d'acier réduite de façon correspondante. Il faut toutefois tenir compte d'un prix à la tonne plus élevé de ces matériaux.

Les *figures 62 et 63* représentent un four Kaldo de 130 t en service dans une aciérie suédoise.

La *figure 64* reproduit un creuset à l'oxygène de 35 t en exploitation dans une aciérie belge. Ce creuset est d'un type spécial appelé L-D Kaldo, qui permet, pour une même charge, l'insufflation d'oxygène dans l'appareil, aussi bien en position verticale fixe (comme un convertisseur LD) qu'en position inclinée et tournant sur lui-même (comme un four Kaldo). Ce nouveau procédé combiné de fabrication de l'acier qui se propose de cumuler les avantages des deux méthodes a été mis en service pour la première fois en marche industrielle.

4.2.7. Caractéristiques qualitatives des aciers au convertisseur à oxygène soufflé par le haut

Pour pouvoir juger de la qualité d'un acier, il convient d'abord de définir ce qu'on entend par «qualité d'acier». Il n'est guère possible de répondre exhaustivement à la question en peu de phrases. C'est pourquoi nous ne parlerons ici que de quelques-uns des critères importants qui permettent de juger de la qualité de l'acier.

La qualité d'une nuance d'acier déterminée est la somme de nombreuses propriétés que possède ce produit. Elle comprend aussi bien la composi-

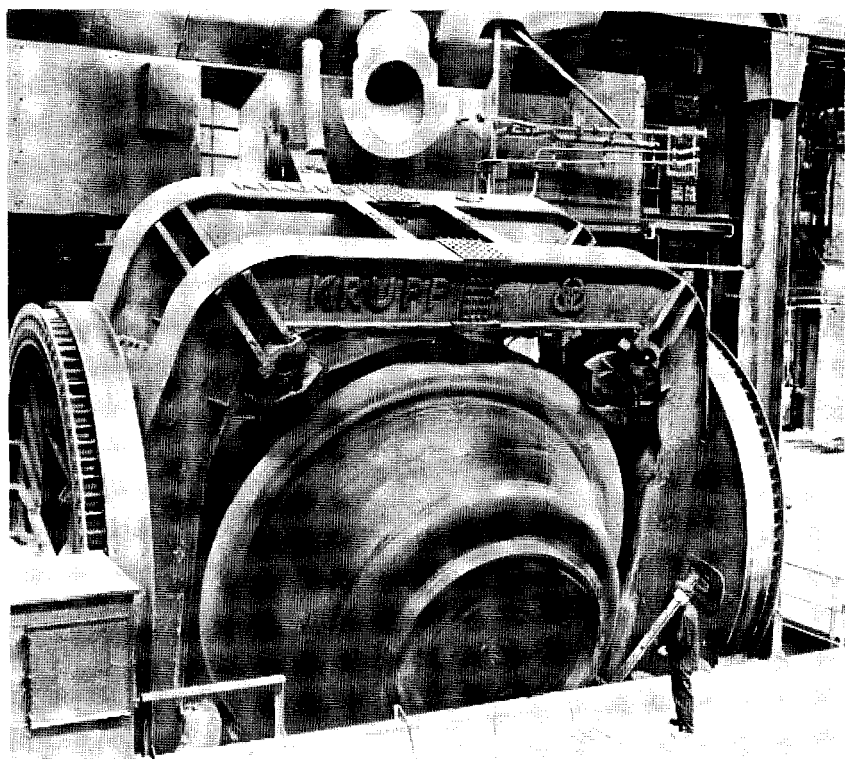


Figure 63 : Four Kaldo de 130 t en marche, en position de soufflage avec rotation de la carcasse.

tion chimique, par exemple la teneur en carbone, manganèse, silicium, phosphore, soufre, azote, oxygène, etc., que la teneur en inclusions non métalliques, par exemple oxyde manganoux, acide silicique, alumine. En outre, les caractéristiques mécaniques du métal, telles que la résistance à la traction, la limite élastique, l'allongement et la ténacité, sont importantes. Enfin, entre aussi dans les critères de la qualité de l'acier, l'absence de défauts externes et internes qui compromettent sérieusement son emploi. On y comprend les dédoubleures, les soufflures, les criques, les pailles, etc.

Il est impossible de fabriquer un acier qui soit également bien indiqué pour tous les cas imaginables de transformation et d'emploi. Les différents procédés de transformation et les très nombreux produits divers en acier, imposent aux caractéristiques qualitatives du métal, des exigences extrêmement divergentes, voire contradictoires.

Cela signifie, en d'autres termes, que les caractéristiques de l'acier doivent être adaptées aux sollicitations qu'il subit dans chaque cas lors de la transformation et de l'emploi du produit fini qui en est issu.

En conséquence, on ne peut juger de la qualité de l'acier qu'en fonction du procédé de transformation employé et des sollicitations lors de l'emploi du produit qui en est tiré.

Ce qui représente la qualité optimale pour un procédé de transformation et une destination d'emploi déterminée est impropre dans d'autres cas. Par exemple, les aciers qui sont transformés en pièces de carrosserie d'automobiles par emboutissage profond sont totalement impropres à la fabrication de rails de chemin de fer. On pourrait parfaitement laminier des rails de chemin de fer en aciers pour emboutissage profond, mais les résistances à la traction et à l'usure de ces rails seraient totalement insuffisantes pour supporter, pendant un temps acceptable, les efforts subis du fait du roulement des roues des locomotives et wagons. Par ailleurs, les aciers de construction à haute résistance et limite élastique sont bien soudables, mais totalement contre-indiqués pour la fabrication des carrosseries d'automobiles par le procédé d'emboutissage.

Un autre exemple se trouve dans les aciers dits de décolletage, à haute teneur en soufre. Les aciers de cette espèce se prêtent excellemment au façonnage par enlèvement de copeaux mais conviennent mal au façonnage par soudure.

Influence des impuretés du fer sur les caractéristiques de l'acier

La composition chimique d'un acier déterminé exerce l'influence la plus forte sur ses caractéristiques. Les éléments carbone, manganèse, phosphore, soufre, azote et oxygène sont ici d'une importance particulière car toutes les espèces d'acier en contiennent. Même des teneurs relativement faibles ont une influence considérable. Bien entendu, l'action de ces éléments et d'autres impuretés du fer ne peut être indiquée qu'approximativement. Les effets en sont partiellement antagonistes mais, même avec des actions convergentes, on ne peut pas totaliser simplement les grandeurs d'influence des différentes impuretés sur les caractéristiques de l'acier.



Figure 64 : Convertisseur à l'oxygène de 35 t (LD-Kaldo) dans une aciérie belge. Les réactions métallurgiques peuvent se faire aussi bien dans l'appareil en position verticale fixe que dans l'appareil en rotation et en position inclinée.

Quand la teneur en carbone de l'acier augmente, il en est de même de sa résistance à la traction. Pour 0,1% de carbone, la résistance augmente d'environ 9 Kp/mm². Mais, simultanément, la formabilité à chaud, par exemple par laminage ou forgeage, devient moins bonne. De même, la ténacité de l'acier diminue, l'aptitude à l'emboutissage profond et la soudabilité sont réduites.

Lors de la fabrication de l'acier à partir de la fonte de haut fourneau on utilise la teneur en oxygène du minerai de fer ou de l'air de soufflage, ou de l'oxygène techniquement pur pour réduire la teneur des diverses impuretés du fer dans la fusion au niveau désiré dans chaque cas.

C'est pourquoi, à la fin du processus de fusion, toute coulée d'acier contient plus ou moins d'oxygène. Celui-ci influence très défavorablement les caractéristiques à plusieurs points de vue. Même de très petites teneurs, qui n'ont pas été neutralisées provoquent, lors du formage à chaud, par laminage ou forgeage par exemple, ce qu'on appelle la cassure à chaud (acier rouverin). Les produits laminés fabriqués avec un tel acier présentent une surface fragile. La *figure 65* en montre quelques exemples très marqués. Bien entendu, le défaut en question n'apparaît à ce degré qu'à la suite de perturbations graves de la marche normale du procédé à l'aciérie.

Avec l'augmentation de sa teneur en oxygène, la ténacité de l'acier, est également diminuée : ce qu'on appelle le vieillissement, c'est-à-dire la variation nuisible des caractéristiques, surtout de la ténacité, au cours du temps, et même sans influence extérieure, est accélérée.

En conséquence, la teneur en oxygène doit être neutralisée à fond avant la coulée en lingots. Cela se fait surtout par addition de manganèse, de silicium et d'aluminium. C'est ce qu'on appelle les désoxydants. Ceux-ci entrent en combinaison avec l'oxygène dissous dans le bain d'acier. Ils montent à l'extérieur du bain, en partie dès le four ou le convertisseur, et dans la poche de coulée ainsi que pendant la coulée en lingotières et se rassemblent dans le laitier ou dans la crasse du lingot. Bien entendu, une partie de ces combinaisons manganèse-silicium et aluminium-oxygène subsiste dans l'acier.

Quand cette proportion n'est pas trop forte, par exemple inférieure à 100 mg par tonne d'acier, les combinaisons d'oxygène en question n'exercent plus, en général, d'influence nuisible importante sur les caractéristiques de l'acier.

Dans les éléments de désoxydation cités le manganèse est toujours présent, aussi bien dans les aciers effervescents que dans les aciers calmés. Le manganèse augmente la résistance à la traction ; son effet, toutefois, ne repré-



Figure 65: Largets fortement rouverins.

sente que le dixième de celui du carbone. Contrairement au carbone, le manganèse améliore la ténacité et la soudabilité de l'acier.

Outre la teneur en carbone, ce sont surtout les éléments phosphore, soufre et azote, qui se signalent comme indésirables, c'est-à-dire comme des impuretés nuisibles aux caractéristiques. Le phosphore rend l'acier fragile. Le métal devient cassant à froid tandis qu'il vieillit plus vite et davantage. En conséquence, le phosphore agit défavorablement sur la formabilité à froid, par exemple par pliage ou bordage et surtout par emboutissage profond. Une haute teneur en phosphore est désirée par contre dans les aciers à écrous pour presses à chaud.

Le *soufre* est une impureté tout aussi nuisible que le phosphore. On n'en recherche une teneur élevée que dans les aciers dits «de décolletage». Elle améliore l'aptitude au détachement des copeaux, par exemple lors du tournage des filets de vis, parce que les copeaux de tour tombent courts tandis que la surface du pas de vis est irréprochablement polie. Les hautes teneurs en soufre combinées avec de faibles teneurs en manganèse rendent l'acier rouverain. La ténacité est influencée défavorablement.

L'azote rend fragile les aciers à faible teneur en carbone et amoindrit leur résistance au vieillissement. Les aciers vieillissent plus vite et davantage. Avec des additions d'aluminium et d'autres éléments d'alliage, comme le vanadium, le titane, qui forment avec l'azote des combinaisons très solides et non, ou très difficilement, solubles dans l'acier, on peut, pour les aciers calmés, parer aux effets nuisibles de l'azote. Mais une certaine teneur en azote peut être désirable, par exemple dans les aciers de construction complètement calmés, parce que ses combinaisons favorisent la formation d'une structure fine.

Après ce bref exposé sur l'effet des impuretés les plus connues du fer, on peut maintenant aborder la question de savoir quelles sont les particularités qualitatives qui caractérisent les aciers fabriqués par le procédé à l'oxygène soufflé par le haut. Il a déjà été dit, dans l'introduction, que surtout la transformation de l'acier par déformation à froid, comme le façonnage des tôles en produits les plus variés et aussi le façonnage des profilés et tôles au moyen des nombreux procédés de soudage, réclament, des produits laminés des propriétés qui n'étaient même pas connues avant l'instauration du procédé en question.

Ce sont, en premier lieu, une bonne ténacité aux hautes et basses températures, une faible propension au vieillissement et l'absence marquée d'inclusions non métalliques. Les caractéristiques mentionnées sont, comme il

a été brièvement expliqué, surtout influencées par les impuretés présentes dans tout acier, carbone, manganèse, phosphore, soufre, oxygène et azote.

Mais les teneurs en aluminium et en silicium sont également d'une grande importance pour les aciers calmés.

Il convient maintenant de fixer les caractéristiques qualitatives des aciers au convertisseur à oxygène soufflé par le haut, comparativement aux aciers fabriqués au moyen des procédés traditionnels: convertisseur soufflé par le fond, procédés Siemens-Martin et au four électrique. Il faut donc d'abord évaluer l'étendue des possibilités, d'ordre métallurgique, de fixer à volonté les teneurs en éléments d'impureté dans l'acier, selon le procédé de fabrication en question.

Carbone

Par le procédé au convertisseur soufflé par le fond, on peut produire des aciers à teneur de carbone remarquablement faible, ce qui constitue un avantage s'il s'agit, par exemple, d'aciers pour dynamos. Par contre, on a la possibilité, avec le procédé à l'oxygène au convertisseur soufflé par le haut, d'élaborer des aciers à haute teneur en carbone, tout comme aux procédés Siemens-Martin et au four électrique, ce qui n'est pas possible avec le convertisseur soufflé par le fond.

Manganèse

Les teneurs en manganèse peuvent être fixées dans l'acier à un degré quelconque, pour tous les procédés de fabrication d'acier connus.

Phosphore

On peut atteindre de basses teneurs en phosphore dans l'acier, par exemple moins de 0,020%, par toutes les méthodes de production. Toutefois, comparativement aux procédés à convertisseur soufflé par le fond, Siemens-Martin et au four électrique, la déphosphoration, dans le procédé à l'oxygène soufflé par le haut, est considérablement plus économique. Tandis qu'au convertisseur Thomas, la déphosphoration ne peut pratiquement se faire qu'après la décarburation totale du bain de fonte, il est possible, avec les autres procédés de fabrication de l'acier, de déphosphorer largement le bain, même avec de hautes teneurs en carbone. A ce point de vue, les procédés à l'oxygène soufflé par le haut sont supérieurs au procédé Thomas et pratiquement égaux aux procédés Siemens-Martin et au four électrique.

Soufre

On obtient les plus faibles teneurs en soufre dans l'acier avec le procédé au four électrique. Les procédés à l'oxygène soufflé par le haut sont, relative-

ment à la désulfuration des matières chargées, égaux au procédé Martin et supérieurs au procédé Thomas. Cela est particulièrement vrai pour les procédés à l'oxygène soufflé par le haut où l'on charge de la fonte phosphoreuse et qui, par conséquent, exigent une plus grande consommation de chaux.

Le laitier hautement basique (à forte teneur en chaux) qui se forme ici, pendant l'affinage, est la condition primordiale déterminante d'une bonne désulfuration. La plus grande partie de la teneur en soufre du bain est absorbée par les laitiers de cette espèce. Les hautes températures, telles qu'elles sont atteintes avec le procédé à l'oxygène soufflé par le haut, surtout dans le foyer (cf. chap. 4.2.3.), y augmentent la capacité du laitier basique d'absorber le soufre du bain de fer.

Azote

Les teneurs les plus basses en azote dans l'acier peuvent être obtenues par le procédé à l'oxygène-vapeur d'eau, un développement du procédé au convertisseur Thomas (cf. chap. 4.1.). L'acier, qui est soufflé au moyen d'un mélange gazeux pratiquement exempt d'azote, contient avec une pureté correspondante d'oxygène gazeux, 0,001 % N (azote) en moyenne.

Dans les procédés à l'oxygène soufflé par le haut avec un même degré de pureté d'oxygène gazeux relativement à l'azote, on relève des teneurs en azote plus élevées. Elles sont d'environ 0,002 à 0,004 %.

Les teneurs en azote dans l'acier Siemens-Martin vont d'environ 0,004 à 0,008 % N. Cela tient surtout à la teneur élevée en azote de l'air de combustion. Moyennant des mesures spéciales, par exemple un chargement plus important de fonte Martin et l'emploi d'oxygène gazeux (cf. chap. 4.3.), on peut obtenir au procédé Martin également, des teneurs en azote inférieures à 0,004 %.

En général, les aciers élaborés au four électrique présentent les plus hautes teneurs en azote.

Oxygène

La teneur en oxygène de l'acier dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la teneur en carbone et aussi en phosphore du bain.

Plus la teneur en carbone du bain est basse, plus sa teneur en oxygène est élevée, en principe c'est vrai pour tous les procédés de fabrication d'acier. Mais la teneur en oxygène dépend aussi de la teneur en phosphore du bain de fer et du déroulement du processus d'affinage, c'est-à-dire de la séquence et de la rapidité avec laquelle les teneurs indésirables en éléments

d'impuretés dans le bain de fer, notamment le carbone et le phosphore, sont réduites.

Rappelons encore qu'avec le procédé au convertisseur Thomas, la déphosphoration poussée indispensable n'est pratiquement possible qu'après la décarburation du bain de métal.

Mais cela a pour conséquence que, lors de la fabrication de nuances d'acier à haute teneur en carbone au moyen du procédé Thomas, ces aciers, le plus souvent, contiennent plus d'oxygène que les nuances d'acier correspondantes qui ont été produites aux procédés Siemens-Martin ou à l'oxygène soufflé par le haut par exemple. Même quand on réussit à contenir la teneur en oxygène de ces aciers Thomas par l'addition indispensable de carburants et de désoxydants, ces aciers contiennent des produits de désoxydation sous forme d'impuretés en plus forte proportion que les nuances d'acier correspondantes produites aux procédés Siemens-Martin, à l'oxygène soufflé par en haut ou même au four électrique.

On peut donc dire en résumé ce qui suit : au point de vue de la qualité des aciers produits, les procédés au convertisseur à oxygène soufflé par le haut sont supérieurs au procédé au convertisseur Thomas et équivalents au procédé Siemens-Martin. Ils sont même supérieurs à celui-ci pour les nuances d'acier à bas carbone.

L'introduction du procédé au convertisseur à oxygène soufflé par le haut marquera sans doute une étape dans le développement des nouveaux procédés de fabrication de l'acier. Naturellement, l'augmentation des exigences touchant la qualité des aciers fabriqués au cours de cette évolution ne s'arrêtera pas aux aciers à l'oxygène ; il suffit de penser aux conditions générales des produits fabriqués en acier, depuis les boîtes de conserves jusqu'aux ponts en acier et aux tankers géants de 200 000 tjb auxquels il faut donner la plus grande légèreté possible, ou à la construction des réacteurs nucléaires et des fusées.

4.3. L'EMPLOI DE L'OXYGÈNE GAZEUX DANS LES PROCÉDÉS MARTIN ET AU FOUR ÉLECTRIQUE

Avec le procédé du convertisseur à l'oxygène soufflé, on a obtenu avant tout, par l'emploi d'oxygène gazeux techniquement pur, une amélioration des caractéristiques des aciers produits. Grâce à la disparition de l'azote dans l'agent d'affinage gazeux (cf. chap. 4.1.) on a pu améliorer considérablement la qualité des aciers à l'oxygène, notamment pour leur traitement par forage à froid et soudage (cf. chap. 4.2.7.).

Avec les procédés de fusion sur sole – au four Martin et, en partie aussi, au four à arc électrique – l'oxygène sert au contraire, moins à améliorer la qualité de l'acier fondu qu'à augmenter le rendement des procédés de fusion.

4.3.1. Emploi de l'oxygène gazeux au four Martin

L'oxygène gazeux peut être utilisé dans le four premièrement pour intensifier la combustion et, deuxièmement, pour affiner la coulée sans qu'on puisse établir de séparation bien nette entre les deux domaines d'emploi, car l'apport d'oxygène gazeux comme comburant exerce une forte action réductrice sur le fer en fusion; par ailleurs, l'emploi de l'oxygène gazeux pour l'affinage permet de réduire fortement la quantité de combustible nécessaire pour le chauffage du four.

Les fours Martin chauffés au gaz de gazogène offrent une troisième possibilité d'emploi de l'oxygène gazeux.

En enrichissant d'oxygène le courant d'air forcé sous la grille du générateur, on obtient une amélioration notable du pouvoir calorifique du gaz dont la teneur en azote est réduite; par ailleurs, la quantité de vapeur d'humidification peut être augmentée. Un enrichissement en oxygène jusqu'à, par exemple, une teneur de 25% dans le courant d'air augmente déjà de 15% le pouvoir calorifique.

Toutefois, ce procédé n'est plus guère employé aujourd'hui, en raison de la conversion générale des fours au chauffage par le mazout, le gaz de cokerie ou le gaz naturel.

Emploi de l'oxygène gazeux pour intensifier la combustion

La combustion des combustibles et donc, la production de chaleur consiste en leur oxydation, c'est-à-dire en leur union avec l'oxygène. Il est vrai que l'oxygène est disponible dans l'air en quantité illimitée, mais il est dilué avec l'azote. L'air ne contient que 21%, en volume, d'oxygène; il est donc chargé d'azote à raison des quatre cinquièmes environ. Si l'on réduit cette charge inutile dans l'air de combustion, il en résulte de très nombreux avantages thermiques. Il n'y a pas à chauffer le volume inutile d'azote et la combustion s'intensifie. Les effets thermiques les plus favorables de l'apport d'oxygène à la flamme d'un four Martin sont, d'une part, une élévation de la température de la flamme et, partant, une amélioration de la transmission au bain de fusion de la chaleur de la flamme par rayonnement et par convection et, d'autre part, un mélange plus intime du combustible et du comburant et, partant, une flamme plus chaude et plus courte.

En dépit de ces avantages thermiques fondamentaux, la rentabilité de l'emploi d'oxygène dépend, en plus de son prix, des différentes données d'exploitation, telles que la dimension du four et la qualité de son garnissage réfractaire, de son dispositif de chargement, du tirage de cheminée disponible et de l'âge du four au cours d'une campagne.

Avant l'emploi de l'oxygène, il convient de déterminer pour chaque four l'apport de chaleur maximale qui, pour un âge de four donné et pour une phase de fusion déterminée, fournit la valeur optimale des frais de transformation. Cet apport calorifique «critique» se situe, en général, pendant la fusion entre 350 000 et 450 000 Kcal par m² de surface de sole et par heure. La valeur exacte doit être déterminée séparément pour chaque four. L'apport calorifique «critique» est la limite en dessous de laquelle l'emploi de l'oxygène pour la combustion, ne peut être encore judicieux qu'avec les prix d'oxygène très bas, mais il sera antiéconomique dans la plupart des cas.

Au-dessus de cette limite toutefois, l'apport d'oxygène est absolument indispensable pour avoir un procédé économique. Si l'on voulait augmenter l'apport de combustible sans addition d'oxygène au-dessus de cette valeur optimale, l'utilisation du combustible deviendrait plus mauvaise et l'usure du four plus grande.

La quantité de gaz résiduel n'augmente que lentement avec celle du combustible et ne s'accroît que d'un peu plus de 10 % avec un apport de chaleur plus élevé de 50 %, si la quantité supplémentaire de combustible n'est brûlée qu'avec de l'oxygène.

Pour la combustion de 2 000 kg de mazout par exemple, 28 000 Nm³ d'air sont nécessaires. On peut brûler 3 000 kg de mazout avec 42 000 Nm³ d'air, ou avec 28 000 Nm³ d'air et 2 000 Nm³ d'oxygène. La quantité de gaz résiduel humide par kilogramme de mazout est d'environ 15 Nm³ avec la combustion à l'air alors qu'elle est d'environ 3 Nm³ avec la combustion à l'oxygène.

Le volume de gaz résiduels, dans l'exemple cité, se monte à 30 000 Nm³ avec 2 000 kg de mazout et combustion à l'air; avec 3 000 kg de mazout, cette quantité s'élèverait à 45 000 Nm³ alors qu'avec la combustion à l'air de 2 000 kg de mazout et la combustion à l'oxygène de 1 000 kg supplémentaires de mazout, elle serait de 30 000 Nm³ + 3 000 Nm³, soit 33 000 Nm³.

Cette constatation est importante pour l'alimentation des chambres de récupération. Quand on brûle des quantités supplémentaires de combustible, exclusivement à l'oxygène, on n'a pas à apporter, pour des raisons d'ordre thermique, des modifications aux chambres et aux empilages. Avec les fours à chambres à empilages calculées au plus juste, le rendement à la coulée ne peut être amélioré que de cette manière.

Fréquemment, vers la fin de la campagne du four, le tirage de cheminée disponible ne suffit plus à évacuer la quantité de gaz brûlés, parce que les chambres à empilages sont encrassées. Si on remplace alors une partie de l'air de combustion par de l'oxygène, la quantité de gaz brûlés diminue avec un apport de chaleur inchangé et le rendement du four ne doit pas nécessairement baisser, en dépit de la détérioration de son tirage. Pour chaque Nm^3 d'oxygène, on peut retrancher cinq fois la quantité d'air de combustion.

Il apparaît indiqué à cet égard, d'augmenter l'apport d'oxygène au cours de la campagne du four, c'est-à-dire de l'adapter aux conditions du four afin d'en maintenir le rendement à peu près constant pendant toute la campagne. La figure 66 indique que l'emploi de l'oxygène commence en même

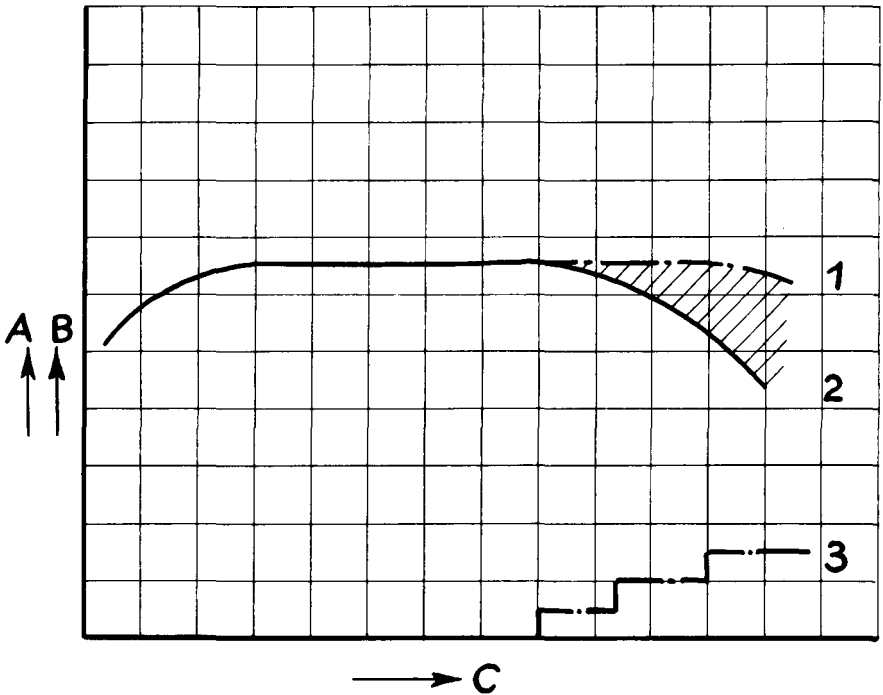


Figure 66: Emploi d'oxygène pour obtenir un rendement de four régulier.

A = Nm^3O_2/t , B = rendement du four en t/h,
 C = nombre de coulées, 1 = avec addition de O_2 ,
 2 = sans addition de O_2 , 3 = consommation.

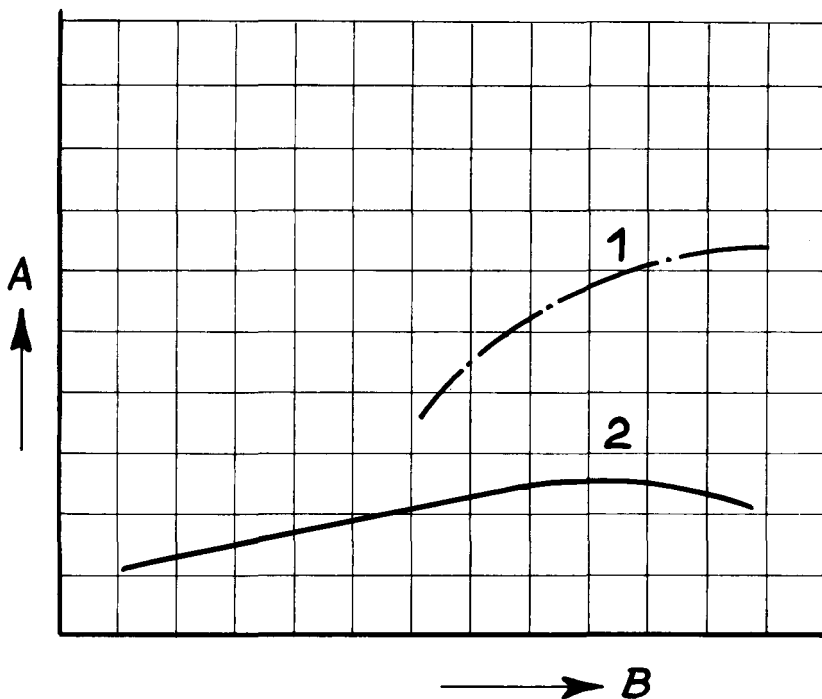


Figure 67: Influence de la quantité chargée sur le rendement du four lors de fusion avec et sans oxygène.

A = rendement du four en t/h, B = quantité chargée en t/h,
 1 = avec addition de O_2 , 2 = sans addition de O_2 .

temps que la baisse de rendement du four et la quantité en est augmentée de façon à maintenir le rendement du four à la coulée.

Un rendement régulier du four influence favorablement la marche de l'exploitation d'une aciérie et sa rentabilité. C'est pourquoi, au début de la baisse de rendement, donc après environ 25 à 40% de la campagne du four (campagne du four = nombre de coulées entre deux réparations), on doit commencer des additions d'oxygène d'environ 5 à 10 Nm^3/t de charge. Dans le cours ultérieur de la campagne du four, l'apport d'oxygène doit être porté, proportionnellement à la quantité de combustible et au défaut de tirage de la cheminée, à environ 15 à 18 Nm^3/t afin de maintenir le rendement du four au même niveau.

Si l'on considère le rendement du four en fonction de l'importance de la charge lorsqu'on affine à l'oxygène, il apparaît qu'avec les charges importantes, la différence de rendement s'accroît comparativement à la fusion sans oxygène. Avec les charges importantes, le rendement du four ne diminue pas, comme avec les fusions sans addition d'oxygène. La *figure 67* montre distinctement qu'avec la fusion sans oxygène le rendement du four baisse quand la charge est très élevée. Par ailleurs, une charge importante implique une augmentation de rendement lors de l'emploi d'oxygène. L'addition d'oxygène accélère la fusion de la ferraille. De plus, la teneur en soufre de l'éprouvette préliminaire en fin de fusion est quelque peu plus basse avec addition d'oxygène que lorsqu'on fond sans l'oxygène. La *figure 68* montre que

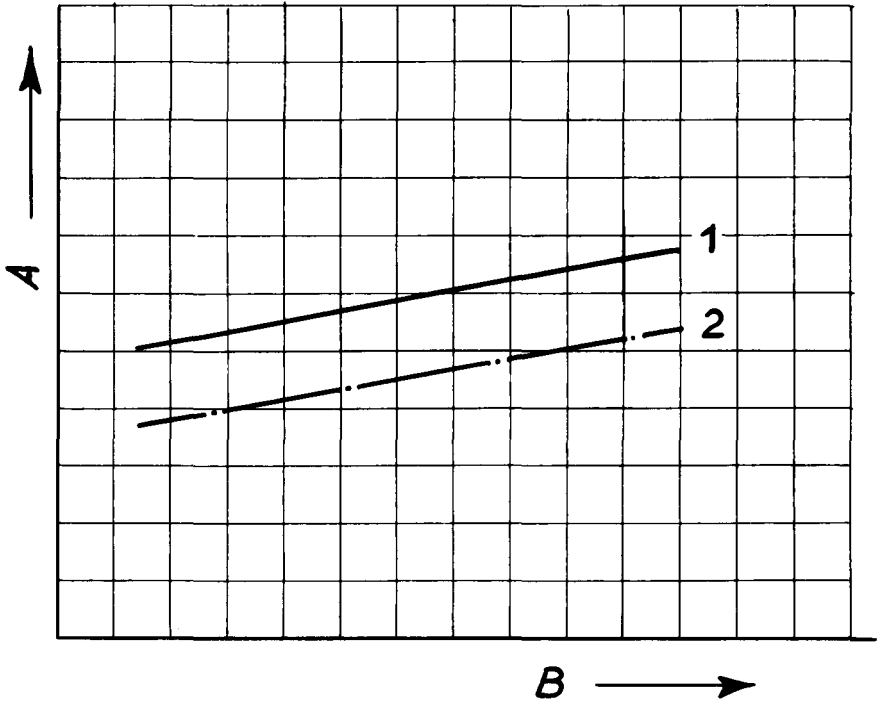


Figure 68: Influence de la durée de charge sur la teneur en soufre en fin de fusion, sans et avec addition d'oxygène lors de la fusion.

*A = teneur en soufre en % du bain après fusion,
B = durée de la charge en heures (h).*

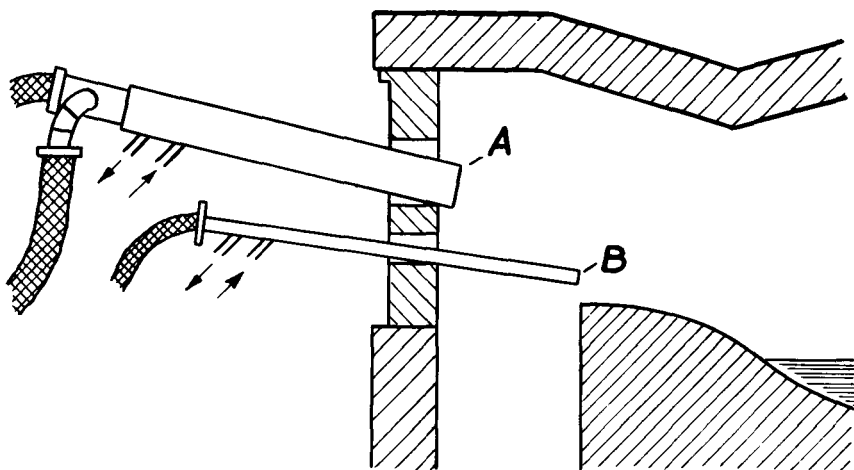


Figure 69: Tête du four avec brûleur et injecteur à oxygène.

A = amenée du combustible; B = amenée d'oxygène.

la teneur en soufre de l'échantillon initial est plus élevée pour une durée de charge croissante que pour une durée moindre, et fait ressortir la différence entre les fusions avec et sans addition d'oxygène.

Après avoir décrit les effets de l'addition d'oxygène sur la combustion, il est intéressant d'étudier le mode d'apport de cet oxygène. Cet apport peut se faire par les procédés suivants :

- A. Enrichissement de l'air de combustion en oxygène avant les chambres à empilages. Avec ce procédé, l'oxygène est amené à la flamme non concentré de son action est minime. En conséquence, cette méthode n'est presque plus employée aujourd'hui.
- B. *Amenée de l'oxygène par un tuyau refroidi à l'eau, disposé en dessous du brûleur de la paroi frontale et relativement proche du bain.* On cherche par là à obtenir un «foyer» chaud à grand pouvoir de fusion local. Fréquemment, l'orifice de sortie du tuyau refroidi à l'eau est en forme d'injecteur Laval. Ces injecteurs laissent sortir l'oxygène à grande vitesse et en fournissent une meilleure utilisation que les tubes simples dépourvus de têtes injectrices de ce genre. L'oxygène, sortant à grande vitesse, fait monter la température de la flamme et, partant, donne un meilleur rendement thermique lors de l'échange de chaleur et une accélération de

la transmission de chaleur par rayonnement et par convection. La zone très chaude du combustible brûlant à l'oxygène, qui se trouve au-dessus du bain d'acier, immédiatement derrière la tête de brûleur, est recouverte par la partie plus froide des flammes brûlant à l'air, ce qui protège la voûte et les parois latérales du four. De cette façon, la maçonnerie n'est pas trop éprouvée.

Les températures des chambres ne sont pas plus élevées que d'ordinaire. La combustion du fer et les fumées rousses n'interviennent pas, ou ne sont pas plus importantes que lors du bouillonnement d'une fusion sans oxygène. La *figure 69* montre la disposition du brûleur et de l'injecteur d'oxygène. Ce mode d'amenée de l'oxygène est tout à fait simple et est très fréquemment employé. La *figure 70* représente le «plan de marche thermique» pour une telle addition d'oxygène sur un four de 200 t.

- C. *Oxygène gazeux amené dans le brûleur même de la paroi frontale.* Ce procédé est similaire à celui décrit plus haut. Ici, le tube à oxygène est compris dans la chemise du brûleur. Cette méthode ne présente aucune difficulté technique et c'est pourquoi elle est également souvent employée.
- D. *Dans le brûleur à mazout, agent de pulvérisation remplacé par oxygène.* Comme on le sait, le mazout lourd doit être pulvérisé avant combustion. Jusqu'à présent, on a utilisé à cet effet de l'air comprimé ou de la vapeur et opéré, la plupart du temps, avec une pulvérisation préliminaire et secondaire. Par la pulvérisation postérieure ou secondaire, on a obtenu un raccourcissement de la flamme lors du chargement et pendant la durée de la fusion. En prenant de grandes précautions, car la plupart du temps, les conduites d'air comprimé ne sont pas exemptes d'huile, il est possible d'effectuer la pulvérisation secondaire afin d'obtenir une flamme courte et vive avec de l'oxygène. Naturellement, on peut aussi remplacer complètement l'agent pulvérisateur par de l'oxygène. Mais l'économie de ce procédé est à vérifier dans chaque cas. Cependant, l'addition d'oxygène favorise toujours la combustion quand une flamme courte et énergique est requise et, c'est pourquoi, la combinaison et la possibilité d'inversion de la pulvérisation d'air comprimé et d'oxygène dans un brûleur de four Martin peut présenter des avantages.
- E. *Emploi de l'oxygène dans les brûleurs de combustibles proprement dits.* Ici, il faut considérer que l'oxygène qui est amené à grande vitesse à la flamme de la paroi frontale, en augmente très fortement l'impulsion. Cela peut conduire à une usure exagérée de la maçonnerie réfractaire du four. Il est donc important de tenir compte de l'impulsion supplémen-

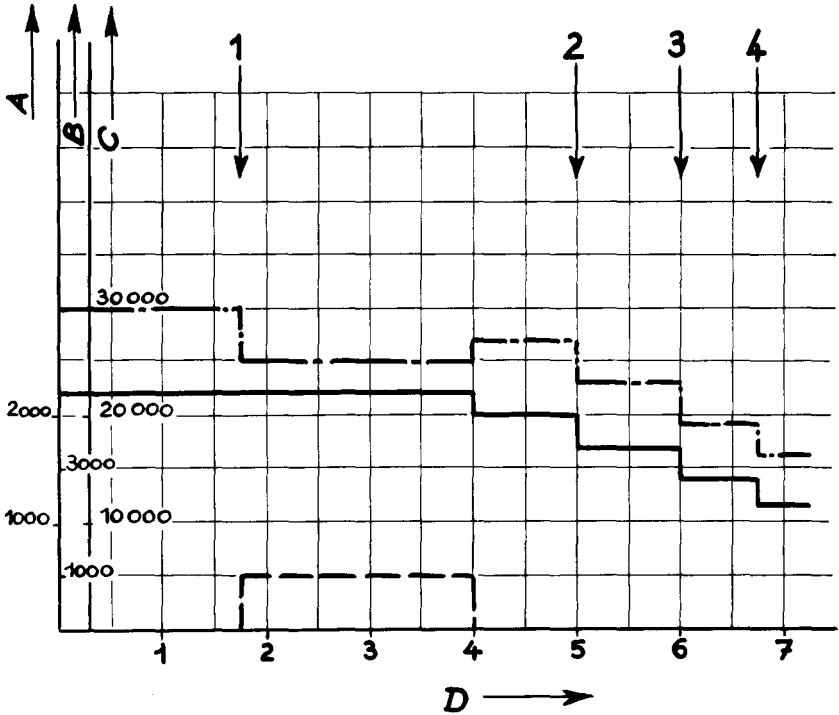


Figure 70: Plan de conduite thermique d'un four Martin de 200 t avec addition d'oxygène lors de la fusion.

A = adduction de fuel en kg/h, B= adduction de O₂ en Nm³/h; C = adduction d'air de combustion en Nm³/h; Durée de fusion en heures; 1 = on charge 100 t de ferraille; 2 = prélèvement du premier échantillon (température du bain 1500°C); 3 = température du bain 1560°C; 4 = température du bain 1600°C.

taire de l'oxygène. D'après les recherches récemment effectuées, l'impulsion au brûleur ne doit pas dépasser 2 kg par million de Kcal amenées dans l'heure. L'impulsion au brûleur se calcule par la formule :

$$J = \frac{1,25 \cdot p \cdot f}{Q}$$

où p est la pression du milieu gazeux dans le brûleur en kg/cm², t la section de sortie en cm², Q l'apport horaire de chaleur en kcal x 10⁶.

Dans les brûleurs de combustible et d'oxygène, on peut, quand on emploie du mazout, opérer la pulvérisation à l'air comprimé, à la vapeur ou à l'oxygène. La quantité minimale de l'agent de pulvérisation dépend, dans une large mesure, du type de construction du brûleur et, c'est pourquoi, le brûleur le mieux indiqué pour la marche à l'oxygène est celui qui peut marcher avec l'impulsion la plus faible.

L'apport de chaleur dans le brûleur de la paroi frontale ne peut être augmenté à volonté, car l'usure du four devient alors trop forte.

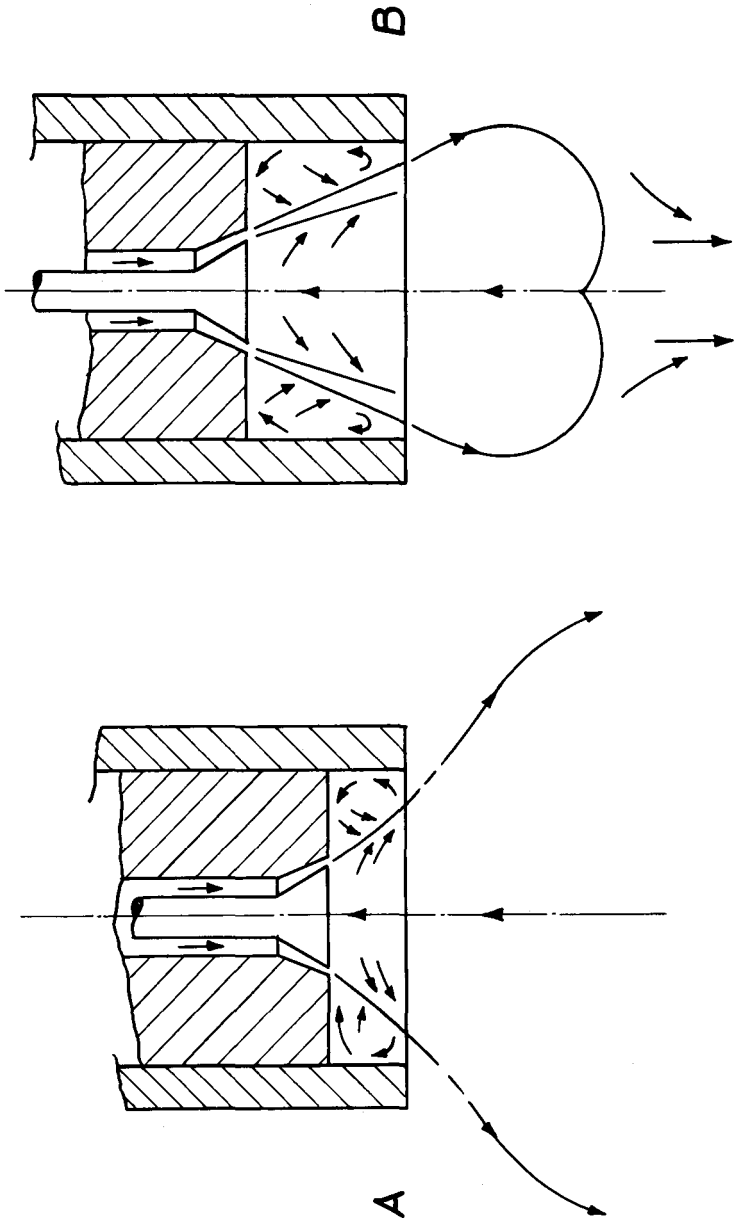
Pour obtenir des rendements de fusion très élevés, il est indispensable d'amener de grandes quantités supplémentaires de chaleur au four par une autre voie et de répartir le combustible sur plusieurs flammes. Pour cela, on utilise des brûleurs à l'oxygène spéciaux, qui sont dirigés sur la charge à travers la voûte. Ces brûleurs peuvent être aussi utilisés comme buses d'affinage après la fin de la fusion.

De même on peut placer des buses à oxygène qu'on introduit dans le four, à travers la voûte pendant la durée de la fusion, pour en augmenter le rendement par l'amélioration de la transmission de chaleur. Du fait de l'injection d'oxygène perpendiculairement au sens d'écoulement du courant combustible-air, il se produit un fort tourbillon local qui accélère la fusion.

Avec les brûleurs à oxygène et gaz froid, le combustible et l'oxygène sont répartis en jets isolés. Le mélange de l'oxygène et du combustible s'effectue de façon adéquate en dehors du brûleur. Antérieurement, il fallait pour employer du mazout dans des brûleurs à oxygène, pulvériser le mazout à la vapeur ou à l'air comprimé avant sa sortie et amener l'oxygène séparément au mélange.

Tout récemment, la SHELL a mis au point un brûleur de voûte à oxygène et mazout sans pulvérisation préalable du combustible. Ce brûleur peut, en dépit du peu de longueur de la flamme, répartir la chaleur sur une grande surface, de sorte qu'on peut répartir et fondre la ferraille de façon homogène. La *figure 71* indique schématiquement la construction du brûleur-injecteur.

L'oxygène apporté au brûleur s'écoule sur un champignon répartiteur dans une chambre cylindrique. Le mazout est amené régulièrement au courant d'oxygène, par une soupape retenue au moyen des rainures radiales du répartiteur. Le mélange et la pulvérisation s'effectuent avec une section de sortie annulaire. En poussant axialement la tête du brûleur par rapport à la chemise extérieure, on peut changer la forme de la flamme. On a déjà effectué de nombreux essais en exploitation, très prometteurs, avec ce type de brûleur.



156 Figure 71: Schéma d'un brûleur de voûte selon Shell.

A = flamme longue; B = flamme courte

Les brûleurs de voûte à oxygène sont utilisables avec de fortes charges aussi bien en fonte qu'en ferrailles. Ces brûleurs peuvent naturellement influencer davantage sur le rendement du four, avec les fortes charges en ferrailles qu'avec les fortes charges en fonte. Comme, en pareil cas, la ferraille doit être fondue régulièrement par les brûleurs de la paroi frontale ainsi que de la voûte, et léchée par les flammes, la forme de celles-ci et la position des brûleurs dans le four prennent une grande importance.

Quand on emploie les brûleurs oxygène-mazout au four Martin, la consommation d'oxygène est très élevée parce qu'on remplace une grande partie de l'air de combustion par de l'oxygène pur. La quantité de gaz d'échappement se réduit très fortement et les chambres à empilages ne sont plus que peu sollicitées. Il est vrai qu'avec les procédés décrits d'emploi de l'oxygène au four Martin, l'air de combustion préchauffé au régénérateur est consommé dans tous les cas et les brûleurs à oxygène servent purement et simplement à intensifier la combustion. Cependant, grâce à un perfectionnement du brûleur à oxygène, la possibilité est offerte d'un procédé de fusion sur sole pour produire de l'acier à partir de riblons, avec lequel l'air de combustion sera complètement remplacé par l'oxygène. Un tel four de fusion sur sole serait d'une construction considérablement plus simple que le four Martin, car le four inférieur avec ses chambres à empilages pour le réchauffage de l'air pourrait disparaître.

Jusqu'à présent les brûleurs à combustible-oxygène ne sont pas partout employés en exploitation permanente. En effet, ce n'est que depuis peu que l'on a réussi à construire des brûleurs à oxygène de fonctionnement régulier; en outre, dans beaucoup d'aciéries, les conditions d'exploitation, les moyens de transport notamment, pour atteindre les plus hauts rendements, n'ont pas encore été réunies.

Pour une mise en œuvre économique des brûleurs à oxygène, il est important qu'on puisse atteindre des niveaux de charge très élevés. A cet égard, la préparation de la ferraille prend une importance particulière.

En employant les brûleurs à oxygène, on peut obtenir de très remarquables augmentations de rendement. Elles vont de 75 à 380% comparativement au procédé Martin traditionnel, ce qui permet des économies de chaleur de 14 à 72%. Bien entendu, la consommation d'oxygène avec les brûleurs à combustible-oxygène est considérable. Pour brûler 1 kg de mazout on consomme 2 Nm³ d'oxygène, et, en regard, pour 1 Nm³ de gaz de four à coke environ 0,8 Nm³ d'oxygène gazeux. Il faut se livrer, dans chaque cas, à un calcul précis de rentabilité pour vérifier si une consommation aussi élevée d'oxygène est payante.

Affinage à l'oxygène gazeux

Le rendement est augmenté de façon importante par l'affinage à l'oxygène. Cependant, ce qui a déjà été expliqué à propos de la mise en œuvre d'oxygène pour intensifier la combustion, s'applique aussi à l'affinage à l'oxygène : il est important pour l'économie de l'installation d'oxygène à l'aciérie Martin que l'exploitation soit exempte de difficultés de transport. Aussi bien du côté chargement que du côté coulée, il ne doit pas se produire de ralentissement. De très hauts niveaux de charge sont la condition préalable à la mise en œuvre économique d'oxygène avec le procédé ferraille-fonte. Il est évident qu'on peut amener de grandes quantités d'oxygène dans le four Martin lors de fortes charges de fonte. La durée d'affinage peut en être très fortement réduite et le rendement augmenté de façon correspondante.

Mais, comme la vocation première du four Martin est de fondre les riblons et que cette vocation se développera à l'avenir, eu égard au procédé à la fonte liquide du convertisseur à l'oxygène, toutes les possibilités d'augmentation de rendement du procédé ferraille-fonte doivent être exploitées. Les procédés de conversion à l'oxygène peuvent transformer la fonte en acier plus économiquement que le four Martin qui, de par sa construction, est davantage un appareil de fusion qu'un appareil d'affinage pur comme le convertisseur.

Aux Etats-Unis, on a constaté que lorsqu'on emploie l'oxygène, la durée de chargement d'un four Martin peut être indépendante du tonnage coulé, pourvu qu'il n'existe pas du tout de restrictions, ni au chargement, ni dans la fosse de coulée. Il en résulte que la durée de chargement de la ferraille doit également être aussi indépendante que possible du tonnage chargé. On peut presque y arriver dès aujourd'hui dans différentes exploitations. On emploie souvent de grands bacs de chargement d'une capacité de plus de 2 m³. On est en train de mettre au point une méthode de chargement qui doit permettre de charger jusqu'à 100 t de ferrailles au four Martin en deux minutes. Il s'agit là d'un transporteur à mouvements oscillatoires qui pousse le riblon dans le four par une goulotte d'alimentation.

Quand les conditions de transport idéales, côté chargement et coulée, sont satisfaites, la vitesse d'affinage, avec un chauffage de la ferraille suffisamment rapide — éventuellement par des brûleurs à oxygène — est le critérium de la durée de fusion. La vitesse d'affinage dépend de l'apport d'oxygène par heure et par tonne d'acier. On arrive à de grandes vitesses d'affinage quand de grandes quantités d'oxygène par t d'acier et par heure sont mise en œuvre. Au cours de nombreux essais d'exploitation, on a employé de très grandes quantités d'oxygène par t d'acier; le succès a toutefois été mince, parce que les quantités horaires d'oxygène étaient réduites.

De grandes quantités horaires d'oxygène peuvent conduire à des résultats particuliers. La consommation d'oxygène pour l'affinage est très variable suivant les aciéries et, selon le mode d'affinage, oscille entre 2 et 35 Nm³/t. L'amenée de grandes quantités d'oxygène par t d'acier et par heure active le processus d'oxydation de telle manière qu'un contrôle précis et constant de la température et de la teneur en carbone est absolument indispensable, pour assurer la température de bain liée à chaque teneur en carbone. On corrige une température de bain trop élevée par une addition de minerai, une température trop basse par un chauffage plus fort. Il est à remarquer que l'élévation de la température du bain est de 4°C pour 1 Nm³ d'oxygène par t d'acier, tandis que la quantité équivalente de 5 kg de minerai/t d'acier abaisse la température du bain de 23°C. On doit procéder au prélèvement d'échantillons aussi tôt que possible pour pouvoir conduire correctement la fusion. On doit établir des diagrammes carbone-température d'après lesquels les fondeurs pourront effectuer les opérations nécessaires pendant l'affinage. La *figure 72* représente un tel diagramme.

Le procédé d'affinage à l'oxygène au four Martin offre, comparativement aux autres procédés d'affinage, l'avantage que l'on brûle le CO se formant dans le laboratoire et que la chaleur de combustion ainsi créée peut être utilisée. La combustion du CO se fait à l'air habituel préchauffé au récupérateur, qui est moins cher que l'oxygène. L'oxyde de carbone s'échappe à petite vitesse sur toute la surface du bain. La combustion du CO dans le laboratoire peut influencer de façon importante sur les besoins thermiques du four.

Plus il se forme de CO par heure, plus on peut réduire le chauffage pendant l'affinage. Avec un fort dégagement de CO et une bonne combustion de cet oxyde de carbone, il peut être possible d'arrêter complètement l'amenée de combustible pendant un certain temps. Une forte réduction ou l'arrêt du chauffage diminue la consommation de chaleur et prévient la surchauffe des chambres à empilages.

L'affinage à l'oxygène augmente considérablement le rendement. Cependant, avec les installations de fours existantes, cette augmentation est soumise à certaines limites. L'usure du four augmente du fait de l'introduction de l'oxygène. La plus grande fréquence du regarnissage ou des réparations du four peut réduire à néant le gain de production résultant du rendement horaire plus élevé, parce que le temps pendant lequel le four peut travailler est diminué.

En conséquence, dans beaucoup d'aciéries, des modifications de structure sont nécessaires afin que l'augmentation de production horaire, ob-

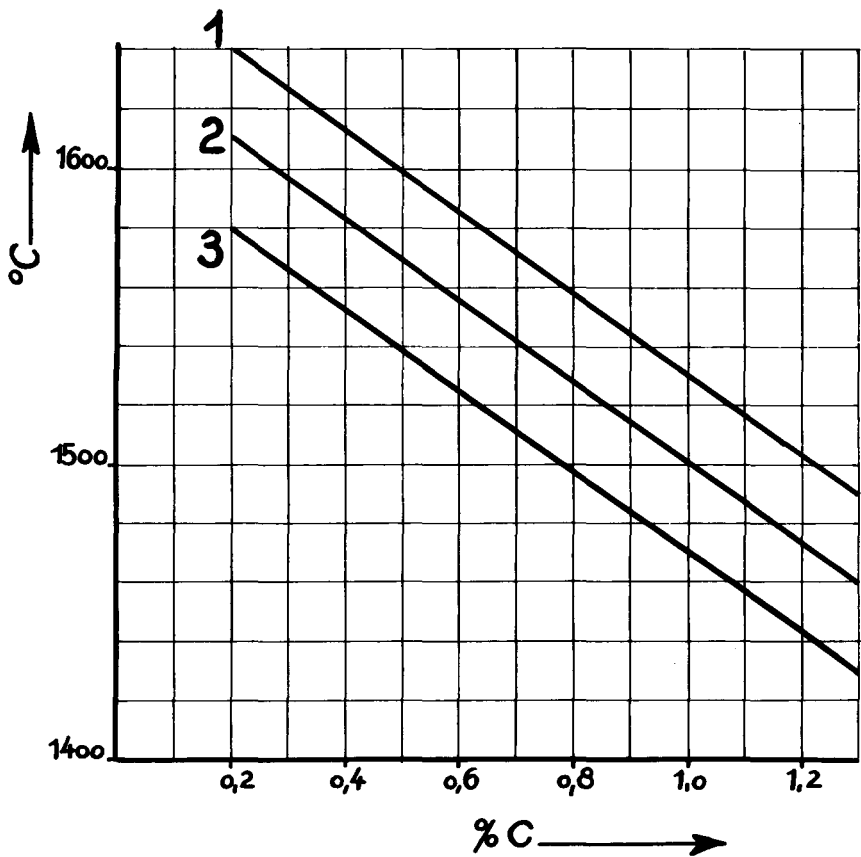


Figure 72: Teneur en carbone de la fusion en fonction de la température du bain.

- 1 = addition de minerai, réduction de la charge de combustible.
- 2 = quantité normale de minerai.
- 3 = pas d'addition de minerai, combustible ouvert (fin de l'affinage au O_2 au plus tard à $C = 0,4\%$ au-dessus de la teneur en carbone prévue de la coulée).

tendue par l'introduction de l'oxygène, se traduit aussi par une augmentation de la production annuelle.

L'affinage à l'oxygène peut se faire par les méthodes suivantes :

- A. *Affinage à l'oxygène par le brûleur.* Ce mode d'affinage n'est pas très efficace car le jet d'oxygène, avec sa grande énergie, prend à l'ambiance l'air de combustion ou les gaz résiduels. A une distance d'environ 3,5 m – c'est à peu près la distance du brûleur au bain – la concentration en oxygène du jet est tombée de 100% à environ 45%. On voit par là que l'effet d'affinage de l'oxygène sera d'autant plus fort que la distance entre l'injecteur d'oxygène et la surface du bain sera plus petite.
- B. *Oxygène amené par des buses rafraîchies à l'eau, qui sont introduites dans le four à travers la cloison frontale ou les piliers de sole.* L'orifice de sortie des buses est amené au voisinage du bain. Le montage de ces buses est indiqué partout où le montage de buses de voûtes est interdit pour des raisons de construction.
- C. *Amenée d'oxygène par des lances non refroidies, introduites dans le four en nombre quelconque, par les portes de chargement et plongées dans le bain de métal.* On emploie le plus souvent de simples tubes d'acier. Cette méthode est très fréquemment employée au Japon. Les lances y sont employées non seulement à l'affinage, mais aussi à l'aplatissement de la charge. L'affinage avec ces lances est le mode le plus simple d'amenée d'oxygène au bain, bien entendu, seulement en petites quantités. Dans les aciéries européennes, on met également ces lances en œuvre pour abrégier la durée de la fusion. Pour réduire les frais de lances, on a, au Japon, mis au point des tubes spéciaux de soufflage d'oxygène. Ils sont connus sous le nom de marque de fabrique «Lances Falcolloy» et consistent en tubes d'acier calorisés qui comportent un revêtement céramique extérieur et intérieur. La durée des lances Falcolloy est de 7 à 10 celle des lances normales. La *figure 73* montre l'affinage d'un bain avec une lance de cette espèce. La coloration d'oxyde de fer du gaz des fumées est importante. Toutefois, elle doit diminuer avec la teneur en carbone du bain, et avec des teneurs en carbone inférieures à 0,35%, être à peine plus marquée que lors du bouillonnement d'un bain normal sans addition d'oxygène.
- D. *Mise en place d'injecteurs à oxygène dans la voûte – mode le plus important d'affinage à l'oxygène – (figure 74).* Les injecteurs sont employés avec succès dans de nombreuses aciéries. La *figure 75* représente un injecteur à oxygène de cette nature, en place. La partie supérieure de l'injecteur est habituellement en acier, la tête en cuivre. Les deux parties



Figure 73: Affinage à la lance à oxygène.

sont soudées entre elles. Les têtes de lances forgées et tournées sont plus régulières et tiennent mieux que celles coulées. Les orifices de sortie de l'oxygène sont généralement répartis uniformément sur le pourtour de la tête d'injecteur. On trouve le plus souvent de 4 à 6 orifices. L'angle du jet d'oxygène, par rapport à la verticale, est différent suivant les divers types. L'expérience a montré qu'avec les plus grands angles, c'est-à-dire avec une rencontre à plat du jet d'oxygène sur le bain, les éclaboussures du laitier sont moins violentes. Les orifices de sortie sont calculés d'après la quantité maximale d'oxygène et varient entre 5 et 25 mm de diamètre.

La durée des injecteurs à oxygène de voûte dépend en premier lieu du refroidissement à l'eau. Pour chaque injecteur, il faut environ de 40 à 45 m³ par heure, ce qui exige, avec le diamètre habituel d'injecteur de 130 à 150 mm, une pression d'eau de 7 à 8 atm. Comme l'eau de refroidissement du four n'a le plus souvent qu'une pression de 2 atm., il faut prévoir une pompe à eau indépendante pour le refroidissement des injecteurs de voûte. Avec un refroidissement suffisant, les injecteurs tiennent pendant environ 70 à 100 coulées. L'injecteur de voûte est le plus souvent fixé à la poutrelle du chemin de roulement du pont. Les constructions articulées et amovibles sont avantageuses.

Pour réussir l'affinage à l'oxygène, le moment où commence l'apport du fluide est essentiel. Il s'est révélé avantageux de mettre en œuvre, le plus tôt possible, donc immédiatement après le chargement de la ferraille au four, la totalité de la fonte liquide, puis, de commencer l'injection d'oxygène. Les injecteurs sont amenés à la distance minimale de la charge et descendus de façon correspondante lors de la mise à plat de la ferraille. Dès que le laitier s'est formé, les injecteurs à oxygène de voûte plongent dans le laitier ou se trouvent très près au-dessus de sa surface, ce qui donne une bonne utilisation de l'oxygène et l'éclaboussement est diminué. Si la fonte est amenée au four en plusieurs poches, il faut commencer le soufflage dès que la première poche est vidée. Comme déjà dit, la vitesse d'affinage n'est déterminée que par les quantités d'oxygène amenées, par tonne de bain et par heure. Le nombre d'injecteurs de voûte installés dans un four dépend des quantités horaires d'oxygène et de la vitesse de sortie. Avec les fours de moins de 200 t par coulée, on emploie normalement un ou deux injecteurs; pour les fours de plus de 200 t par coulée, trois à quatre injecteurs. Avec un plus grand nombre d'injecteurs de voûte, l'oxygène est réparti sur plusieurs points d'affinage; les réactions locales seront moins violentes et l'attaque sur la maçonnerie réfractaire plus faible. Les injecteurs doivent se trouver le plus possible en arrière des pieds-droits des portes, pour ne pas gêner,

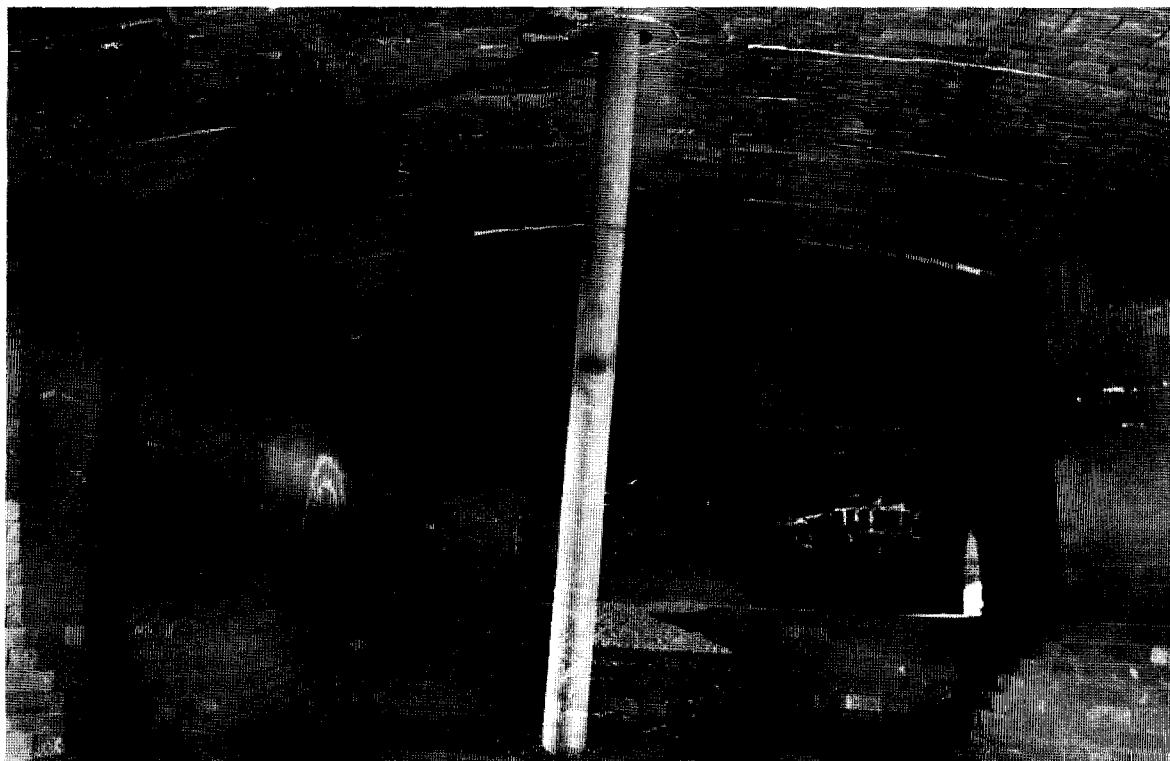


Figure 74: Affinage avec injecteur à oxygène de voûte.

— *vue intérieure du laboratoire d'un four Martin récemment garni, avec un injecteur à oxygène de voûte installé.*

pendant le soufflage d'oxygène, les travaux à effectuer par les portes. La distance entre deux injecteurs doit être d'au moins 2 mètres.

La distance entre les injecteurs de voûte et les autels doit être de 2,5 m au minimum afin que le laitier ne se répande pas, en moussant, dans les cheminées et que les gaz CO formés puissent encore brûler dans le four. La distance entre les injecteurs et le bain de métal doit être d'environ 75 mm. L'efficacité du jet d'oxygène sur le processus d'affinage et la projection du laitier dépend de sa vitesse et de la quantité spécifique d'écoulement en kg d'oxygène par cm^2 de section d'injecteur et par heure. Toutefois, il n'existe pas de conception uniforme sur les valeurs optimales de vitesse de sortie de l'oxygène et des quantités spécifiques d'écoulement, de sorte que nous n'entrerons pas ici dans le détail. La mise en œuvre des injecteurs à oxygène de voûte rend indispensable le dépoussiérage des fumées en raison du dégagement des fumées rousses. Comme les fumées sortant d'un four Martin sont totalement brûlées, c'est-à-dire ne contiennent pas de CO et, dans les aciéries modernes, sont refroidies à environ 200°C dans une chaudière de récupération, après la chambre à empilages, on peut ici mettre en place une installation de dépoussiérage, à moindre frais qu'avec le procédé au convertisseur où l'oxyde de carbone qui se forme est considéré comme perdu pour le procédé métallurgique et doit être brûlé et refroidi dans des installations de dépoussiérage.

Un autre avantage de l'utilisation des injecteurs à oxygène de voûte est la possibilité de pouvoir transformer économiquement la fonte riche en phosphore au four Martin. Une légère scorification du fer, par un choix et une quantité judicieux de chaux et de scorifiants, donnent, avec une bonne marche de laitier, de grandes vitesses de déphosphoration et de décarburation. En outre, il devrait être possible à l'avenir, d'amener directement au bain, de la chaux pulvérisée par les injecteurs de voûte et, partant, d'améliorer grandement le contrôle du laitier au four Martin.

La chaux pulvérisée se dissout dans le laitier plus vite que la chaux en morceaux et doit, par conséquent, en liaison avec la mise en œuvre d'oxygène, simplifier considérablement le contrôle du laitier.

4.3.2. Emploi de l'oxygène gazeux au four électrique

De nos jours, on emploie souvent aussi l'oxygène gazeux au four à arc électrique. Cet emploi de l'oxygène se fait, premièrement pour augmenter le rendement de la fusion, deuxièmement pour l'affinage.



Figure 75: Affinage avec injecteur à oxygène de voûte.

— vue intérieure du laboratoire d'un four Martin, lors de l'affinage avec un injecteur à oxygène de voûte.

- A. *Oxygène pour augmenter le rendement de la fusion.* La mise en place de brûleurs à oxygène de voûte dans le four électrique pour la fusion de la ferraille n'a pu avoir lieu jusqu'à présent, car les gaz de combustion qui se produisent, viennent au contact de la charge, l'oxydent et, de ce fait, s'échappent du four non brûlés. Les pertes thermiques causées par les fumées sont considérables. La combustion du CO qui se forme lors de l'oxydation de la charge, comme au four Martin, n'est pas possible au four électrique en raison de sa combustion entièrement différente. On emploie, de temps à autre, des brûleurs oxygène-mazout au four à arc électrique, simplement pour fondre la ferraille sur les bords. On introduit de deux à quatre brûleurs un peu au-dessus de la surface du bain, tangentielllement à la paroi latérale du four. Les flammes d'oxygène ne doivent pas toucher les électrodes. Au moyen de ces brûleurs à oxygène on peut augmenter le rendement de la fusion, principalement aux fours électriques de grande capacité.
- B. *Oxygène pour affinage.* Pour l'affinage, l'oxygène est souvent introduit au four à arc électrique avec les lances à main non réfrigérées déjà décrites. Ce mode d'emploi de l'oxygène est très avantageux et permet des augmentations de rendement considérables si l'on opère avec un laitier foncé, c'est-à-dire riche en oxyde. On n'a pas, jusqu'à présent, installé d'injecteurs à oxygène refroidis à l'eau aux fours électriques.

Pour l'emploi de l'oxygène gazeux, il faut absolument veiller à ce que les fondeurs soient familiarisés avec les risques d'accidents qui se présentent lors des contacts avec ce fluide. On doit s'assurer, dans l'exploitation, que toutes les robinetteries d'oxygène sont maintenues exemptes d'huile et de graisse. En outre, tout point d'utilisation doit être protégé par des vannes à fermeture rapide. Un bouton poussoir doit suffire à arrêter l'arrivée d'oxygène dans le système de conduites. La *figure 76* représente les appareils de mesure d'un four Martin pour l'oxygène (cf. chap. 4.1.2.).

Enfin, rappelons encore une fois que le rendement des procédés de fusion sur sole, notamment le procédé Martin, est fort accru par l'emploi de l'oxygène pour intensifier la combustion et pour l'affinage. Toutefois, on ne peut travailler économiquement avec l'oxygène que si son prix et les conditions d'exploitation individuelles le permettent.

4.4. LE DÉPOUSSIÉRAGE DES FUMÉES DES ACIÉRIES

4.4.1. Formation et effets des poussières d'aciéries

Les différentes sortes de poussières qui se forment dans les exploitations productrices d'acier proviennent, tantôt des matières chargées avec la fonte,

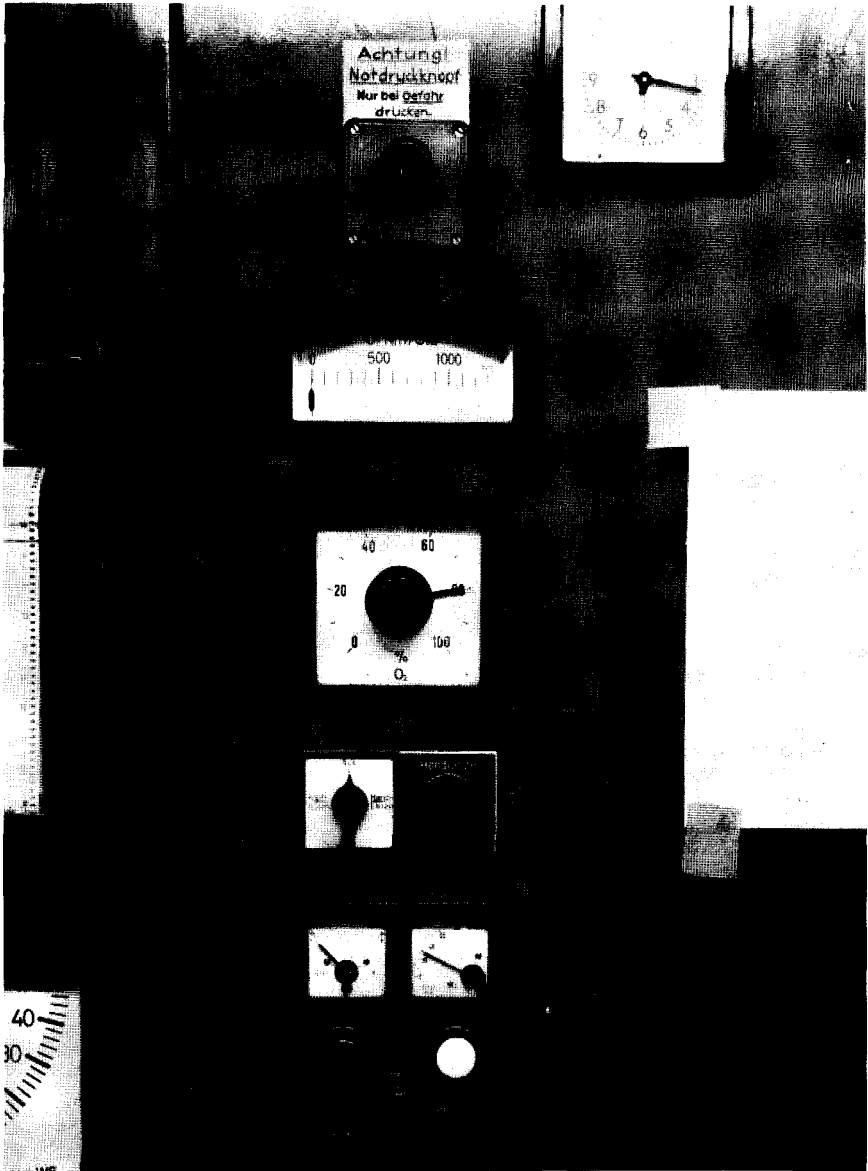


Figure 76: Appareils de mesure et de réglage pour la mise en œuvre d'oxygène au four Martin.

tantôt des éléments d'addition. Les matières étrangères introduites avec la fonte et les additions, passent, pour la plus grande partie, dans le laitier, mais les «fumées» qui se dégagent en fin d'opération et qui accusent une teneur en fer relativement élevée, consistent en particules grossières qui, en outre, en raison de leur haute température, sont encore plastiques et tendent à s'agglutiner. C'est pourquoi, au four Martin par exemple, la plus grande partie des particules de laitier rejetées est retenue dans la chambre à crasses. Au convertisseur Thomas soufflé par le fond, ce rejet est capté par la cheminée ou tombe à son voisinage immédiat sous le nom de poussière de cheminée (tableau I).

Tableau 1 :
Rejets de poussière de différentes exploitations métallurgiques

Appareil	Addition d'oxygène	Rejet de poussière	
		Acier brut kg/t	%
Four Martin	sans	2,7	0,27
Four d°	avec	4,0	0,40
Convertisseur Bessemer	sans	8,5	0,85
d° Thomas	sans	8,5	0,85
Convertisseur à l'oxygène soufflé par en haut (LD)	avec	20,0	2,00
Four à arc électrique	—	5,3	0,53
Four à arc électrique	—	max. 13,0	1,30
Four à arc électrique	—	min. 2,0	0,20

D'une façon générale, on peut dire que la poussière rejetée dans l'atmosphère par les convertisseurs Thomas ou à l'oxygène soufflé par le haut, les fours à arc et les fours Martin, consiste presque exclusivement en oxyde de fer. Ces émanations des exploitations d'aciéries sont connues sous le nom de «fumées rousses» (figure 77).

Au convertisseur Thomas, la fumée rousse se forme particulièrement au cours de la dernière phase de la période de soufflage, parce que, à ce moment, la réaction de l'oxygène de l'air soufflé avec le carbone contenu dans la charge d'acier brut régresse fortement, ce qui fait augmenter la formation des oxydes de fer. Avec le procédé à l'oxygène soufflé par le haut, au cours duquel, pendant toute la fusion, de l'oxygène est soufflé sur le bain, la fumée rousse se forme pendant toute l'opération.

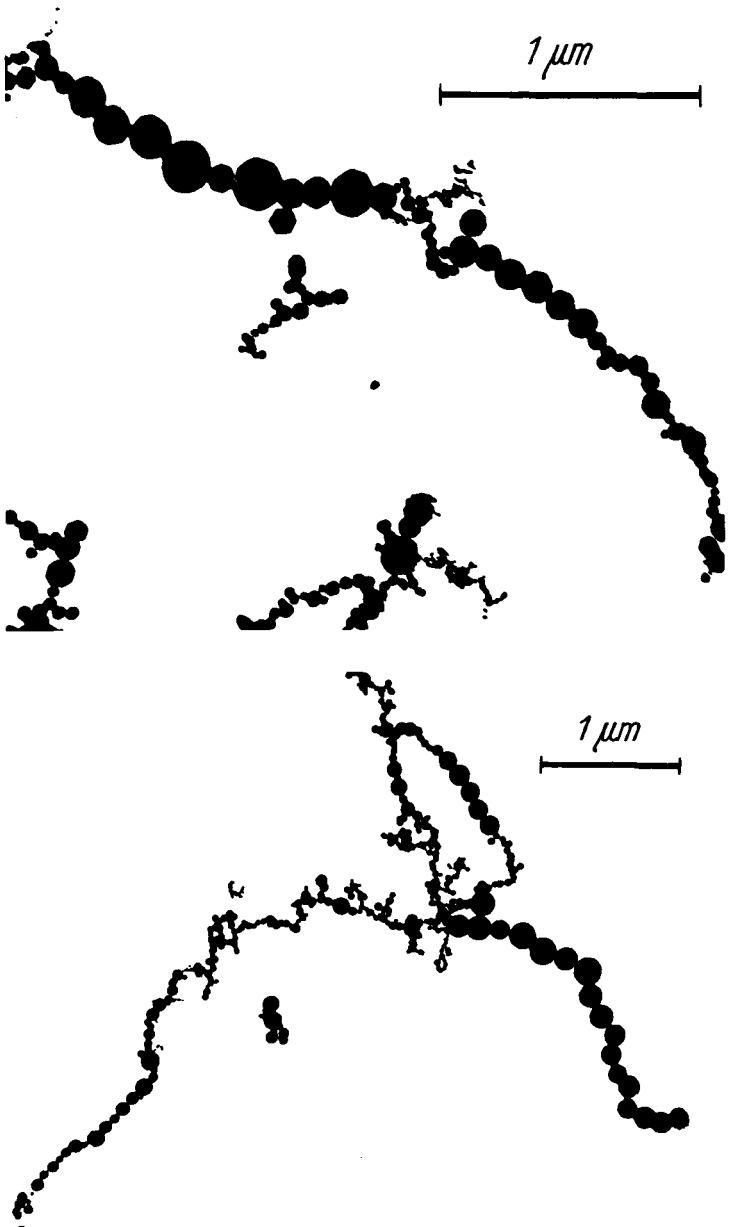


Figure 77 : Reproduction de la fumée rousse vue au microscope électronique

Aux fours à arc ainsi qu'aux fours Martin, la fumée rousse ne se forme que lors de l'addition directe d'oxygène à la lance dans le bain d'acier. Toutefois ces temps dits «d'affinage» sont courts, relativement à la durée totale de l'opération. Au four Martin, d'après les mesures relevées jusqu'à présent, on n'a pas constaté d'augmentation de formation de la fumée rousse lors de l'introduction d'oxygène par les brûleurs au lieu d'air comprimé.

La fumée rousse d'aciérie consiste en oxydes de fer qu'on peut concevoir comme hématites et magnétites. Les hématites ont comme formule chimique Fe_2O_3 et sont d'un rouge lumineux. La formule chimique des magnétites est Fe_3O_4 ; elles sont noir foncé et, en outre, magnétiques et conductrices de l'électricité. Aux températures très élevées au-dessus de $1\,400\text{ }^\circ\text{C}$, Fe_2O_3 se transforme en Fe_3O_4 . Comme ces deux oxydes de fer sont mélangés en proportions différentes selon la marche du processus métallurgique, la nuance de la fumée évolue entre le brun rouge et le brun sombre.

La granulométrie de la fumée rousse est extrêmement fine. La dimension des particules est de $0,01 - 0,1\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu\text{m} = 1/1\,000\ \text{mm}$). Cette dimension de particule correspond à la fumée du tabac ou des cigarettes et est inférieure à la longueur d'onde de la lumière visible. L'effet fortement colorant s'explique par le fait qu'un gramme d'oxyde de fer colore environ $5\ \text{à}\ 6\ \text{m}^3$ d'air en brun rouge intense.

En raison de l'extrême finesse des particules des poussières qui se forment dans les gaz brûlés des aciéries, on ne peut songer à procéder à l'épuration des gaz dégagés que pour les installations à grand rendement qui doivent comporter un degré de dépoussiérage très supérieur à $90\ \%$. On a mis au point de nombreux procédés de dépoussiérage qui reposent sur des principes physiques de différente nature, et une épuration des gaz dégagés au-dessous des limites de la visibilité, qui permettent d'éliminer la fumée rousse. On estime en général la limite de visibilité à $150\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ de fumée. En Allemagne, cette valeur a été fixée par la législation. Les possibilités d'emploi et la mise en place de telles installations sont très variées et doivent être très bien adaptées aux processus métallurgiques. Nous y reviendrons plus loin.

La technique du dépoussiérage a, justement dans l'industrie sidérurgique, accompli des progrès particulièrement importants au cours des dernières années. Cependant, elle ne permet pas encore d'éviter complètement la pollution de l'atmosphère par les poussières des fumées des aciéries. Toutefois l'importance de cette pollution de l'air est généralement surestimée.

Dans le chapitre précédent, il a été exposé que même des poids minimes de poussières d'aciéries peuvent produire un nuage de fumée important.

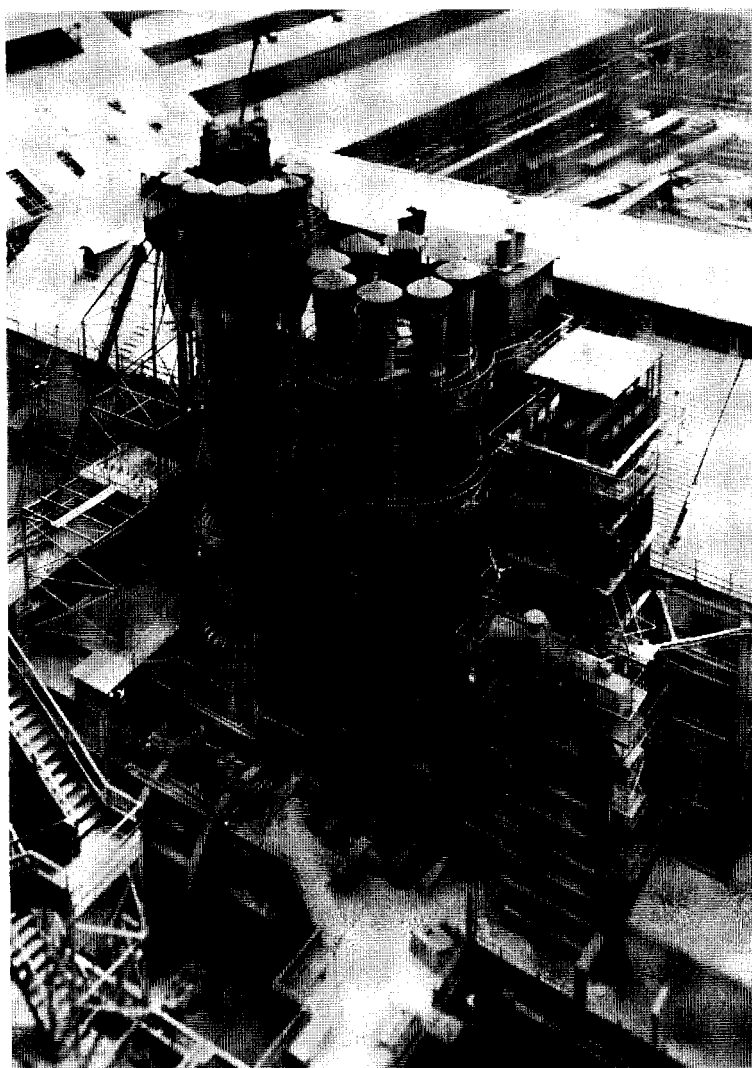


Figure 78 : Cheminée cylindrique refroidie à l'eau avec dépoussiérage par cyclone à l'aciérie Thomas

C'est de là que procède l'effet de l'émission, car les nuages de fumée tamisent la lumière du soleil, c'est-à-dire qu'ils retiennent particulièrement la partie UV (ultra-violette) de la lumière solaire. La lumière UV agit par radiation sur la peau de l'homme et des animaux, en formant de la vitamine D. Cependant ce phénomène est d'importance secondaire, car la base d'une saine administration de vitamine D est une diététique judicieuse. On n'a constaté jusqu'à présent aucun effet nocif du filtrage de la lumière solaire sur le règne végétal.

Selon la grosseur et le poids des particules, et la hauteur de la cheminée d'où émane le rejet, la poussière retombe par terre à une distance plus ou moins grande. On appelle retombée cette chute des particules de poussière de l'atmosphère sur le sol. Les particules grossières retombent dans le voisinage immédiat de la source émettrice, alors que les particules fines sont transportées à plus grande distance. L'influence sur l'homme, les animaux et les végétaux est variable. Alors que les particules grosses et fines ne font, au plus, qu'incommoder l'homme et les animaux en raison de leur action salissante, mais sans altération de santé, le dépôt de ces poussières sur les végétaux peut leur être nuisible. Cependant cet effet ne devient particulièrement nocif que lorsqu'on reste longtemps sans pluie. Des observations faites au cours de recherches sur les plantes ont révélé qu'une averse nettoie si bien les feuilles qu'elles récupèrent complètement leurs fonctions. On a, en outre, constaté que la plupart des plantes offrent une résistance extraordinaire aux poussières industrielles (tableau 2). On a établi, au cours de recherches dans la région de Dortmund que sur environ 200 espèces de plantes examinées, environ 90 % se montrent suffisamment ou remarquablement résistantes.

Seules les particules extra-fines, d'une dimension inférieure à 5mm, ont une influence directe sur la santé de l'homme et des animaux car seules ces particules peuvent parvenir aux poumons par les voies respiratoires. La proportion des poussières extrêmement fines émises par les aciéries est des plus minimes. La présomption que ces particules de poussière ultra-fines, à l'état de traces, seraient cancérigènes, n'a pas été confirmée. D'après les résultats des recherches qui ont été publiés en 1964 au Centre de communications de la Société pour la lutte contre les maladies cancéreuses, toutes les poussières d'aciéries Thomas, LD ou LDAC, ainsi que des aciéries Martin peuvent être considérées comme non cancérigènes parce qu'elles se forment à des températures très supérieures à 1 000 °C. De ce fait, il est exclu que, même éventuellement, des substances cancérigènes contenues dans les matières chargées puissent parvenir dans l'atmosphère. Aux

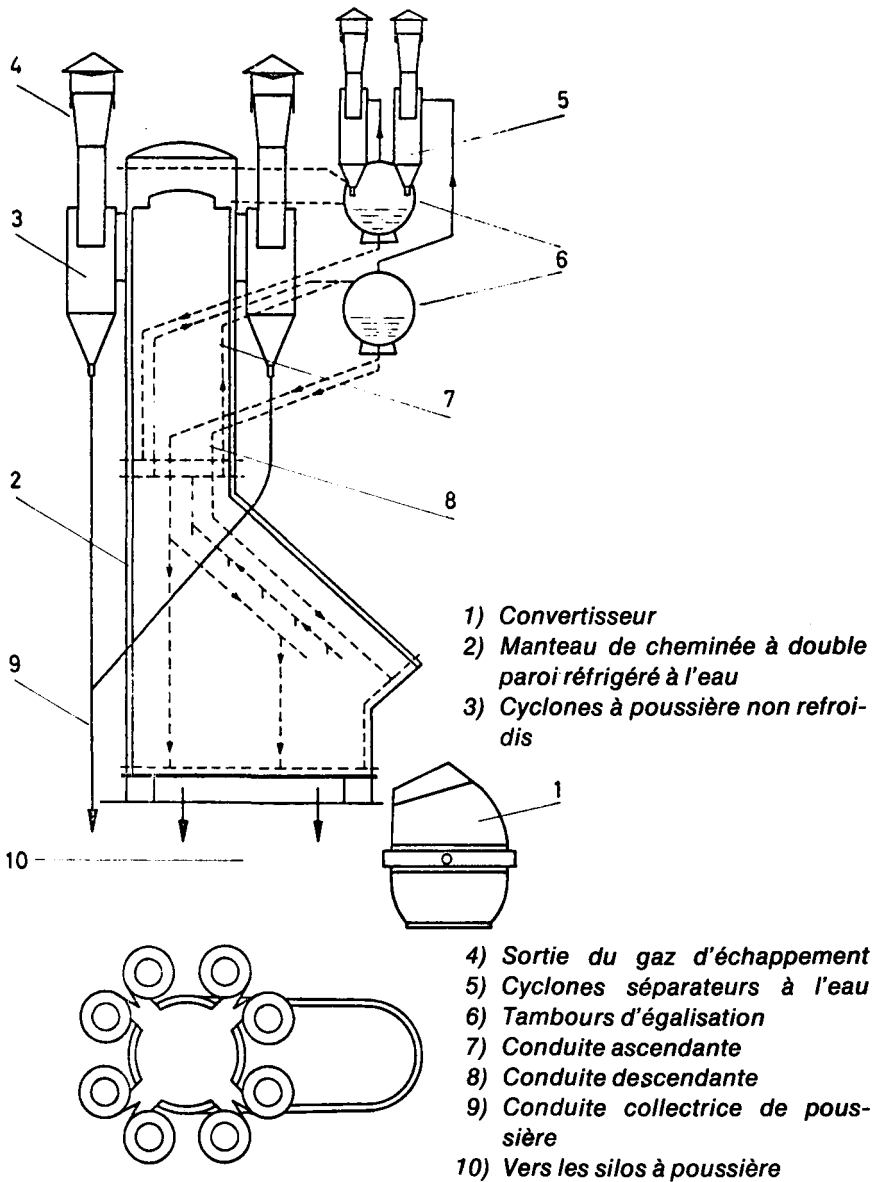


Figure 79 : Cheminée Bamag à quatre cyclones doubles

Tableau 2 : Tableau synoptique de la résistance aux poussières industrielles des plantes constamment vertes et des conifères

	Duis- bourg	Marl	Ober- hausen	Dortmund	Jardin bot. de Dort- mund-Sud
Nombre d'espèces examinées dont il y a eu :	119	127	57	137	205
sans résistance aux poussières ⁽⁰⁾	1	1	0	1	1
peu résistantes aux poussières ⁽¹⁾	13	22	7	6	1
assez résistantes aux poussières ⁽²⁾	60	43	19	50	85
particulièrement résistantes aux poussières ⁽³⁾	46	48	30	62	114
⁽⁰⁾ – sans résistance aux poussières (c'est-à-dire: la plante dépérit) ⁽¹⁾ – peu résistantes aux poussières (la plante se développe mal) ⁽²⁾ – suffisamment résistantes aux poussières (la plante évolue de façon satisfaisante) ⁽³⁾ – particulièrement résistantes aux poussières (la plante est luxuriante) NB : Les restes non mentionnés constituent des pertes qui ne sont pas imputables à des causes atmosphériques.					

hautes températures, toutes les matières se transforment en produits de combustion normaux.

4.4.2. Procédés de dépoussiérage

Comme la marche des convertisseurs Thomas soufflés par le fond entraînait, outre la pollution de l'air, un sérieux encrassement de l'aciérie Thomas elle-même, et une perte de matières ferreuses, on a commencé, au début des années 50, dans l'industrie sidérurgique allemande, à prendre des mesures en vue d'éliminer ces projections. Le premier appareillage, en aval d'un convertisseur, qu'on puisse qualifier d'installation de dépoussiérage, a été une cheminée ronde à cyclones connectés (*figure 78*).

En dehors de l'Allemagne, cette cheminée a également été introduite dans les industries sidérurgiques autrichienne et française. Elle consiste (*figure 79*) en un tube cylindrique en acier, à double paroi, dont l'extrémité supé-

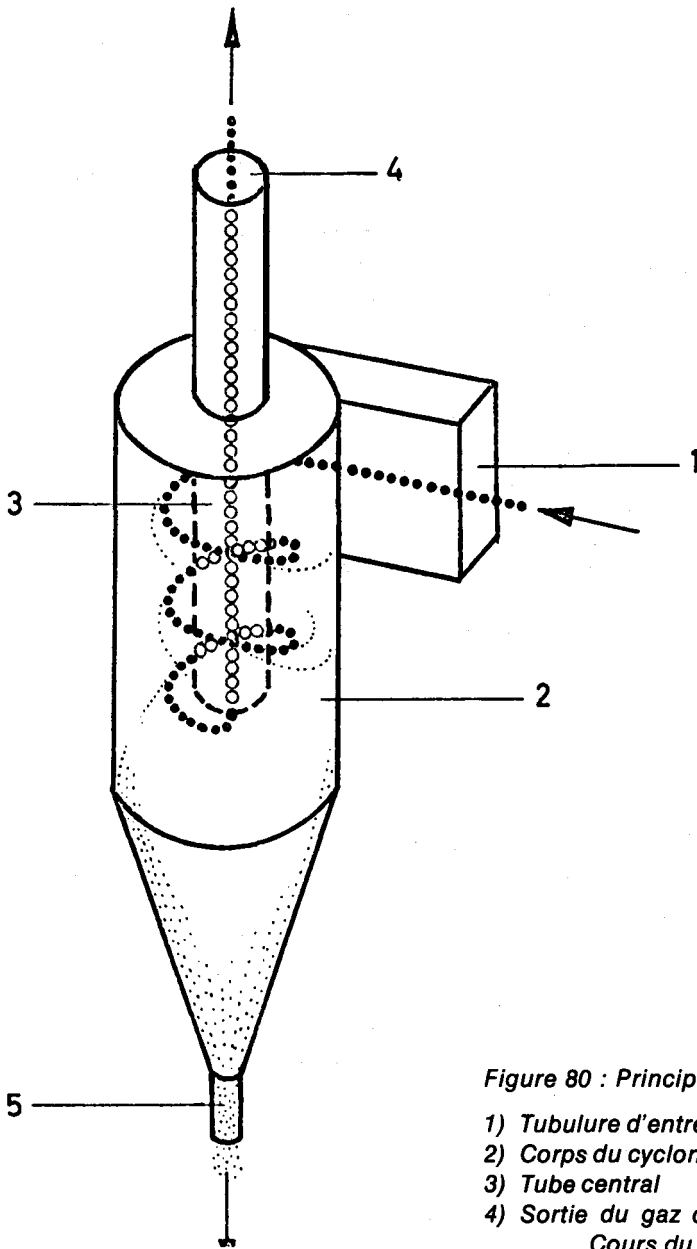


Figure 80 : Principe du cyclone

- 1) Tubulure d'entrée
 - 2) Corps du cyclone
 - 3) Tube central
 - 4) Sortie du gaz d'échappement
- Cours du courant de gaz

rieure est close par un couvercle également refroidi à l'eau. En dessous du couvercle, à l'entour du manteau de la cheminée, se trouvent des ouvertures rectangulaires qui sont reliées aux cyclones. Un cyclone (*figure 80*) consiste en un corps tubulaire qui s'éffile en cône vers le bas et en un tube central qui se dresse à travers le couvercle. Le gaz chargé de poussière pénètre par la tubulure d'entrée qui se trouve sur le manteau extérieur du corps du cyclone et se déplace en un mouvement tournant autour du tube central. De ce fait, les particules de poussière effectuent, elles aussi, un déplacement rapide circulaire. Elles se trouvent rejetées par la force centrifuge ainsi engendrée contre la paroi du cyclone hors du courant de gaz. La poussière tombe vers le bas dans la partie conique du cyclone et est enlevée par une ouverture ad hoc. L'extrémité inférieure de la cheminée s'évase vers le convertisseur en une sorte de hotte protectrice qui capte les gaz s'échappant du bec de la cornue. La cheminée fonctionne par tirage naturel. Son degré d'épuration est de 90 %, ce qui signifie que le dépoussiérage grossier et fin est effectué par ce moyen. Même dans le domaine de la granulométrie la plus fine à 15-20 μm , les cyclones ont encore un degré d'épuration de 50 %; mais au-delà, il diminue très fortement. En employant une cheminée refroidie à l'eau avec graduation de dépoussiérage par cyclone, on peut ramener le rejet des convertisseurs soufflés par le fond jusqu'à 1,1 g/Nm³ de gaz. Mais cette cheminée n'est pas indiquée pour l'élimination des fumées rousses.

Filtres en tissu

Le dépoussiérage des fumées des convertisseurs à oxygène soufflé par le haut et des fours électriques à l'aide de *filtres en tissu* a pris une grande extension ces dernières années. Avec l'apparition des tissus synthétiques en fibres polyacrylnitriles (Redon, Dralon, Orlon, Crylor) et en fibres de polyester (Tergal, Trevira, Dracon), on a pu augmenter considérablement la longévité et les températures de service admissibles des filtres. Les températures maximales d'emploi de ces tissus sont de l'ordre de 120 °C. On peut admettre une température d'emploi considérablement plus élevée, de 250 à 300 °C avec les tissus en fibre de verre. Ils sont employés là où on ne peut ou n'a pas besoin de refroidir les gaz de fumée à 120 °C.

Après l'aspiration des fumées hors d'un convertisseur LD ou d'un four électrique de fusion intervient le refroidissement jusqu'à moins de 1 000 °C dans un carneau ou dans une cheminée équipée en chaudière de récupération. Pour le refroidissement ultérieur à la température d'entrée admis-

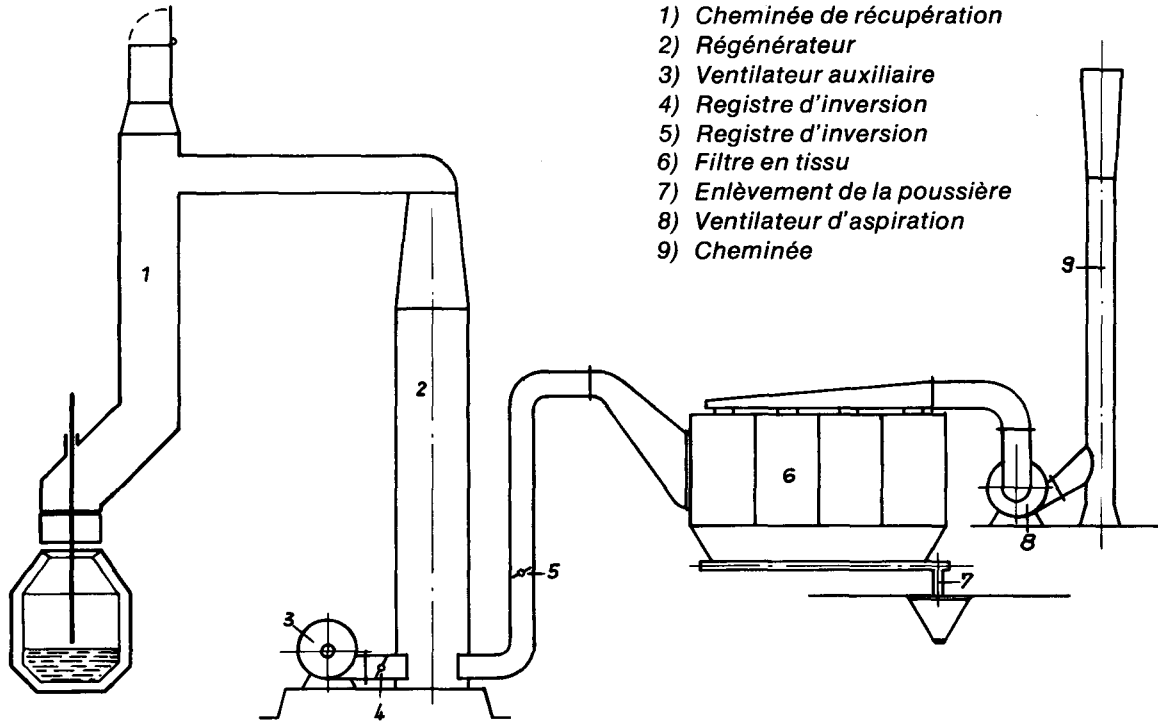
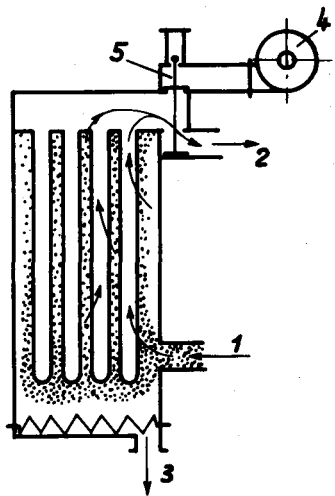


Figure 81 : Tracé d'une installation de dépoussiérage à filtres en tissu

sible au filtre, en ce qui concerne les filtres en tissu (*figure 81*), on utilise principalement des régénérateurs (accumulateurs de chaleur). Le régénérateur est garni de briques réfractaires qui forment des carneaux verticaux que les fumées parcourent de haut en bas. Pendant la période de soufflage du convertisseur, l'accumulateur de chaleur s'échauffe, ce qui ne fait monter la température de sortie des fumées que d'environ 40 °C. Pendant l'arrêt du soufflage, de l'air est soufflé à contre-courant, de bas en haut, à travers le générateur, par un ventilateur auxiliaire. La chaleur accumulée pendant la période de soufflage se transmet à l'air et le régénérateur refroidit. Comme il n'y a pas d'encrassement de l'accumulateur de chaleur en raison des cheminées lisses de l'empilage et de la vitesse élevée des gaz, on peut évacuer l'air chaud dans l'atmosphère pendant la période de refroidissement au dôme du régénérateur.

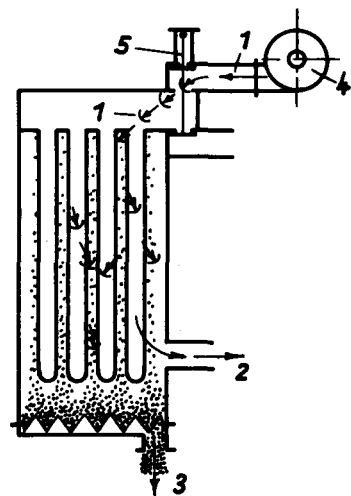
Avec des quantités de fumées et des températures d'entrée au régénérateur extrêmement variables, il peut être nécessaire, pour obtenir un réglage plus précis de la température d'entrée au filtre, d'installer derrière le régénérateur un refroidisseur supplémentaire par pulvérisation d'eau. L'eau doit être pulvérisée assez finement pour pénétrer dans le filtre en tissu sous forme de vapeur car les gouttelettes d'eau subsistant encore dans les fumées accroissent le risque d'obstruction du filtre. On ne peut obtenir un degré de séparation satisfaisant et éviter l'obturation quand les dimensions des particules des fumées rousses sont petites que si l'on agglutine plusieurs des plus petites particules de poussière en une particule plus forte. Celle-ci se produit par la collision des particules de poussière qui, chargées d'électricité les unes négative et les autres positive, s'attirent et se réunissent en une particule plus grosse. Avec les fumées rousses, cette union de particules est encore accrue du fait des forces magnétiques d'attraction, car Fe_3O_4 est magnétique et attire les autres oxydes de fer comme FeO et Fe_2O_3 .

La séparation des particules de poussière les plus grosses s'opère, avec les filtres en tissu, par l'impact de ces particules sur les fibres ou la couche de poussière déjà déposée à la surface du tissu; les fumées rousses forment en effet à la surface du tissu une couche assez compacte qui confère au filtre un effet de séparation parfait. Cette couche de poussière fait office de matériau filtrant, alors que le tissu n'assume plus qu'un rôle de support. Pour la séparation des particules les plus fines (0,01 à 0,5 μm), l'effet de l'énergie électrostatique joue aussi un rôle. La perte de pression du filtre est de l'ordre de 200 mm d'eau.



a) Période de dépoussiérage

- 1) Gaz de fumée chargé de poussière
- 2) Gaz de fumée épuré
- 3) Enlèvement de la poussière
- 4) Ventilateur
- 5) Registre d'inversion



b) Période d'épuration

- 1) Air pulsé sous contrainte
- 2) Sortie de l'air
- 3) Enlèvement de la poussière
- 4) Ventilateur
- 5) Registre d'inversion

Figure 82 : Fonctionnement du filtre en tissu Prat-Daniel «Vibrant»

La *figure 82* représente la coupe d'un élément de filtre en tissu pendant la période de dépolluissage et pendant l'épuration. Le nettoyage des différents éléments s'effectue en faisant parcourir le sac filtrant pendant quelques secondes par de l'air pulsé par un ventilateur, ce passage s'effectuant en sens contraire de celui des fumées à dépolluier grâce à l'inversion d'un registre (procédé à contre-courant). La poussière retenue par le sac filtrant tombe dans un entonnoir et est enlevée par une hélice transporteuse. Elle est alors agglomérée par addition d'un agent agglomérant liquide, dans une installation de «bouletage», en boulettes d'un diamètre de 20 à 40 mm qui sont recyclées pour la production de la fonte ou de l'acier brut.

Les laveurs en tant que dépolluiseurs humides

Parmi les procédés de dépolluissage humide, les laveurs pour le dépolluissage des fumées d'aciéries tiennent une place considérablement plus importante que les autres procédés de dépolluissage humide tels que les cyclones humides, roto-clones, laveurs à compartiment ou désintégrateurs Theisen. Pour le dépolluissage des mélanges gaz-air explosifs ou inflammables, il n'y a pas de risque d'explosion avec les laveurs.

Le principe du laveur repose sur la juxtaposition de particules de poussière et de gouttelettes d'eau et sur l'évacuation des gouttelettes chargées de particules de poussière hors du courant de fumées. Il en résulte qu'un laveur comporte deux zones de travail.

- A. Une zone de contact dans laquelle le brouillard de pulvérisation et les gaz chargés de poussière sont rassemblés.
- B. Une zone de séparation, dans laquelle les gouttelettes de brouillard auxquelles adhèrent des particules de poussière sont évacuées du courant de fumées.

Avec les laveurs Venturi installés dans l'industrie sidérurgique, le liquide de lavage est injecté dans la conduite de fumées et atomisé en brouillard grâce à la suppression proprement dite ou grâce au courant de fumées lui-même. Dans ce cas, la vitesse des fumées au point d'injection doit être assez grande pour que la plus grande partie du liquide de lavage injecté soit entraînée par le courant de fumées sous forme de gouttelettes extrêmement fines. Pour ne provoquer qu'une perte de pression aussi réduite que possible (ceci afin de limiter la consommation d'énergie électrique du ventilateur d'aspiration), le courant gazeux doit posséder une vitesse d'environ 100 m/s dans un injecteur Venturi (*figure 83*) et le liquide de lavage être injecté au point le plus resserré.

- 1) *Entrée du gaz de fumée*
- 2) *Sortie du gaz de fumée*
- 3) *Liquide de lavage*
- 4) *Confuseur*
- 5) *Gorge*
- 6) *Diffuseur*
- 7) *Perte de pression Δh*

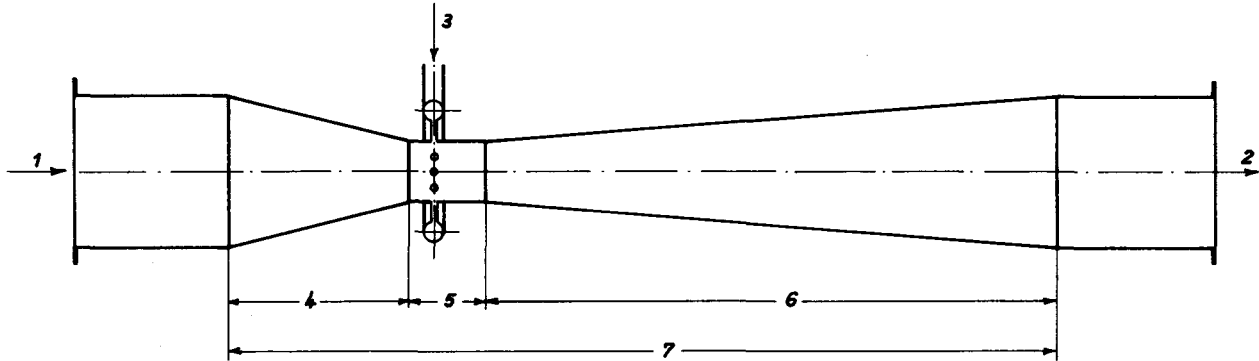


Figure 83 : Configuration d'un épurateur Venturi

L'évacuation des gouttelettes de liquide chargées de poussière en suspension dans les fumées présente une importance primordiale car les gouttelettes qui subsistent dans le courant gazeux évacué à l'air libre nuisent au degré d'épuration du laveur. Normalement, dans un laveur de construction correcte, les gouttes sont d'une grosseur telle qu'elles peuvent être éliminées du courant de gaz par de simples séparateurs à force centrifuge (voir Cyclones).

Le degré d'épuration, pour une nature de poussière donnée, dépend presque entièrement de la perte de pression du laveur; il est pratiquement indépendant de la dimension et du type de construction. L'énergie absorbée par la quantité et la vitesse des fumées ainsi que par la pression d'injection et la quantité de liquide injectée dans le Venturi est appelée énergie de contact.

L'importance de cette énergie de contact détermine le degré d'épuration du laveur ou, en termes plus simples, la quantité des particules de poussière qui sont retenues par les gouttelettes d'eau.

La *figure 84* donne le degré d'épuration des poussières d'un convertisseur LD et d'un four Martin en fonction de la puissance de contact. On y voit que, pour un degré de séparation de 99 % au four Martin, l'énergie de contact doit être environ quatre fois plus forte que pour la poussière du convertisseur LD. La consommation totale d'énergie du laveur est plus élevée que l'énergie de contact en raison des pertes mécaniques et électriques dans les moteurs, conduites et ventilateurs.

Outre l'énergie de contact, l'effet de condensation a, lui aussi, une influence sur l'accroissement du degré d'épuration. Si un gaz saturé de vapeur d'eau est mis en contact avec une quantité suffisante d'eau de lavage, la température du gaz s'abaisse avec condensation d'eau parce qu'à une température déterminée, un gaz ne peut absorber qu'une quantité limitée d'eau sous forme de vapeur, celle-ci se condensant en gouttelettes dès qu'il y a refroidissement. C'est ainsi que se forme la pluie; les nuages saturés de vapeur d'eau passent dans des couches d'air plus froid et abandonnent l'excédent de vapeur d'eau sous forme de pluie.

Il faut signaler en outre qu'il y a également condensation par augmentation de la pression du gaz dans le diffuseur du Venturi (*figure 83*).

L'effet de condensation peut se traduire de deux façons :

- A. Les particules de poussière agissent comme noyaux de condensation pour la formation des gouttes, grâce à l'énergie électrique qui en émane du fait de leur charge électrostatique; ainsi, la grosseur des particules et le degré d'épuration augmentent.

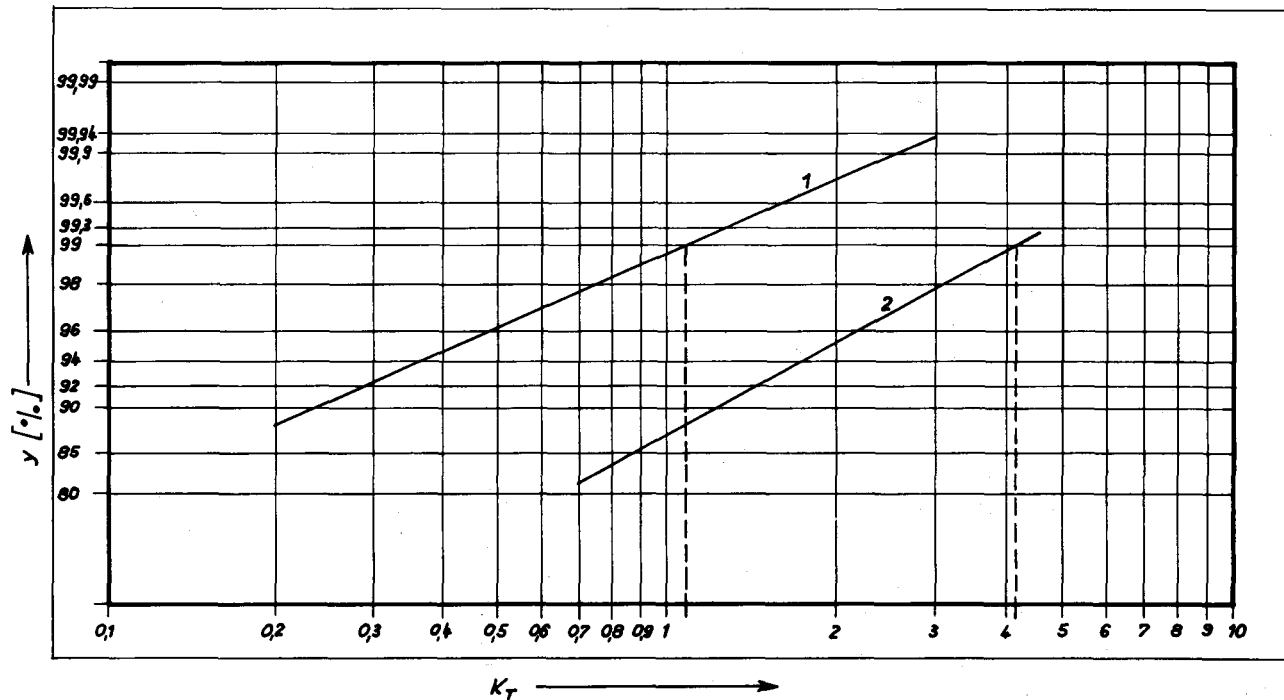


Figure 84 : Rendement d'épuration y en %, en fonction de la puissance de contact K_T en kWh/1 000 m³ de gaz, de la poussière d'un convertisseur LD ⁽¹⁾ et d'un four Martin ⁽²⁾

B. La vapeur qui se condense sur les gouttes froides transporte avec elle des particules de poussière qui s'y déposent.

Avant le dépoussiérage, le gaz sortant du convertisseur ou du four électrique ou du four Martin doit d'abord être aspiré et refroidi à une température convenable dépendant du procédé de dépoussiérage choisi. Nous prendrons comme exemple un convertisseur à oxygène soufflé par le haut.

Il existe trois méthodes différentes d'aspiration : le procédé à hotte ouverte, le procédé du volume minimal de fumées et le procédé OG (*figure 85*).

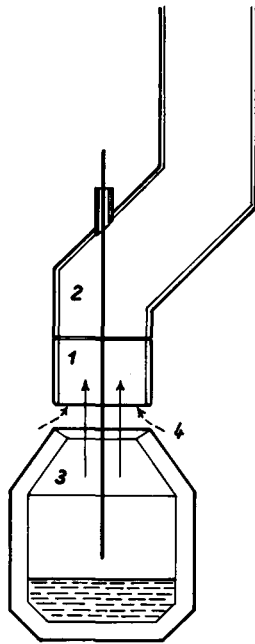
Avec la hotte ouverte, les gaz émis par le convertisseur, composés en volume de 80 à 90 % de CO et de 10 % de CO₂ sont brûlés partiellement ou totalement dans la chaudière consécutive par introduction d'air supplémentaire. Si l'on peut utiliser la vapeur produite dans la chaudière, on brûle les gaz s'échappant du convertisseur grâce à un excès d'air $n = 1,5$, c'est-à-dire qu'on aspire 50 % d'air de plus qu'il n'est nécessaire pour la combustion complète du CO ou du CO₂. Si la vapeur produite doit être lâchée à l'air libre, il ne sera aspiré qu'une quantité d'air suffisante pour éviter la pénétration des gaz dans la halle. L'excès d'air est alors $n = 0,3$ à $0,4$. Le gaz émis par le convertisseur ne brûle alors que partiellement, sa combustion est achevée à la torche située après l'installation de dépoussiérage; la teneur de CO est alors de 30 à 40 %.

Avec le procédé du volume minimal de fumées, une petite partie du gaz du convertisseur est aspirée, à travers la section annulaire entre les hottes extérieure et intérieure, et dépoussiérée séparément. On évite ainsi une entrée d'air vers le gaz aspiré par la hotte intérieure (excès d'air $n = 0$). Le gaz peut, après dépoussiérage, être utilisé pour le chauffage d'un four industriel ou d'une chaudière avec un pouvoir calorifique d'environ 2 200 kcal/Nm³. Avec le procédé OG (OG = Oxygen Converter Gas-Recovery Process = procédé de récupération de gaz au convertisseur à oxygène), le gaz peut généralement être utilisé s'il a le même pouvoir calorifique. Pour permettre de capter le gaz hors du convertisseur sans combustion, l'espace entre le bec du convertisseur et la hotte abaissable est rendu étanche à l'air extérieur par un rideau de protection d'azote.

Le choix du procédé d'aspiration est d'une importance primordiale pour l'établissement de la chaudière de récupération consécutive, du condenseur de lavage et de l'installation de dépoussiérage proprement dite. Le tableau 3 indique, pour les trois procédés, la quantité de fumées par Nm³ de gaz émis par le convertisseur (80 % CO et 20 % CO₂) et pénétrant dans le condenseur de lavage, quantité qui détermine la dimension et le rendement de la chaudière de récupération du condenseur et de l'installation de dépous-

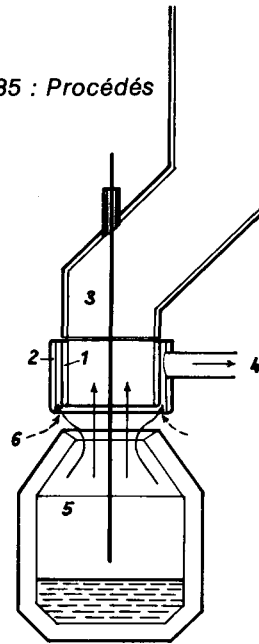
Figure 85 : Procédés

d'aspiration divers



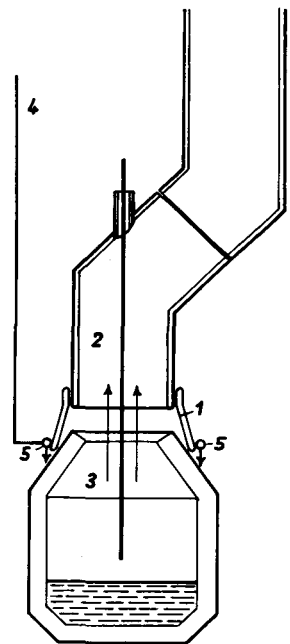
HOTTE OUVERTE

- 1) Hotte refroidie
- 2) Chaudière de récupération
- 3) Convertisseur
- 4) Entrée de l'air



KRUPP - PROCÉDÉ À GAZ RÉDUIT

- 1) Hotte intérieure
- 2) Hotte extérieure
- 3) Chaudière de récupération
- 4) Vers le dépeussierage séparé
- 5) Convertisseur
- 6) Entrée de l'air



PROCÉDÉ OG BAUMCO-DEMAG

- 1) Hotte annulaire abaissable
- 2) Hotte à gaz d'échappement
- 3) Convertisseur
- 4) Conduite à azote
- 5) Voile d'azote

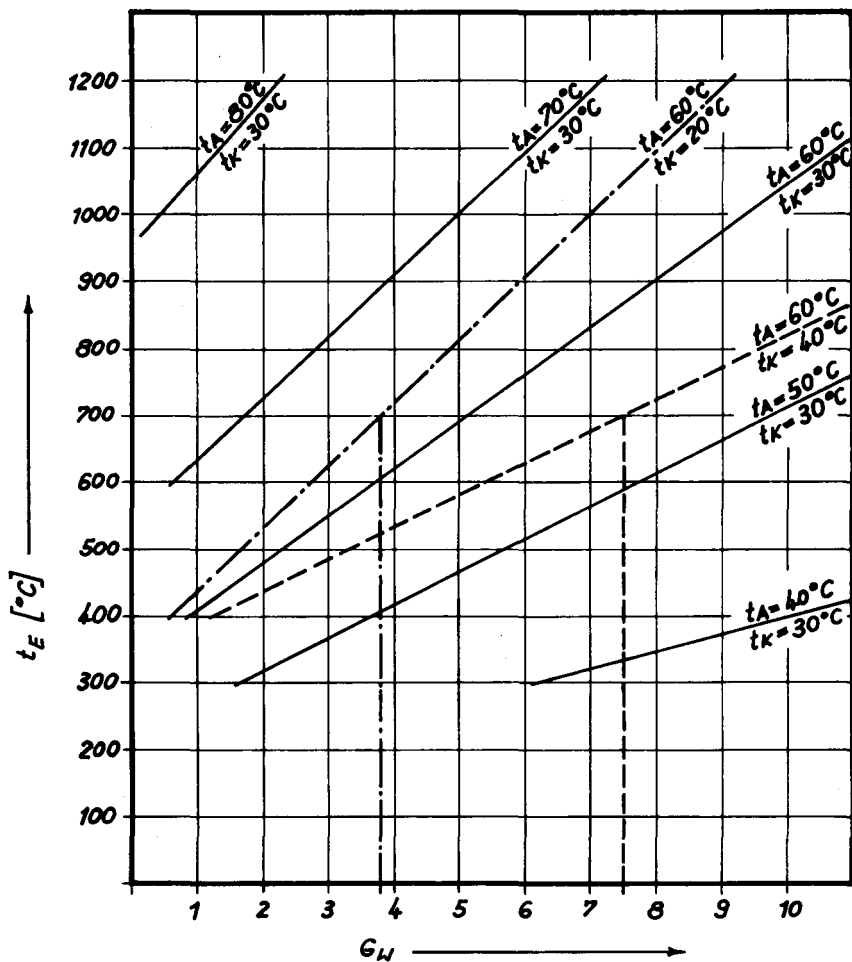


Figure 86 : Température de sortie t_A du gaz de fumée hors du laveur réfrigérant, en fonction de la température d'entrée des fumées t_E , de la température de l'eau de refroidissement t_K et de la consommation d'eau du laveur G_W en Kg H₂O/Nm³ de fumées sèches

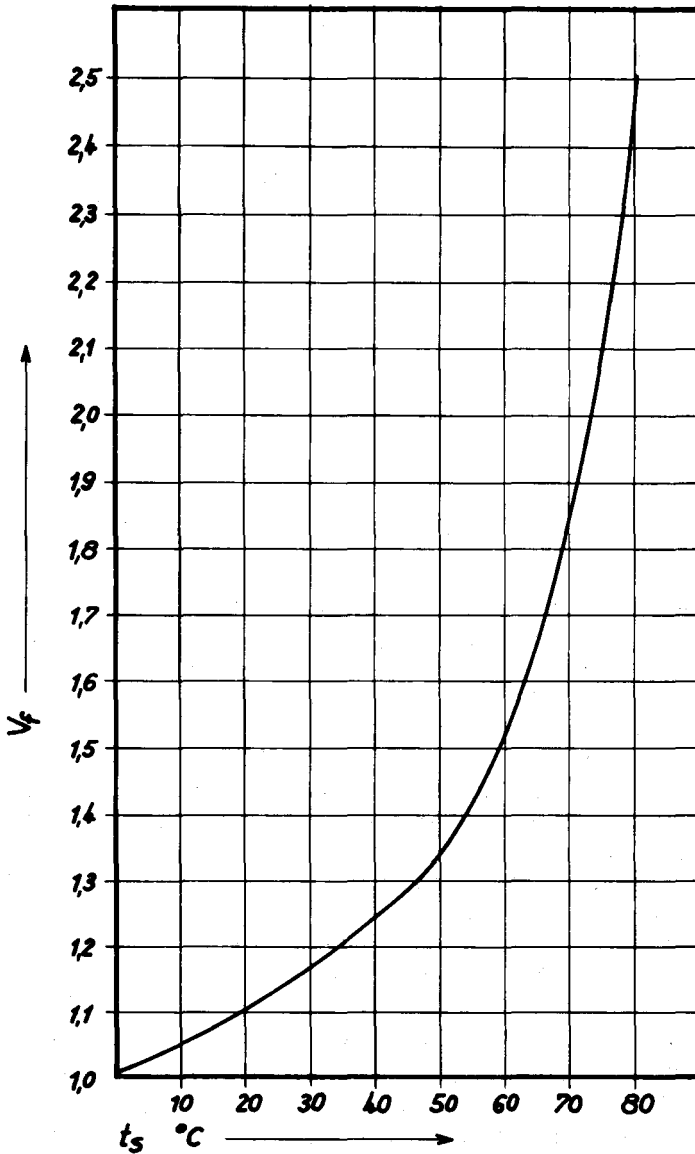


Figure 87 : Variation de volume V_f en m^3 de fumée humide/ Nm^3 de fumée sèche, d'une fumée saturée de vapeur d'eau, en fonction de la température de saturation t_s en °C.

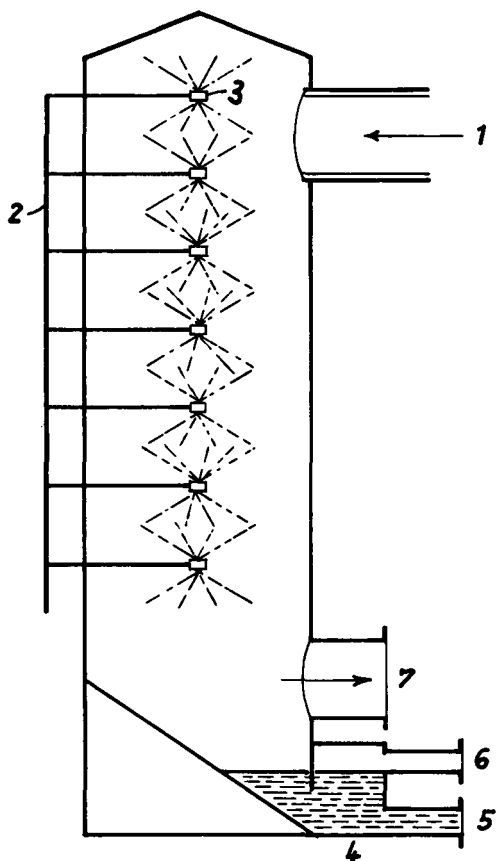
Tableau 3 : Volume de fumées et chaleur dégagée, pour différents procédés d'aspiration.

Procédé d'aspiration	Nm ³ de gaz de fumée	Quantité de chaleur dégagée kcal/Nm ³ de gaz émis par le convertisseur
	Nm ³ de gaz émis par le convertisseur	
Hotte ouverte n = 1,50	3,45	3 010
Hotte ouverte n= 0,35	1,53	1 445
Procédé OG Baumco-Demag	1,02	600
Procédé Krupp du volume minimal de fumées	0,98	582

siérage; le tableau indique aussi la quantité correspondante de chaleur dégagée.

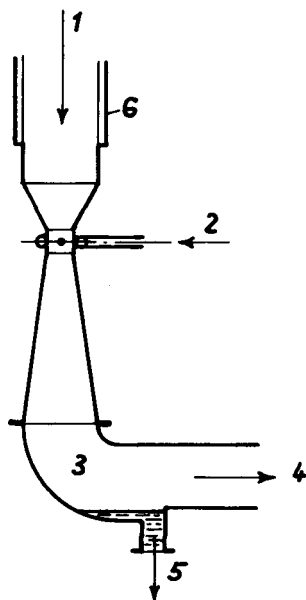
Pour le dépoussiérage fin au laveur Venturi, les fumées doivent être refroidies à une température de 40 à 80 °C. Le refroidissement s'effectue d'abord dans une chaudière de récupération et ensuite au moyen d'eau de réfrigération. Dans la chaudière, la chaleur est transmise soit principalement par rayonnement, à environ 700 à 1 000 °C, soit grâce à une section de convection supplémentaire, par contact des fumées avec les tubes de la chaudière à 300 °C. Les fumées sont ensuite refroidies directement par de l'eau dans le laveur de manière à obtenir la température voulue exigée pour le dépoussiéreur Venturi. La température de sortie des fumées après l'action de l'eau de réfrigération dépend de la température d'entrée du gaz, de celle de l'eau de réfrigération et de la quantité d'eau amenée au laveur. On voit sur la *figure 86* par exemple qu'avec une température d'entrée à 700 °C des fumées dans un laveur et un refroidissement poussé jusqu'à $t_A = 60$ °C, avec une température d'eau $t_K = 40$ °C, une quantité d'eau de 7,5 kg par Nm³ de fumées sèches est nécessaire, tandis qu'avec une température d'eau de réfrigération $t_K = 20$ °C, la consommation d'eau tombe à 3,7 kg par Nm³ de fumées sèches. La dimension et la consommation d'énergie du laveur Venturi, comme dépoussiéreur fin, ainsi que celles du ventilateur d'aspiration, dépendent de la température de sortie du laveur réfrigérant, laquelle est en même temps la température d'entrée du gaz du laveur Venturi, parce que la quantité de fumées saturées de vapeur d'eau rapportée à un Nm³ de sec s'accroît fortement avec la température (*figure 87*).

Figure 88 : Types de laveurs réfrigérants



a) Laveur vertical

- 1) Entrée du gaz de fumée
- 2) Conduite d'eau de réfrigération
- 3) Pulvérisateurs
- 4) Fermeture hydraulique
- 5) Écoulement des boues
- 6) Trop-plein
- 7) Sortie du gaz de fumée



b) Laveur Venturi

- 1) Entrée du gaz de fumée
- 2) Entrée de l'eau de réfrigération
- 3) Séparateur Elbow
- 4) Sortie du gaz de fumée
- 5) Sortie de l'eau boueuse
- 6) Chaudière de récupération

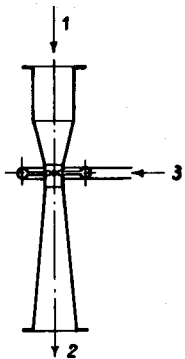
Pour obtenir une température de sortie de fumées aussi basse que possible, on peut :

- A. Augmenter le débit d'eau de réfrigération ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{Nm}^3$ de fumées sèches) au prix d'une plus forte consommation d'eau, ou diminuer la quantité de fumées.
- B. Réduire la température d'entrée du gaz dans le laveur réfrigérant en intercalant une chaudière intégrale (sections de rayonnement et de convection).
- C. Maintenir la température d'entrée de l'eau de réfrigération aussi basse que possible. Comme types de laveurs réfrigérants (souvent appelés aussi saturateurs), on installe principalement dans l'industrie sidérurgique des laveurs verticaux et des saturateurs Venturi peu encombrants. Les deux types sont de construction simple et n'entraînent que des frais d'entretien réduits (*figure 88*).

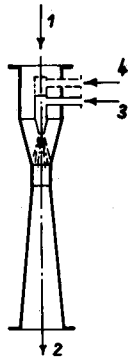
Outre le refroidissement des fumées, il incombe au laveur réfrigérant de séparer les plus grosses particules de poussière des fumées chargées de 10 à 30 g de poussière par m^3 . Avec un laveur refroidisseur venturi, on peut séparer environ 80 à 85 % de la poussière totale, avec une perte de pression de 200 mm d'eau. Cependant c'est pour les 15 à 20 % résiduels qu'il faut fournir le travail de dépoussiérage principal parce que cette poussière possède pour 80 % une granulométrie inférieure à $0,8 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$), et pour une quantité encore notable, une granulométrie de $0,01 \mu\text{m}$ seulement.

L'énergie de contact nécessaire pour obtenir un dépoussiérage fin ne présentant plus qu'une teneur en poussière de $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ de gaz est produite dans des appareils Venturi de différents types (*figure 89*). Dans tous les cas, les fumées sont accélérées à une vitesse d'environ 100 m/s et le liquide de lavage est ou bien injecté ou bien entraîné par le courant de gaz. La juxtaposition des particules de poussière et des gouttelettes d'eau est réalisée par inertie et par l'effet de condensation. Les pertes de pression des appareils se situent entre 700 et 1 200 mm d'eau, la consommation d'eau atteint de 0,3 à 1 m^3 d'eau pour $1 000 \text{ m}^3$ de fumées.

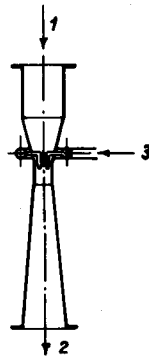
Avec le Pease-Anthony-Venturi classique, l'eau de lavage est injectée au point le plus étroit du tube Venturi, sous une pression de 1 à 3 atmosphères, perpendiculairement au courant gazeux; elle est pulvérisée en gouttelettes extra-fines par le brusque changement de direction. Même les particules de poussière au-dessous de 0,1 sont, en grande partie, arrêtées. Les épurateurs Venturi de la *figure 89 b/c* ont ceci de particulier que l'eau de lavage est



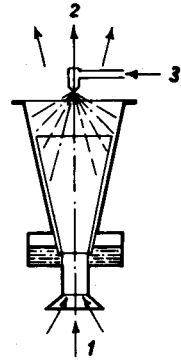
a) Séparateur Pease-Anthony-Venturi



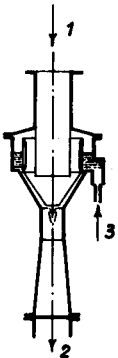
b) Injecteur Venturi



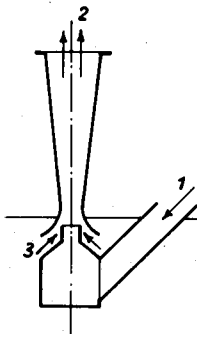
c) Imadra-Venturi



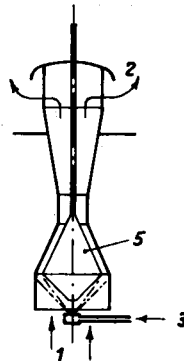
d) Beth-Venturi



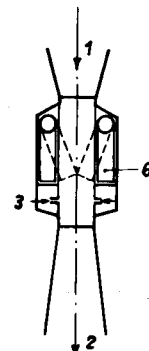
e) SF-Venturi pour eau boueuse



f) Venturi pour eau boueuse



g) Laveur volumétrique



n) Pease-Anthony-Venturi à gorge réglable

- 1) Entrée du gaz
- 2) Sortie du gaz
- 3) Liquide de lavage
- 4) Air de pression
- 5) Cône réglable
- 6) Gorge réglable

Figure 89 : Types divers d'épurateurs Venturi

soufflée ou injectée parallèlement au courant de gaz. Dans un autre procédé (*figure 89 d*), l'eau de lavage n'est pas injectée au point le plus resserré, mais à l'extrémité du diffuseur, à contre-courant du gaz.

La particularité de l'appareil Venturi représenté *figure 89 e/f* réside dans le fait que l'eau de lavage est convertie en brouillard par le courant gazeux. Comme il n'est pas besoin de pulvérisateurs à faible section, l'eau de circulation contenant une faible proportion de matières solides peut même être employée comme liquide de lavage.

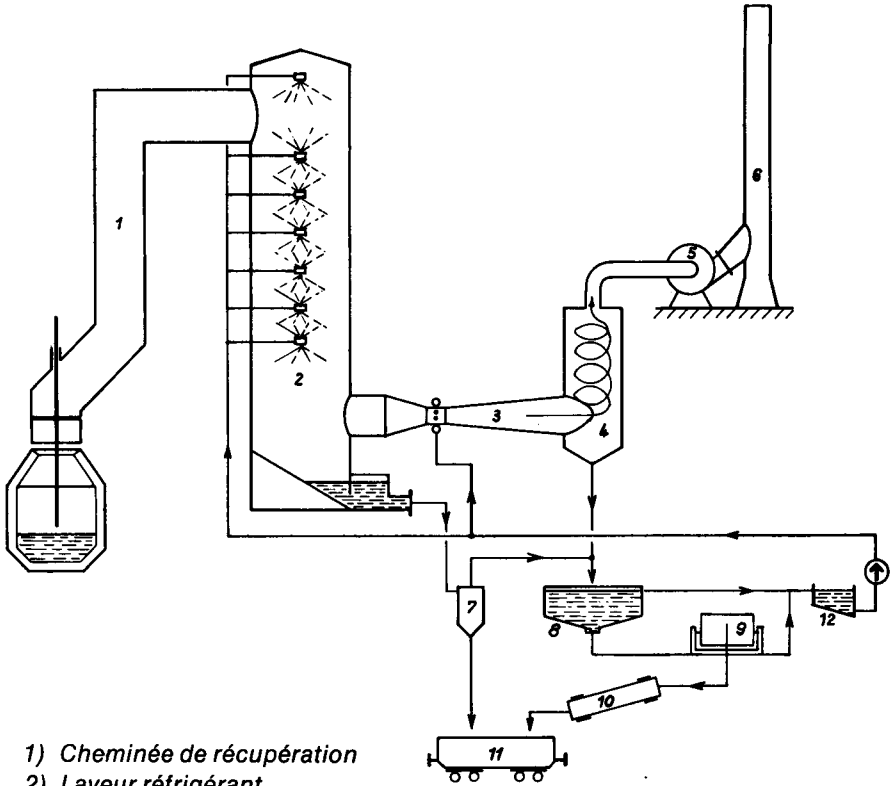
Tous les laveurs Venturi décrits ci-dessus fonctionnent avec des sections établies une fois pour toutes, de sorte que, lorsque les quantités de fumées sont irrégulières, la perte de pression, la conduite de mise en contact et, par conséquent, le degré d'épuration varient aussi. On peut éviter cet inconvénient avec le laveur volumétrique (*figure 89 g*). Ici, l'ouverture annulaire à cône réglable peut être adaptée au volume du courant gazeux par un réglage de la pression différentielle à une valeur théorique constante, de telle façon que la vitesse au point le plus étroit reste toujours constante.

On obtient le même résultat avec un Pease-Anthony-Venturi à cône réglable (*figure 89 h*). Ces deux laveurs Venturi adaptables à la quantité de gaz débitée ne permettent le maintien d'un degré de dépoussiérage constant qu'avec le procédé à volume de fumée minimal et avec le procédé OG.

A la suite de chaque laveur Venturi doit être installé un séparateur qui précipite les gouttelettes de liquide chargées de poussière. Comme séparateurs, on emploie principalement les cyclones, dont différents types existent, et les séparateurs Elbow (à coude) (*cf figure 88 b*). S'il reste une partie importante des gouttelettes dans les fumées, le rendement de dépoussiérage est inévitablement détérioré et les fumées sortent de la cheminée d'évacuation avec une coloration brun jaunâtre. Si l'on recueille quelques-unes des gouttes qui tombent de cette fumée jaune, on peut distinguer très nettement les particules de poussière incluses dans les gouttes d'eau.

Traitement des boues

La poussière retenue dans le laveur refroidisseur et le dépoussiéreur fin s'écoule avec l'eau de lavage vers l'installation de récupération d'eau épurée et de boue (*figure 90*). Mais en raison de sa teneur en granules de fer et en grosses poussières, la poussière précipitée dans le laveur refroidisseur ne peut pas être essorée au tambour à vide. En conséquence, la poussière est extraite de l'eau boueuse par un séparateur primaire spécial (Hydrocyclone ou caisse de décantation) et livrée à l'installation de «boule-



- 1) Cheminée de récupération
- 2) Laveur réfrigérant
- 3) Épurateur Venturi fin
- 4) Séparateur
- 5) Ventilateur d'aspiration
- 6) Cheminée
- 7) Hydrocyclone
- 8) Condenseur
- 9) Filtre à vide
- 10) Four trommel
- 11) Wagon
- 12) Fosse de pompe

Figure 90 : Installation de dépoussiérage d'un convertisseur à oxygène soufflé par le haut avec hotte ouverte et croquis du principe du traitement des boues

tage» ou déversée directement sur wagon. L'eau boueuse du séparateur primaire est emmenée en même temps que celle du séparateur disposé après le dépoussiérage fin à un condenseur dans lequel s'opère la séparation des particules de matière solide et de l'eau par simple décantation. La boue retirée du condenseur est alors essorée dans un tambour à vide. Celui-ci est composé d'un tambour rotatif sur lequel est fixé un tissu filtrant. Si, à l'intérieur du tambour, on exerce une forte dépression (vide), la boue est aspirée de la cuve dans laquelle tourne le tambour. Pendant une révolution du tambour de 270° l'eau est aspirée à travers le tissu, et la boue enlevée ensuite par un racloir. La boue essorée, à 30 % d'humidité, est durcie par addition de 10 % de chaux ou bien séchée dans des fours appropriés, de manière à pouvoir être traitée éventuellement dans l'installation d'agglomération. L'eau boueuse purifiée sortant du condenseur et du tambour à vide est renvoyée au laveur refroidisseur et au dépoussiéreur fin.

Grâce à la séparation des poussières de l'eau boueuse, on récupère entre 0,7 et 1 % du Fe de la charge métallique d'un convertisseur à oxygène soufflé par le haut. Cependant le traitement de séparation de l'eau boueuse est imposé par l'interdiction de la déverser dans les eaux du domaine public, aussi bien que par des raisons d'économie, car la consommation exclusive d'eau neuve augmenterait fortement les frais d'exploitation de l'installation de dépoussiérage.

Construction des installations de dépoussiérage des aciéries à oxygène soufflé par le haut

La construction de deux installations de dépoussiérage qui utilisent la plus grande partie des éléments individuels décrits plus haut, est représentée par les *figures 90 et 91*. Dans la *figure 90*, les fumées sont aspirées par une hotte ouverte avec une entrée d'air minimum ($n = 0,35$), brûlées partiellement dans la chaudière à rayonnement, verticale et horizontale, et refroidies à 700 °C. Le laveur vertical (laveur refroidisseur) annexé sépare une partie de la poussière des fumées et les refroidit à 60 °C. La poussière restante est retenue par l'eau dans le dépoussiéreur fin Venturi. Le séparateur qui suit (cyclone) sépare cette eau des fumées. Les fumées dépoussiérées sont évacuées dans l'atmosphère par une cheminée d'aspiration. On voit également *figure 90* les circuits de la poussière et du liquide de lavage (cf. traitement des boues).

La *figure 91* représente une installation de dépoussiérage humide dont les frais d'investissement et d'exploitation sont également minimales. La hotte d'aspiration est établie suivant le procédé OG ou le procédé du volume minimal de fumées avec un excès d'air $n = 0$. Seules les fumées émises

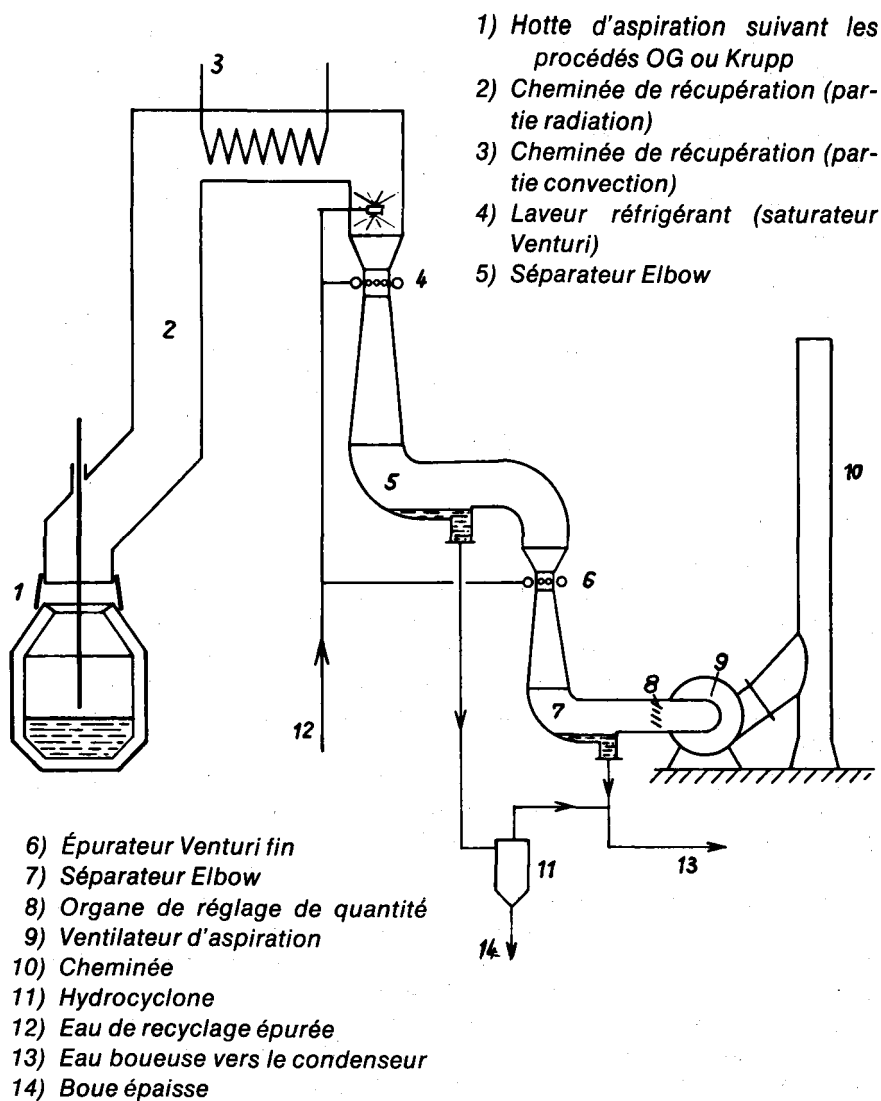


Figure 91 : Installation de dépoussiérage d'un convertisseur à oxygène soufflé par le haut selon les procédés Krupp, à volume minimal de fumées, ou OG

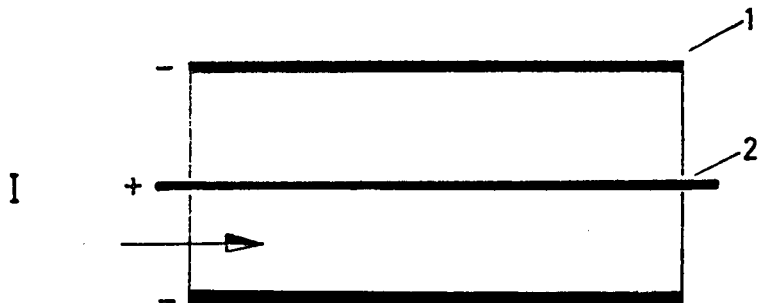
dans ces procédés par le convertisseur sont aspirées. Elles sont refroidies à 300 °C dans les éléments à rayonnement et à convection d'une chaudière de récupération, puis pénètrent dans le saturateur Venturi peu volumineux où leur température est abaissée à 40 °C.

Les fumées sont finement dépoussiérées dans l'épurateur Pease-Anthony-Venturi à cône réglable (voir *figure 89 h*). Après le saturateur Venturi et l'épurateur PA Venturi est intercalé un séparateur Elbow (voir *figure 88*) comme séparateur d'eau. Les fumées dépoussiérées sont dissipées dans l'atmosphère par un ventilateur d'aspiration et une cheminée d'évacuation. La quantité de fumées qui doit traverser le dépoussiéreur PA Venturi ne représente que 50 % de celle qui doit être dépoussiérée dans l'installation représentée *figure 90*. La consommation d'énergie du ventilateur d'aspiration, le volume de liquide de lavage nécessaire, ainsi que l'importance et la consommation d'énergie de l'installation d'eau boueuse sont réduits en proportion.

Electrofiltres

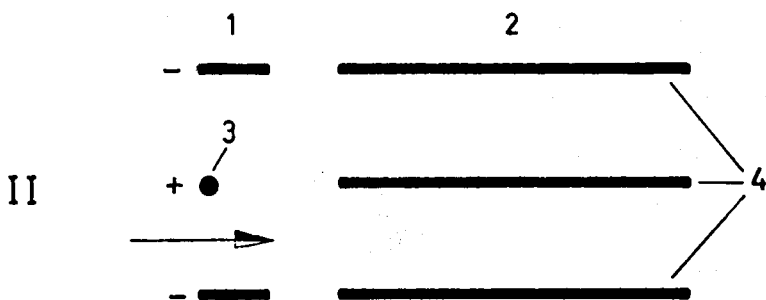
Pour l'exploitation des usines sidérurgiques, notamment pour les aciéries, on peut dire qu'on ne peut pas installer d'électrofiltre sans installation préparatoire, en raison de la haute température des gaz dégagés et de leur haute teneur en grosses poussières. Cette installation préparatoire doit avoir une action refroidissante aussi bien que séparatrice. Il faut, en outre veiller à ce qu'il ne pénètre pas de mélange de gaz inflammables dans l'électrofiltre.

L'électrofiltre met en application le phénomène d'attraction des corps chargés d'électricité de signe contraire. Son fonctionnement repose sur le principe suivant lequel les particules de poussière en suspension dans le courant gazeux qui traverse l'électrofiltre sont d'abord chargées d'électricité statique, ce qui permet ensuite de les déposer sur des surfaces chargées d'électricité de signe contraire. Pour y parvenir, les électrofiltres fonctionnent sur courant continu. Un électrofiltre peut être représenté schématiquement par un tube dans l'axe central duquel est tendu un fil fin auquel, par exemple, on connecte le pôle positif d'une source de haute tension, tandis que le tube est relié avec le pôle négatif de cette source (*figure 92*). Dans les électrofiltres on appelle, en général, le fil électrode émissive, tandis qu'on appelle le tube électrode de dépôt. Si donc un courant gazeux chargé de poussière passe dans cet électrofiltre tubulaire, les particules de poussière seront d'abord chargées par l'électrode émissive. Elles seront ensuite attirées par l'électrode de dépôt chargée en sens contraire et, par conséquent, déposées sur la paroi du tube. Elles en sont séparées par vibration ou par rinçage avec un liquide.



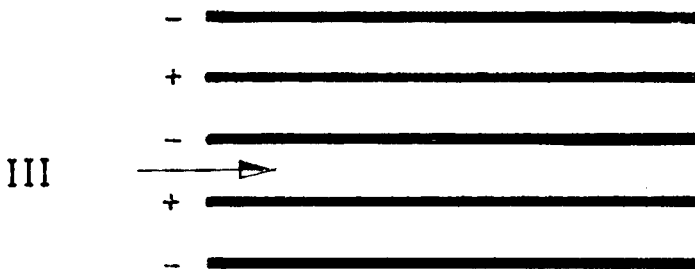
I. Électrofiltre tubulaire

- 1) Électrode de séparation
- 2) Électrode émettrice



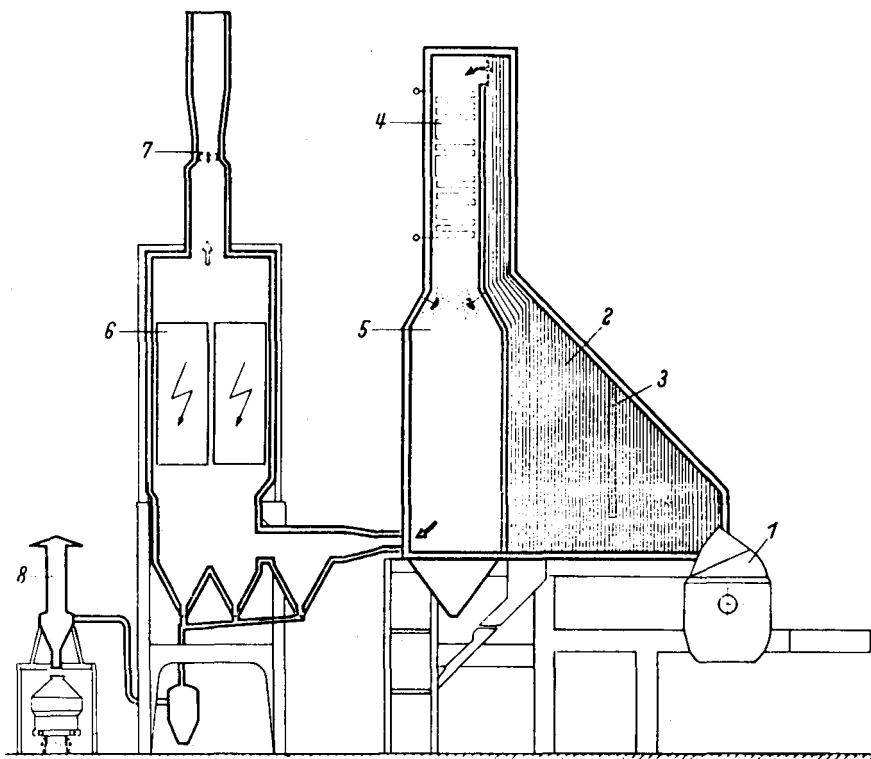
II. Électrofiltre à ligne émettrice

- 1) Ligne émettrice
- 2) Partie séparatrice
- 3) Électrode émettrice
- 4) Électrodes séparatrices sous forme de plaques



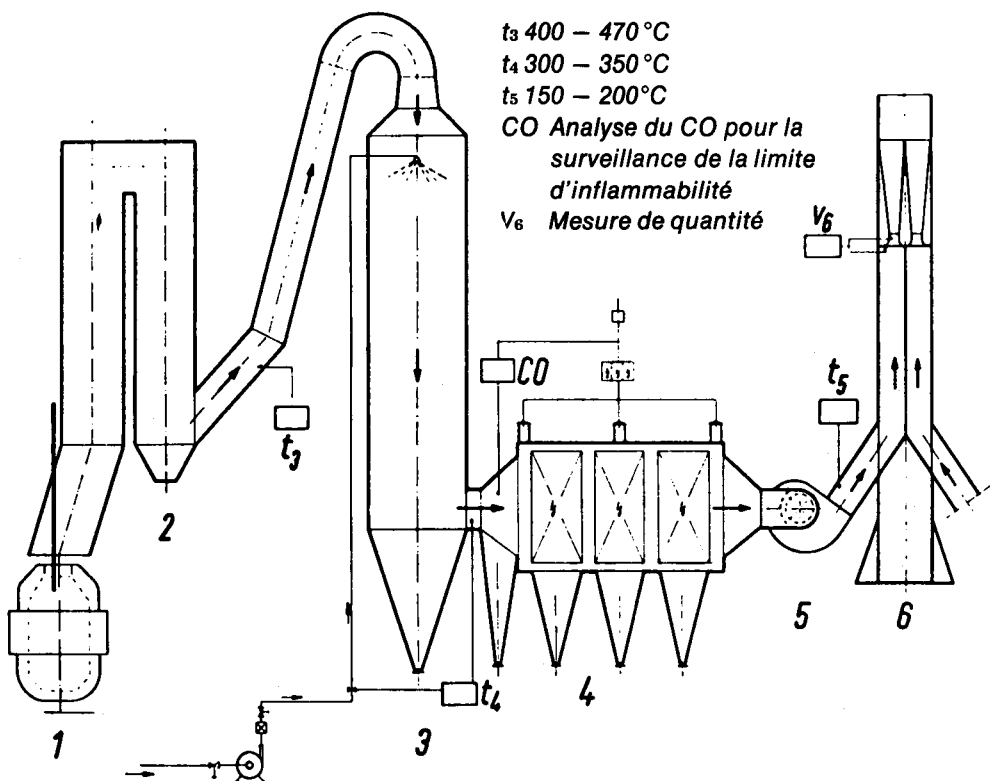
III. Électrofiltre sans ligne émettrice

Figure 92 : Croquis des principes de différents types d'électrofiltres



- 1) *Convertisseur*
- 2) *Partie à rayonnement de la chaudière*
- 3) *Tablier à scories*
- 4) *Partie à convection de la chaudière*
- 5) *Laveur réfrigérant*
- 6) *Électrofiltre*
- 7) *Ventilateur*
- 8) *Enlèvement pneumatique de la poussière*

Figure 93 : Installation de dépoussiérage en aval d'un convertisseur de 40 t soufflé par le fond, avec électrofiltre sec, à Huckingen



- 1) Convertisseur
- 2) Chaudière de récupération avec zones de radiation et de convection
- 3) Laveur réfrigérant
- 4) Électrofiltre
- 5) Ventilateur
- 6) Cheminée de gaz d'échappement

Figure 94 : Procédé de dépoussiérage au convertisseur LD avec chaudière de récupération intégrale et électrofiltre sec, à Rheinhausen, pour une capacité de 90 t

L'électrofiltre sec a été jusqu'à présent employé dans presque tous les domaines de la technique du dépoussiérage, même comme épurateur le plus fin, dans la totalité des exploitations sidérurgiques. A la lumière des expériences faites dans des installations éprouvées en pratique industrielle, on peut tirer la conclusion qu'une installation d'électrofiltre donne toujours une épuration satisfaisante des gaz à traiter, quand l'électrofiltre a été très soigneusement adapté au procédé métallurgique à l'aide d'installations préparatrices.

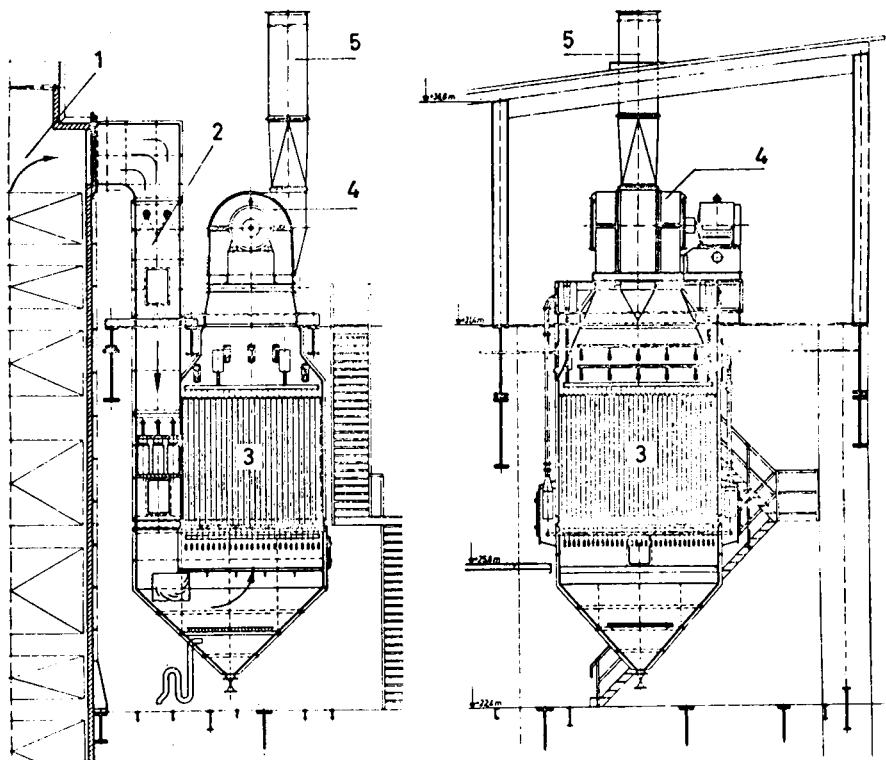
Comme on l'a déjà dit, les installations préparatrices de refroidissement du gaz et d'épuration primaire doivent bien fonctionner. Pour le refroidissement des fumées, on emploie presque toujours des chaudières de récupération à sections de rayonnement et de convection. De là, les fumées se rendent dans un laveur refroidisseur où, par injection d'eau, on abaisse encore leur température en les refroidissant par évaporation jusqu'à 300-400 °C. La quantité d'eau injectée doit être mesurée de telle façon qu'en aucun cas il ne se produise un abaissement du point de rosée, c'est-à-dire qu'il ne doit pas se condenser d'eau sous forme de gouttelettes ou de brouillard. Les éléments de chaudière aussi bien que les laveurs refroidisseurs servent de séparateurs primaires. Les fumées chargées seulement de poussière fine et extra-fine pénètrent sèches dans l'électrofiltre qui, la plupart du temps, consiste en une courte section émissive et une longue section de dépôt. La section émissive doit être conçue de manière que même les particules de poussière ultra-fines reçoivent une charge des électrodes émissives. La section de séparation consiste en plaques parallèles, polarisées électriquement en sens contraire, entre lesquelles les particules chargées électriquement s'écoulent avec le courant gazeux. A la condition d'une durée suffisante de parcours entre les plaques parallèles, on atteint un haut degré d'épuration. Les tensions de travail se situent dans la ligne émissive entre 10 000 et 15 000 V et 4 000 et 6 000 V dans la section de dépôt.

La *figure 93* représente une installation de dépoussiérage avec chaudière, laveur refroidisseur et électrofiltre pour un convertisseur soufflé par le fond, et la *figure 94* une installation semblable pour un convertisseur LD. Pour les deux installations, la poussière retombe sèche et peut être immédiatement recyclée dans le convertisseur. Ceci se fait, le plus souvent, avant de charger l'acier liquide.

Électrofiltres humides

De même que les électrofiltres secs, les appareils humides ont été installés ou essayés jusqu'à présent dans toutes les aciéries. L'installation d'élec-

trofiltres humides doit également être adaptée au procédé métallurgique par des installations préparatrices. Du fait que la température du gaz est abaissée à 40-80 °C, le volume du gaz est réduit en proportion, et les dimensions de l'électrofiltre humide sont inférieures à celles de l'électrofiltre sec. La différence par rapport au procédé à l'électrofiltre à sec consiste en ce que les gaz pénètrent humides dans l'appareil. En outre, la plupart du temps,



- 1) Chaudière de récupération
- 2) Laveur réfrigérant
- 3) Électrofiltre humide
- 4) Ventilateur
- 5) Cheminée à gaz d'échappement

Figure 95 : Installation de dépoussiérage combinée pour l'élimination des fumées rouges à l'aciérie de Linz-Donau (Laveur réfrigérant Voest et électrofiltre humide Waagner-Biro)

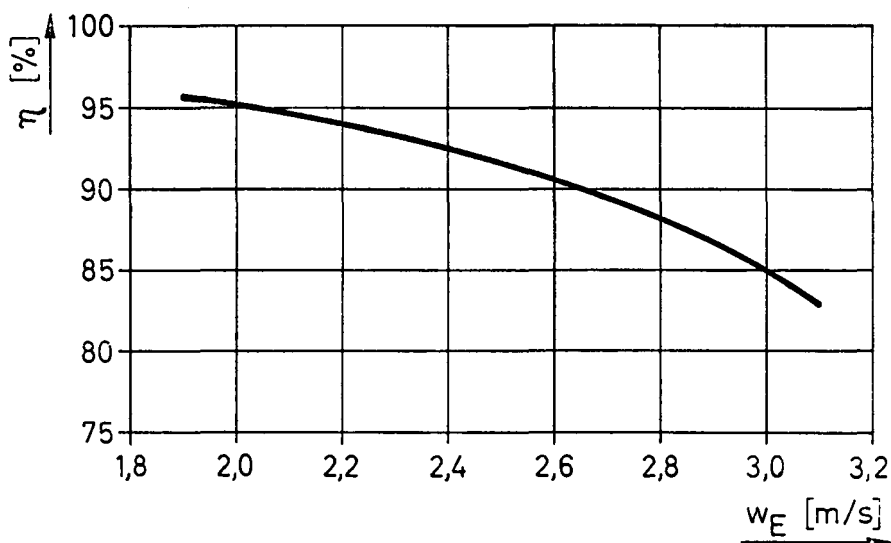


Figure 96 : Rendement du dépolluage des électrofiltres, en fonction de la vitesse de pénétration du gaz
 n = degré d'efficacité du dépolluage
 w_E = vitesse de pénétration du gaz

l'électrofiltre humide n'a pas de section émissive séparée. Grâce à un intense arrosage supplémentaire d'eau des fumées chargées de poussière, immédiatement avant l'entrée de l'électrofiltre, la séparation des particules ultra-fines est facilitée. Avec l'électrofiltre humide la poussière déposée est rincée et, de ce fait, forme de la boue qui doit faire l'objet d'un traitement dans une installation appropriée. La *figure 95* montre une installation établie avec électrofiltre humide.

Les électrofiltres, en règle générale, assurent une bonne efficacité d'épuration. Indépendamment des conditions du procédé et comparativement à beaucoup d'autres procédés de dépolluage, le degré d'efficacité des électrofiltres dépend cependant fortement de la quantité de fumées traitées. Quand la vitesse du gaz à travers le filtre est augmentée et, par là, abrégée la durée du séjour des particules de poussière dans le champ électrique, le rendement de l'épuration se détériore (*figure 96*).

4.5. LE TRAITEMENT SOUS VIDE DE L'ACIER LIQUIDE

Les différentes méthodes de production de l'acier ont entre elles ceci de commun : elles font varier, par des réactions métallurgiques délibérément dirigées, les teneurs en éléments d'accompagnement du fer tels que le carbone, le soufre, le phosphore, le manganèse, etc. Pour gouverner ces réactions, on ajoute au bain d'acier différentes matières d'addition et on veille au bon accomplissement de la réaction par une conduite idoine de la température.

Dès le début du siècle, on a reconnu que, non seulement la température du bain, mais aussi la pression qui s'exerce sur lui jouent un rôle essentiel pour de nombreuses réactions. La solubilité de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote dans le bain d'acier dépend de la pression et on réussit à éliminer une partie importante de ces gaz de l'acier liquide en réduisant la pression qui s'exerce sur le bain.

4.5.1. Schéma du processus du dégazage

La vie nous offre un exemple quotidien de ce processus. Dans l'eau, le gaz carbonique peut se dissoudre en très grande quantité. En effet, la solubilité de ce gaz augmente avec la pression. C'est pourquoi dans un siphon d'eau de Seltz, la surpression dissout une quantité de gaz relativement forte. Quand on ouvre le siphon, la pression s'y réduit à celle de l'air ambiant. Le gaz dissous en excès est alors soudainement libéré. Il se forme un grand nombre de bulles gazeuses qui grossissent rapidement, s'échappent et bouillonnent.

Si la teneur en gaz carbonique est minime, la réaction n'est pas aussi violente. Dans beaucoup de cas, il peut même ne pas se former de bulles de gaz. Le dégagement du gaz carbonique n'est alors plus perceptible à l'œil nu parce que l'eau, surtout à sa surface, reste parfaitement calme. Cependant il se dégage du gaz de l'eau, quoique beaucoup plus lentement que dans le premier cas. On peut par là juger facilement quand on doit refermer un siphon d'eau de Seltz maintes fois ouvert. Au bout de quelque temps, il se reforme une légère surpression dans le siphon. Comme on l'a constaté au cours de recherches approfondies, lors de ce phénomène, le gaz carbonique excédentaire dissous remonte en cet état à la surface de l'eau et en sort à l'état gazeux.

Les gaz dissous dans l'acier s'y comportent de la même façon que, dans notre exemple, le gaz carbonique dissous dans l'eau, si l'on réduit la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur le bain. En conséquence, pour les éliminer, on place le bain en vase clos et on aspire au moyen de pompes

l'air ou les autres gaz qui s'y trouvent dissous. Il y a plus de cinquante ans déjà que des essais dans ce sens ont été faits en laboratoire. Seule la mise au point, au cours de ces dix dernières années, d'installations de pompes de meilleur rendement et de fonctionnement plus régulier a permis de transposer ces essais sur le plan pratique et de mettre au point la technique industrielle du procédé du traitement sous vide de l'acier.

4.5.2. Vide et pression des gaz

Avant de décrire les différentes méthodes, il convient d'expliciter brièvement la notion de «vide» et d'exposer comment on produit et on mesure le vide. On dénomme ainsi un espace vide de gaz, de liquides et de corps solides. Bien entendu, on n'arrive pas à créer un espace intégralement vide dans une enceinte close, fût-ce avec les meilleures pompes, car il y subsiste toujours un résidu gazeux. Ce résidu est déterminé par sa pression et la pression gazeuse régnant dans l'enceinte considérée donne la mesure directe du vide obtenu.

L'air dans lequel nous vivons exerce également sur tous les objets de son milieu une pression qu'on appelle pression atmosphérique. Normalement, on ne mesure que les pressions différentielles par rapport à cette pression de l'air. Si, par exemple, l'air est comprimé à 5 at., cela signifie que la pression gazeuse de l'air comprimé est de 5 at. plus élevée que la pression de l'air normale.

L'effet de la pression de l'air peut se démontrer et se mesurer par un simple essai. Pour cela, on emplit complètement de mercure un tube d'environ 1 m de long fermé à une extrémité; on obture l'extrémité libre avec le pouce et on le dresse verticalement sur son extrémité ouverte, dans une cuve remplie de mercure (*figure 97*). On constate alors, en retirant le pouce lorsque l'extrémité libre est bien immergée dans le mercure, que le tube ne reste pas complètement plein. Le mercure descend jusqu'à ce que son niveau se trouve à 760 mm au-dessus de la surface du mercure de la cuve. De ce fait, il se crée un espace sans air (*vide*).

Même si on incline un peu le tube, la surface du mercure qui y est contenu reste à la même hauteur de 760 mm, au-dessus de celle de la cuve.

La pression de l'air extérieur qui pèse à la surface du mercure de la cuvette pousse, en effet, le mercure du tube à la hauteur de 760 mm. On obtient ainsi la mesure de la pression de l'air. Cette pression est donc, dans les conditions normales, égale à la pression d'une colonne de mercure de 760 mm de hauteur (en abrégé 760 mm Hg ou 760 Torr). Si l'on calcule le poids de la colonne de mercure, on obtient une pression de 1,033 kg/cm².

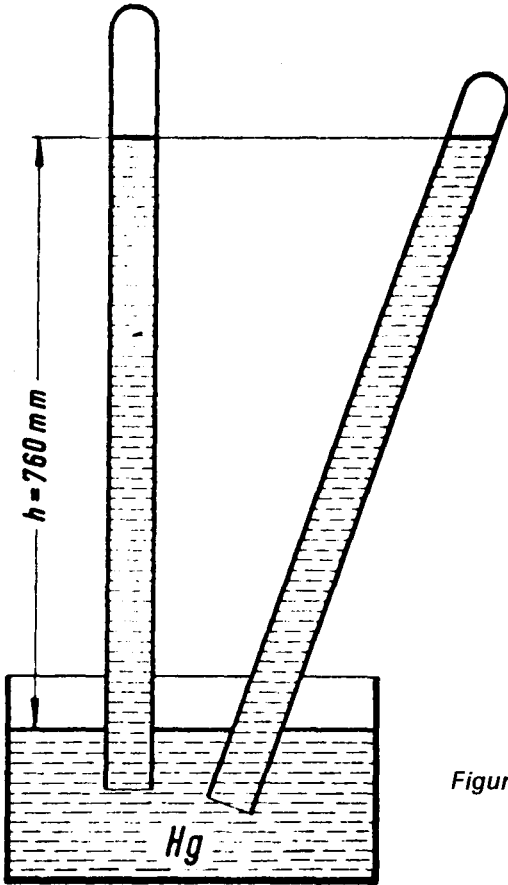


Figure 97 : Effet de la pression de l'air sur une colonne de mercure
Hg = mercure

L'air comprimé de l'exemple ci-dessus à une surpression de 5 at. est donc à une pression gazeuse de $5,0 \text{ kg/cm}^2 + 1,033 \text{ kg/cm}^2 = 6,033 \text{ kg/cm}^2$ ou 6,033 at (1 at. = 1 kg/cm^2 de pression absolue = 1 atmosphère absolue = 735 mm Hg).

Au lieu de mercure on aurait pu tout aussi bien employer un liquide quelconque pour l'essai. Suivant son poids spécifique, le liquide monte plus ou moins haut dans le tube jusqu'à ce que la colonne de liquide exerce de nouveau la pression de $1,033 \text{ kg/cm}^2$ à la surface du bain. Si l'on employait de l'eau, dont le poids spécifique est de 1 gp/cm^3 , on aurait une colonne de liquide de 10,33 m. Par contre, l'acier liquide, dont le poids spécifique est de $7,5 \text{ gp/cm}^3$ environ, monterait à peu près à 1,37 m de hauteur.

Si, dans l'essai précité, on employait un tube ouvert par en haut, le niveau du mercure dans le tube et dans le bassin resterait le même, bien entendu, parce que la pression de l'air atmosphérique s'exercerait aussi dans le tube. Si l'on relie maintenant l'extrémité supérieure du tube à une pompe à vide (*figure 98 a*), le mercure montera dans le tube de plus en plus haut, la pression de l'air diminuant à l'intérieur du tube. Avec ce dispositif, on peut tout de suite mesurer le vide à tout moment. Si, par exemple, la colonne de mercure est montée à 400 mm de hauteur et si la pression de l'air extérieur atteint 760 mm Hg, la pression de l'air dans la partie supérieure du tube et, par conséquent, le vide momentané est de $760 - 400 = 360$ mm Hg.

En employant un tube courbé en forme d'U, on peut éviter les cuves à mercure, le plus souvent incommodes dans l'exploitation (*figure 98 b*). La différence de niveau du mercure dans les deux branches indique alors la dépression relativement à la pression de l'air, c'est-à-dire la valeur du vide.

Le manomètre en U tubulaire clos représenté par la *figure 98 c*, dont la branche gauche est vide, indique, par contre, par la différence des niveaux de mercure, la pression gazeuse absolue ou pression sous vide. Indépendamment des manomètres à mercure, on utilise toute une série de manomètres à boîtier (cf volume 1, chapitre 2.1.2.) soit, suivant leur construction, comme indicateurs de pression différentielle, soit comme indicateurs de pression absolue proprement dite. Nous renoncerons, pour rester dans le cadre de ce bref exposé, à la description des nombreux appareils indicateurs de vide qu'on emploie spécialement à la mesure du vide au-dessous de 1 mm Hg.

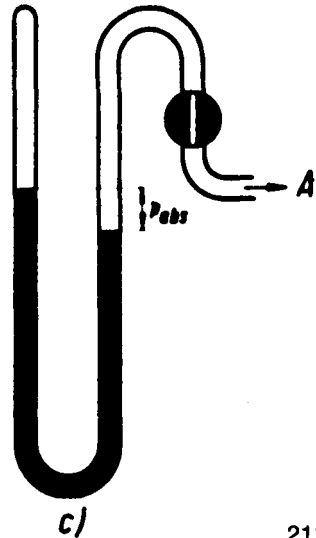
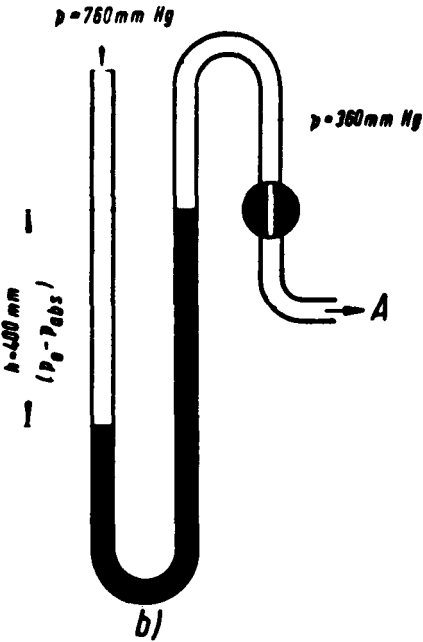
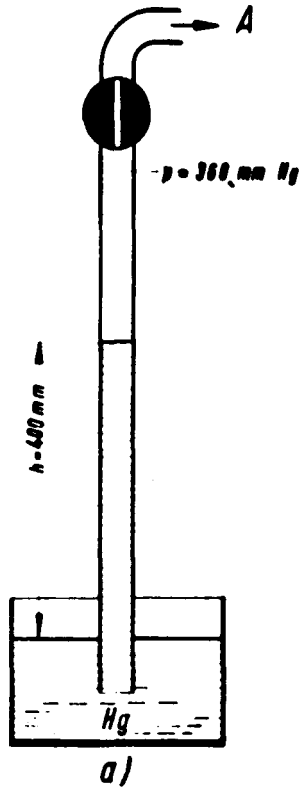
Pour produire le vide, on emploie différentes sortes de pompes. Presque toujours, plusieurs types de pompes sont installés dans les jeux de pompes étagées car, la plupart du temps, on n'arrive pas à atteindre le degré de vide voulu ou le débit d'aspiration nécessaire avec une pompe unique. De là naît un grand nombre de possibilités diverses de produire le vide nécessaire. Les différentes pompes peuvent être classées en deux grandes catégories : les pompes mécaniques et les pompes à injection.

Le principe d'aspiration de la pompe mécanique est expliqué par le schéma d'une pompe à tiroir rotatif (*figure 99*). Dans un logement cylindrique tourne un tambour excentré pourvu de deux palettes-registres. On crée ainsi trois chambres A, B, C. Lors de la révolution, seule la chambre A s'agrandit. Il est donc aspiré du gaz par la tubulure qui s'y trouve. Par contre, la quantité de gaz de la chambre B est comprimée parce que cette chambre diminue de volume lors de la révolution du tambour. Quand la palette-registre a glissé

Figure 98 : Principe des appareils de mesure du vide

- a) manomètre tubulaire type baromètre,
- b) manomètre tubulaire en U,
- c) manomètre tubulaire en U clos.

Hg = mercure, A = raccordement de la pompe ou de l'enceinte à vide



sur l'orifice d'évacuation, le gaz comprimé est expulsé dans l'atmosphère (chambre C). Ces trois processus – aspiration, compression, expulsion – se retrouvent, plus ou moins indépendants les uns des autres, dans toutes les pompes mécaniques.

La *figure 100* représente le schéma d'une pompe rotative. Elle est construite pour de plus forts volumes d'aspiration que la pompe à tiroir rotatif. Pour les grands volumes aspirés, dans le domaine de 1 Torr et au-dessous, on

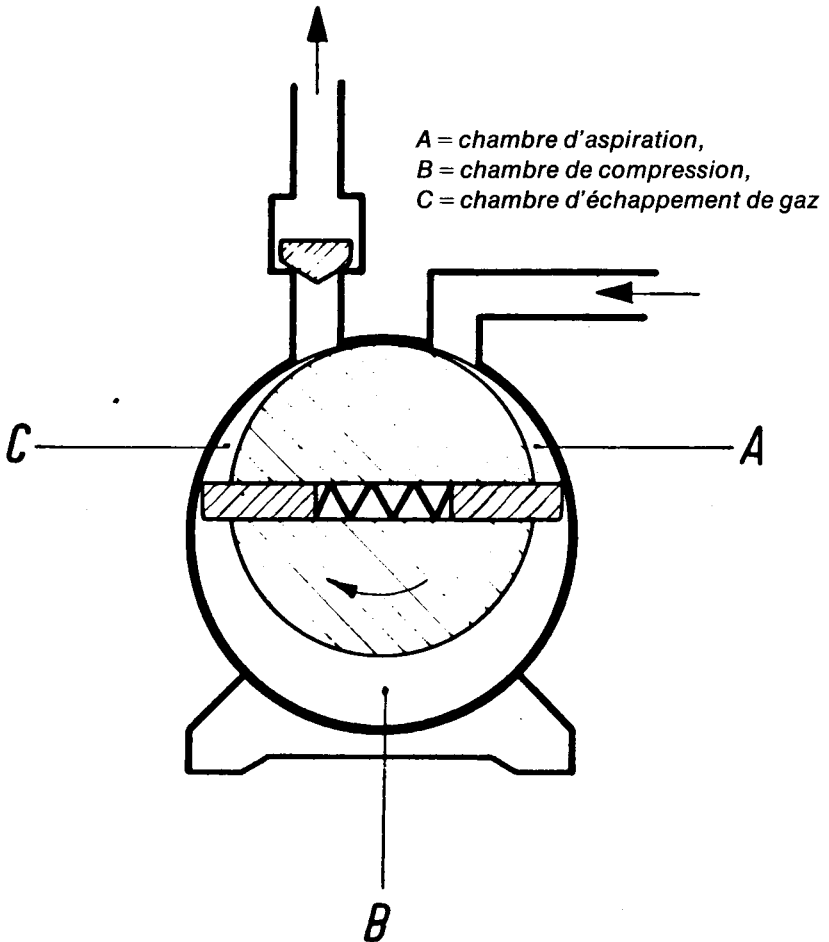


Figure 99 : Schéma de la pompe à tiroir rotatif

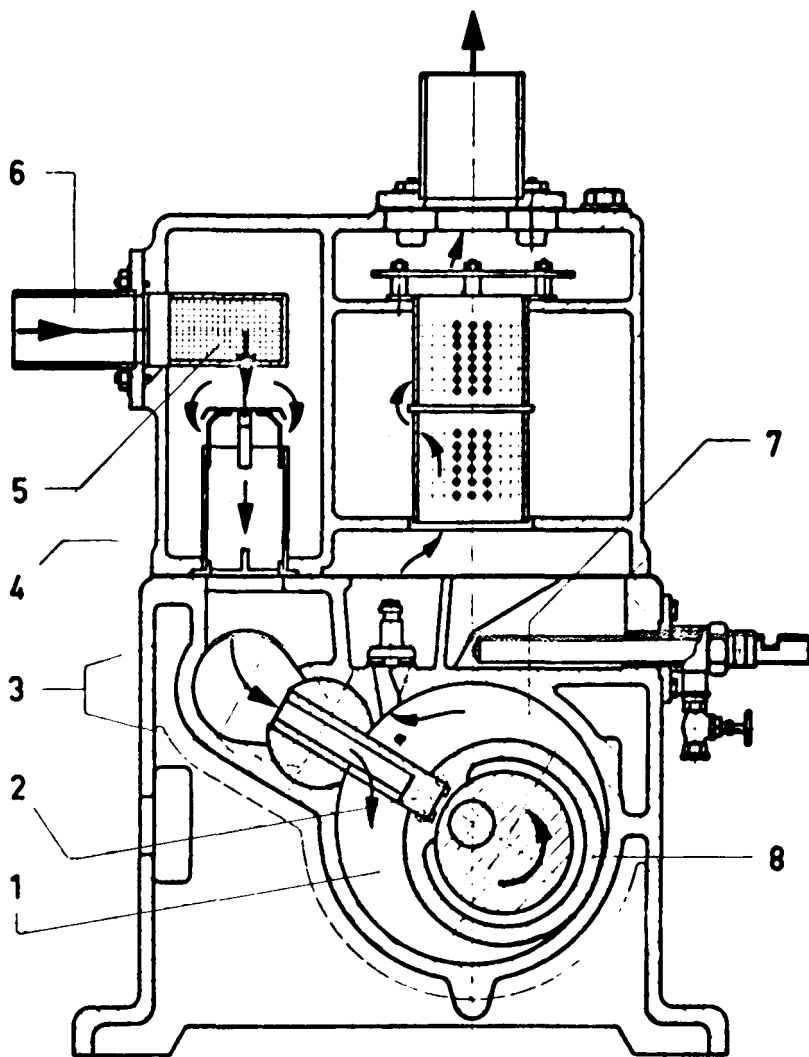


Figure 100 : Schéma de la pompe rotative

1 = chambre d'aspiration – 2 = tiroir plan – 3 = lamelles –
 4 = collecteur de crasses – 6 = tubulure d'aspiration – 7 =
 chambre de compression – 8 = piston rotatif.

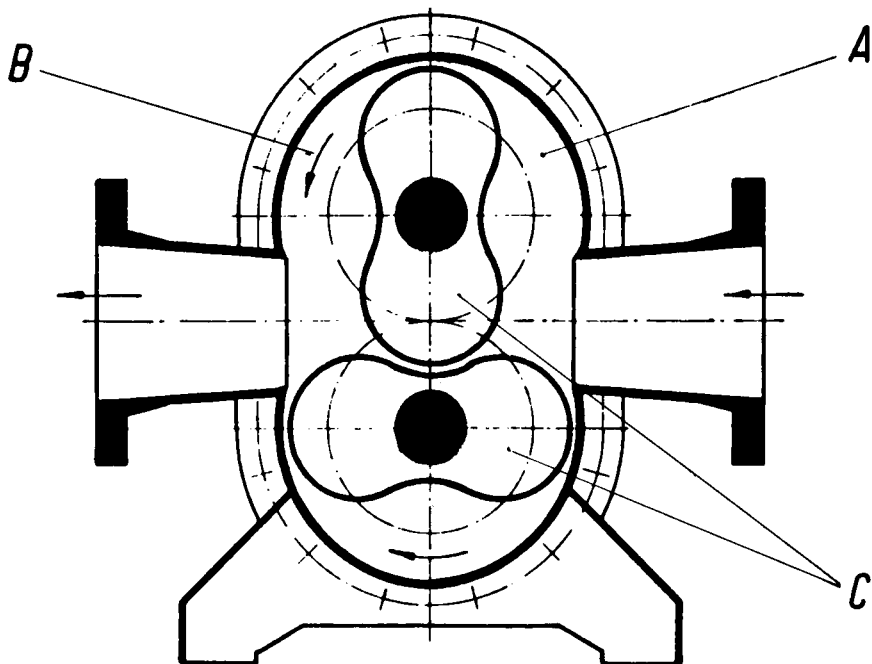


Figure 101 : Schéma d'une pompe de Roots

A = chambre d'aspiration – B = chambre de compression –
C = cylindres rotatifs

emploie depuis peu ce qu'on appelle les pompes de Roots (figures 101 et 102). Ces pompes ne sont, bien entendu, construites que pour une compression jusqu'à environ 150 mm Hg. C'est pourquoi elles nécessitent toujours une pompe dite «amont».

La pompe à chemise d'eau (figure 103), fonctionne comme la pompe à tiroir rotatif. Celui-ci est purement et simplement remplacé par une roue à aubes et l'étanchéité avec le corps est réalisée par une chemise d'eau qui est comprimée contre ce corps par la force centrifuge lors de la rotation de la roue à aubes.

Le domaine de travail des différents types de pompes est indiqué à la figure 104. La figure 105 représente le schéma d'un jeu de pompes consistant en deux pompes Roots et une pompe à chemise d'eau. La figure 106 donne la reproduction photographique de ce jeu de pompes.

Les pompes mécaniques présentent l'inconvénient d'être très sensibles aux gaz contenant des poussières. Il convient donc d'épurer les gaz au moyen de filtres avant aspiration. En outre, ces pompes doivent être entretenues avec beaucoup de soin.

Par contre, les pompes à éjecteur sont passablement insensibles aux gaz contenant des poussières. De plus, comme elles ne comportent pas d'éléments mobiles, leur entretien est minime. La *figure 107* indique le principe de la pompe à éjecteur. Elle consiste essentiellement en un gicleur A, une chambre de mélange B et une tubulure collectrice avec diffuseur C, dénommée aussi tubulure d'accumulation (tube Venturi). Comme agent moteur, on peut employer un liquide, un gaz ou la vapeur. Les pompes à éjecteur qui desservent les installations productrices de vide aux aciéries, utilisent généralement la vapeur d'eau sous pression de 6 à 30 at. Dans la chambre de mélange, la vapeur se mêle au gaz à aspirer. Le mélange gaz-vapeur pénètre ensuite à grande vitesse dans la tubulure d'accumulation, puis est freiné dans la partie qui s'élargit et, de ce fait, condensé.

On emploie, la plupart du temps, 3 à 6 pompes à éjecteur en série qui évacuent de proche en proche le gaz dans l'atmosphère.

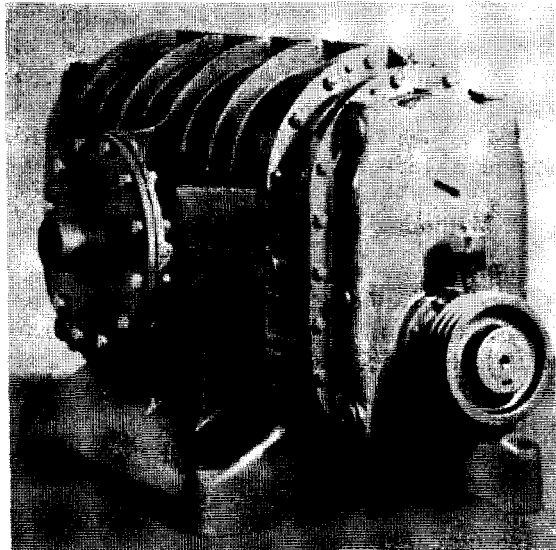


Figure 102 : Vue d'une pompe de Roots

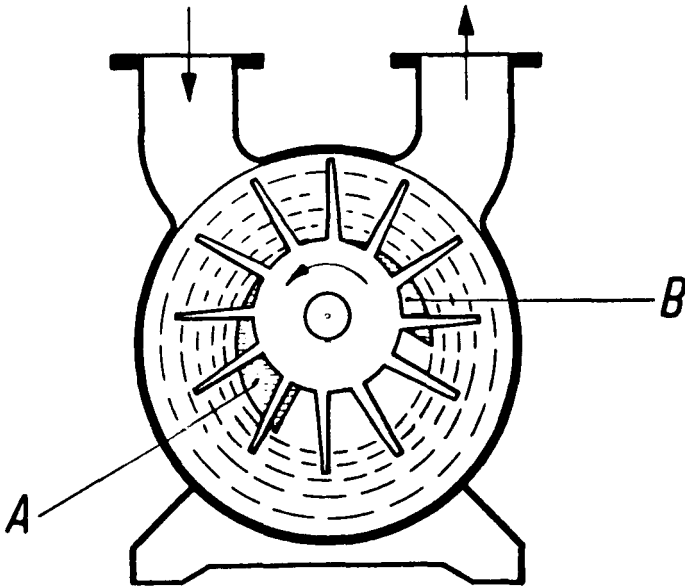


Figure 103 : Schéma d'une pompe à chemise d'eau

A = orifice d'aspiration – B = orifice d'échappement du gaz.

Entre les derniers échelons sont intercalés, le plus souvent, des condenseurs de vapeur, qui condensent la vapeur motrice, de sorte qu'à l'échelon suivant, seul le gaz pur est davantage condensé. La figure 108 donne le schéma d'une installation d'aspiration éjecteur de vapeur à cinq étages, à trois condenseurs intercalés. La figure 109 représente un aspirateur éjecteur de vapeur monté dans une installation à faire le vide.

4.5.3. Méthodes de dégazage par injection

Le premier des procédés employés industriellement est le *dégazage dit « en poche »*. La figure 110 en donne le principe. Une grande cuve en acier est dressée dans la fosse de coulée ou encastrée dans le sol, en un point accessible au point de coulée. Le couvercle étant enlevé, cette cuve peut recevoir la poche de coulée. Entre le couvercle et la cuve est prévue une garniture étanche en caoutchouc ou en matière plastique, de sorte que, le couvercle étant fermé, la cuve peut être mise en dépression par les pompes à vide en passant par les tubulures aménagées latéralement. Sur le couvercle on trouve encore des regards pour observer le bain et des dispositifs pour le transport du couvercle.

L'acier est élaboré comme d'habitude au four ou au convertisseur. Cependant, la température de coulée en poche doit être supérieure de 70 à 150 °C suivant la dimension de la poche, à la température de coulée normale en lingots ou en brames parce que le traitement de l'acier par le vide occasionne des déperditions de chaleur importantes.

En outre, le bain doit être coulé décaissé ou débarrassé de son laitier après la coulée en poche. La poche ne doit pas être complètement remplie d'acier, faute de quoi elle déborderait lors de la réaction de dégazage, en raison du fort bouillonnement qui se produit. Après la coulée, la poche est amenée dans la cuve et dégagée des crochets de levage. Le couvercle est alors mis

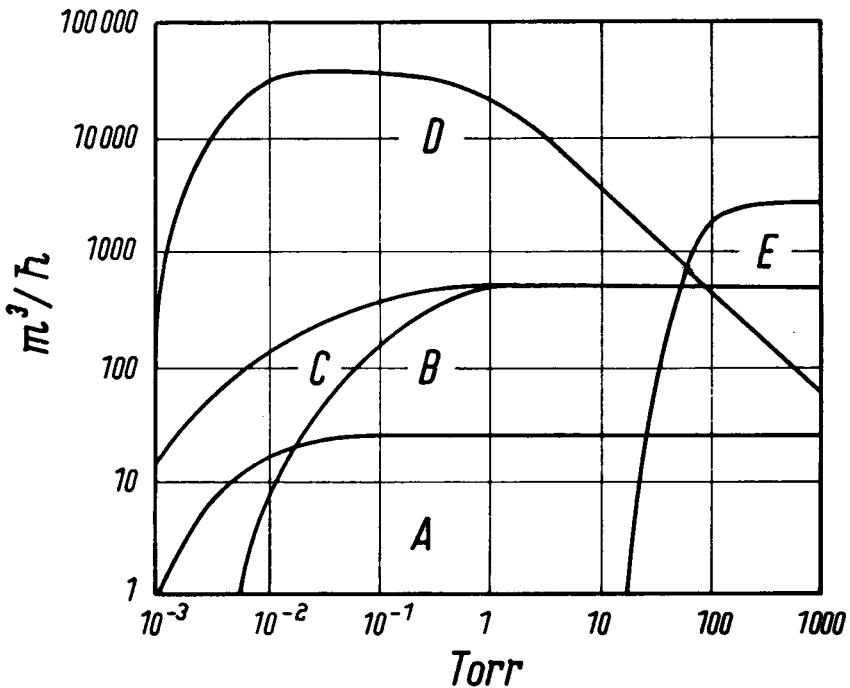


Figure 104 : Domaine opératoire des pompes mécaniques (schématiquement) m^3/h = capacité d'aspiration en m^3/h
 Torr = pression en Torr – A = pompes à tiroir rotatif – B = pompes rotatives à un étage – C = pompes rotatives à deux étages – D = pompes de Roots – E = pompes à chemise d'eau.

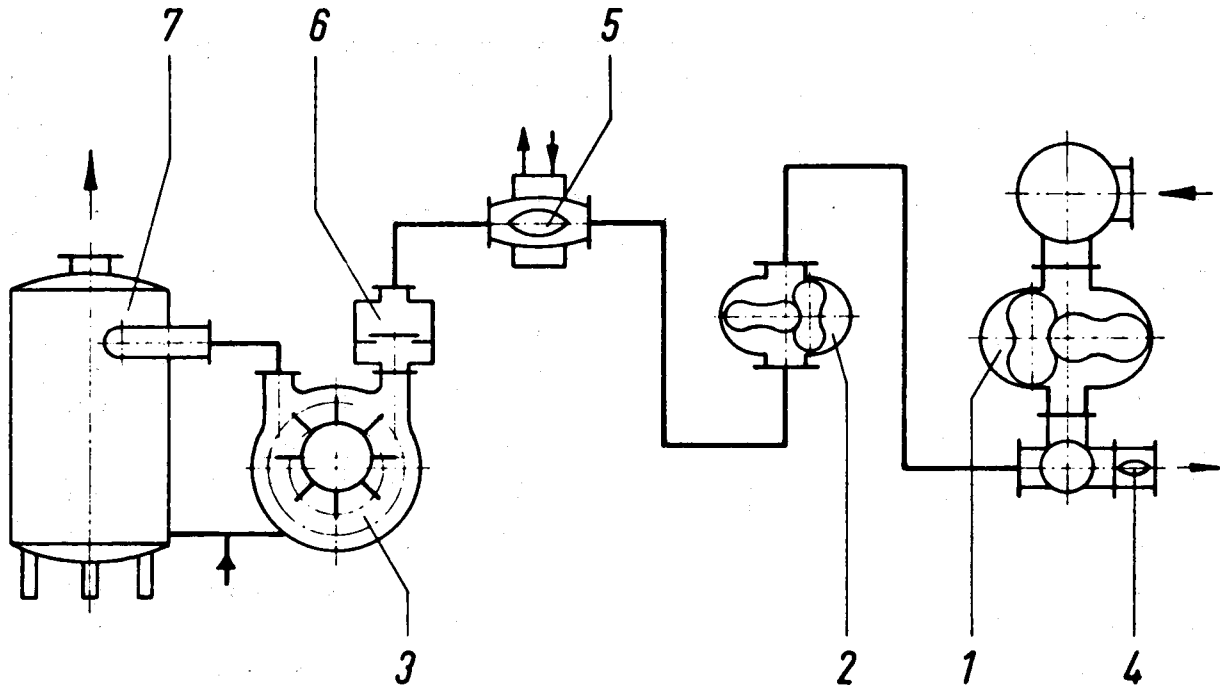


Figure 105 : Schéma d'un jeu de pompes consistant en deux pompes de Roots et une pompe à chemise d'eau

1 + 2 = pompes de Roots – 3 = pompe à chemise d'eau – 4 + 5 = soupape de surpression –
6 = soupape de retour d'eau – 7 = réservoir d'eau d'alimentation pour la pompe à chemise d'eau circulaire.



Figure 106 : Jeu de pompes à vide suivant le schéma de la figure 105

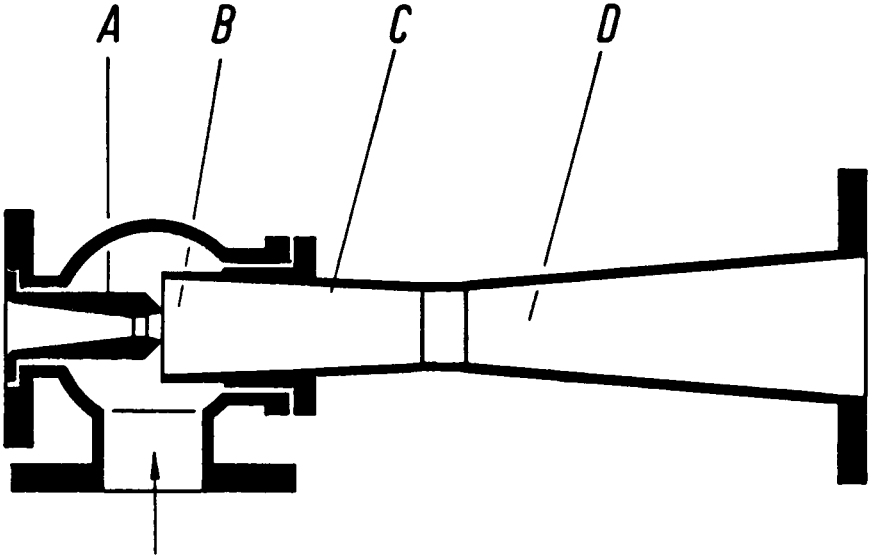


Figure 107 : Schéma d'une pompe à jet de vapeur
 A = gicleur – B = chambre de mélange – C = tubulure collec-
 trice – D = diffuseur.

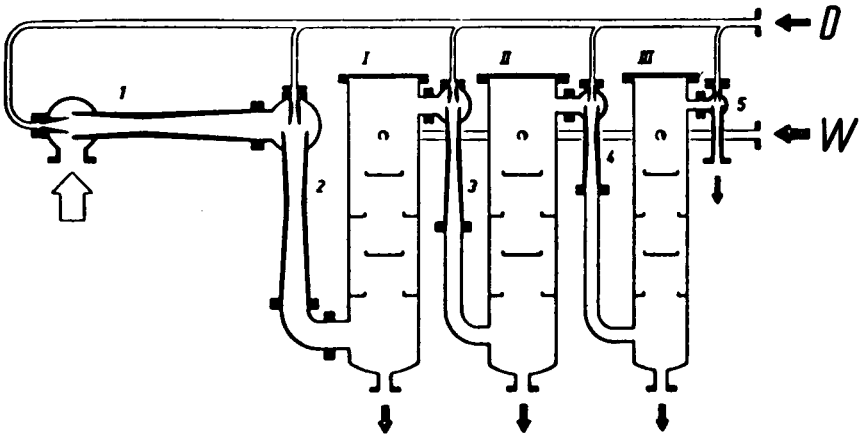


Figure 108 : Schéma d'un jeu de pompes consistant en 5 pompes à éjecteur
 (1, 2, 3, 4, 5) et 3 condensateurs de vapeur (I, II, III).

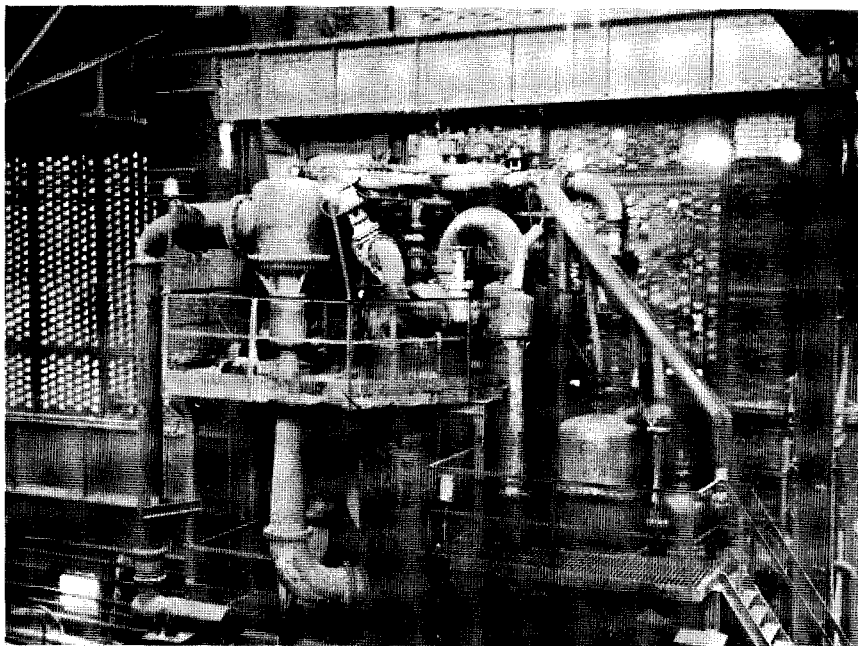


Figure 109 : Pompe à éjecteur de vapeur à 4 étages.

en place à l'aide du pont de coulée ou d'un appareil de levage particulier et les pompes à vide mises en route. La dépression est suivie sur un manomètre et le bain observé par les regards. Le bouillonnement et, en même temps, le dégazage du bain commencent à environ 50 Torr. Il est possible, grâce à une soupape de réglage dans la conduite d'aspiration, de modérer le volume aspiré par les pompes et, par là, la réaction d'ébullition si le bouillonnement est trop violent. Au cours du traitement, le dégagement de gaz décroît de plus en plus et au bout de 15 à 20 minutes, il n'est plus que minime. La pression tombe alors suivant le groupe de pompes employé à 0,5-10 Torr. Les pompes à vide sont alors mises hors circuit et la cuve est ramenée à la pression atmosphérique par introduction d'air ou d'azote. Puis le couvercle de la cuve est de nouveau retiré et la poche transportée à la fosse de coulée. La coulée de l'acier en lingots se fait comme d'habitude.

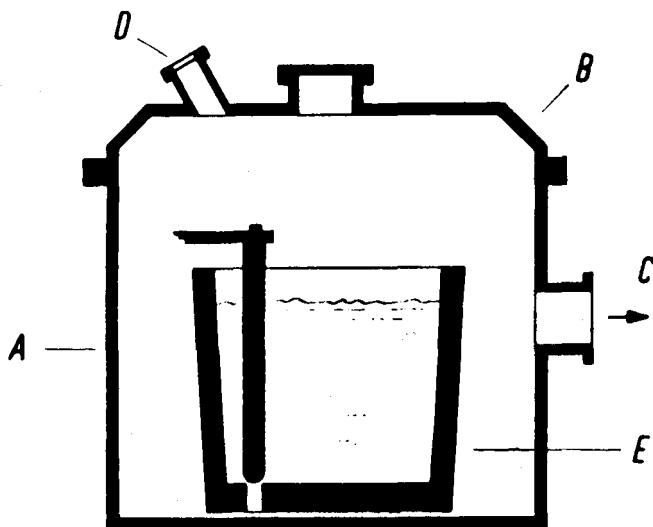


Figure 110 : Principe du dégazage en poche

A = enceinte à vide – B = couvercle amovible – C = conduite à vide – D = regard – E = poche de coulée.

Pour le dégazage en poche on emploie encore deux procédés industriels améliorés, à savoir le dégazage en poche par gaz de rinçage et le dégazage en poche par brassage, par induction du bain. Au dégazage en poche, il s'est en effet révélé que, souvent, seules les couches supérieures de l'acier contenu dans la poche participent à la réaction de dégazage, tandis que l'acier dans la partie inférieure de la poche, en raison de la pression qu'exerce sur lui le poids d'acier de la partie supérieure, n'est que peu dégazé.

Les deux procédés, par rinçage ou par brassage, ont pour but de faire remonter à la surface l'acier qui se trouve au fond afin d'obtenir un effet de dégazage homogène.

Avec le premier procédé, un gaz – de l'argon le plus souvent – est introduit au fond de la poche, soit par une brique poreuse, soit par le tampon d'une seconde quenouille montée dans la poche (figure 111).

Avec le dégazage en poche par brassage par induction, un enroulement électromagnétique de brassage est installé (figure 112) dans le récipient à vide, dans lequel la poche est insérée. Bien entendu, ce procédé requiert l'emploi de poches en acier amagnétique.

Comme les dispositifs supplémentaires cités provoquent un brassage complet du contenu des poches, il est encore possible à la fin du dégazage par le vide d'ajouter à l'acier de l'aluminium ou du silicium en quantités limitées et de les répartir uniformément. Une ou deux petites capacités sont rapportées dans ce but sur le couvercle du récipient à vide; les matières d'addition y sont versées avant le dégazage. En ouvrant un registre ou un clapet au fond de ces capacités, on fait tomber les additions dans la poche où elles se dissolvent ensuite en peu de temps dans le bain.

Le *dégazage au jet* est employé dans plusieurs méthodes industrielles. Tous les procédés ont ceci de commun que le jet de coulée qui s'échappe de la poche pénètre dans une cuve à vide. Le brusque dégagement de gaz qui intervient divise le jet de coulée en fines gouttelettes. Celles-ci contiennent à dégager du gaz par diffusion vers la surface.

Si le jet de coulée provenant de la poche de coulée pénètre dans une lingotière placée en dessous, dans une enceinte où l'on fait le vide, ce procédé

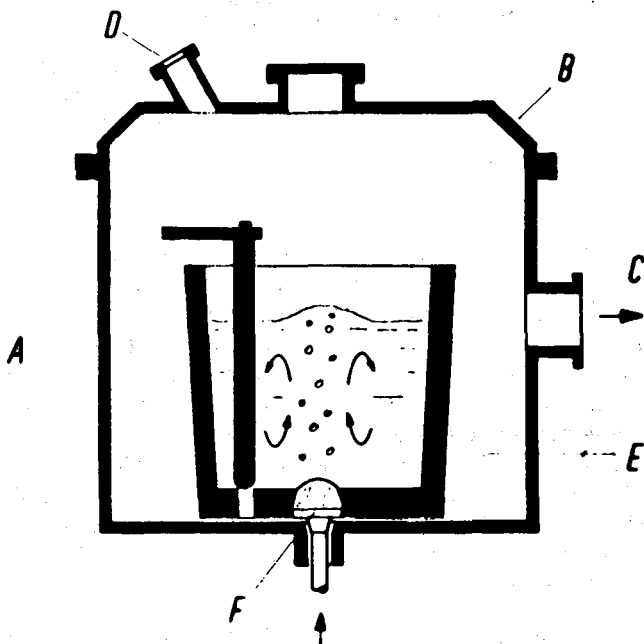


Figure 111 : Principe du dégazage en poche avec gaz de rinçage
A à E, comme figure 14 – F = obturateur pour l'admission du gaz.

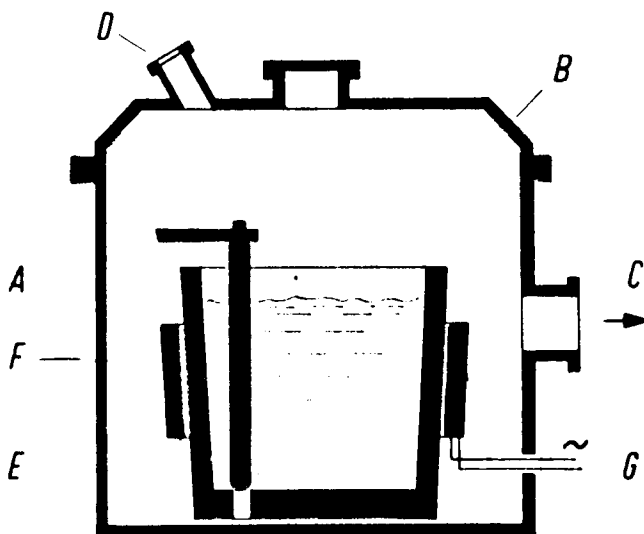


Figure 112 : Principe du dégazage en poche par brassage par induction A à D, comme figure 14 – E = poche de coulée en acier amagnétique – F = action du cuivre de bobinage d'agitation – G = amenée du courant.

de dégazage s'appelle : *coulée en lingotière sous vide*. La figure 113 montre les différents stades de ce procédé. Dans la fosse de coulée se trouve, comme pour le dégazage en poche, une cuve à couvercle amovible qui reçoit la lingotière. Le couvercle est pourvu, indépendamment des regards et dispositifs pour son transport, d'une ouverture par laquelle le jet de coulée pénètre dans la cuve. Cette ouverture, une fois la lingotière introduite dans le récipient et le couvercle mis en place, est fermée par une feuille d'aluminium. Une poche intermédiaire à fond étanche au vide est alors placée sur le couvercle. Elle marque l'ouverture au-dessus de la feuille d'aluminium. Elle est aménagée de telle façon que la busette de coulée se trouve exactement au-dessus de l'ouverture fermée par la feuille. Après ces préparatifs, la cuve est mise sous vide et, éventuellement, son étanchéité vérifiée.

Pour effectuer le dégazage, l'acier élaboré est coulé dans une poche de coulée normale à température surélevée et reçoit les additions habituelles. La poche de coulée est amenée au-dessus de la poche intermédiaire de l'installation de vide. Lorsque celle-ci a été emplie à moitié d'acier, on ouvre la busette de coulée en enlevant la quenouille qui l'obstruait. L'acier qui

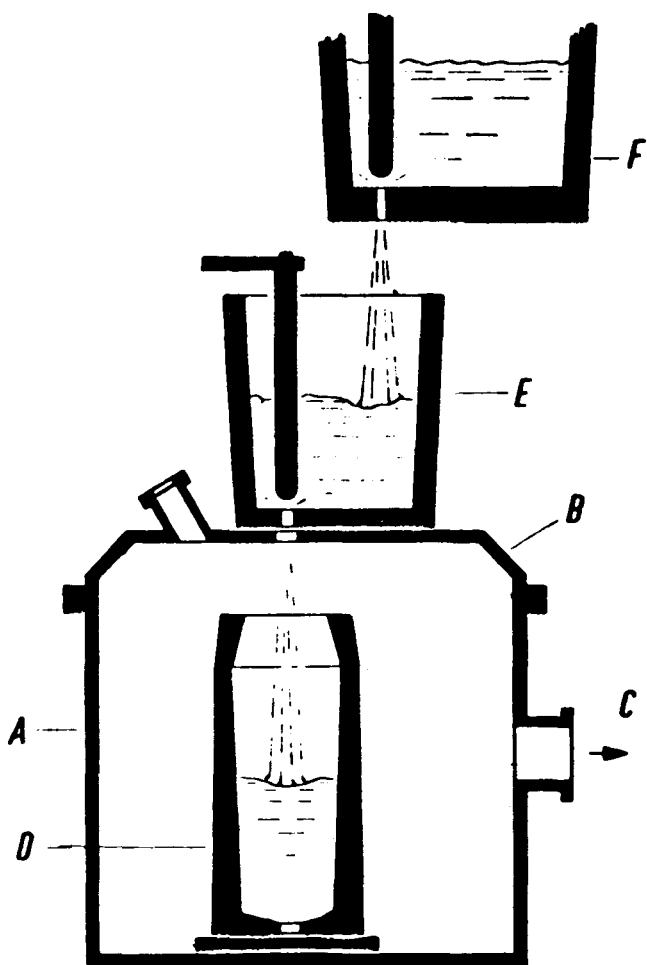
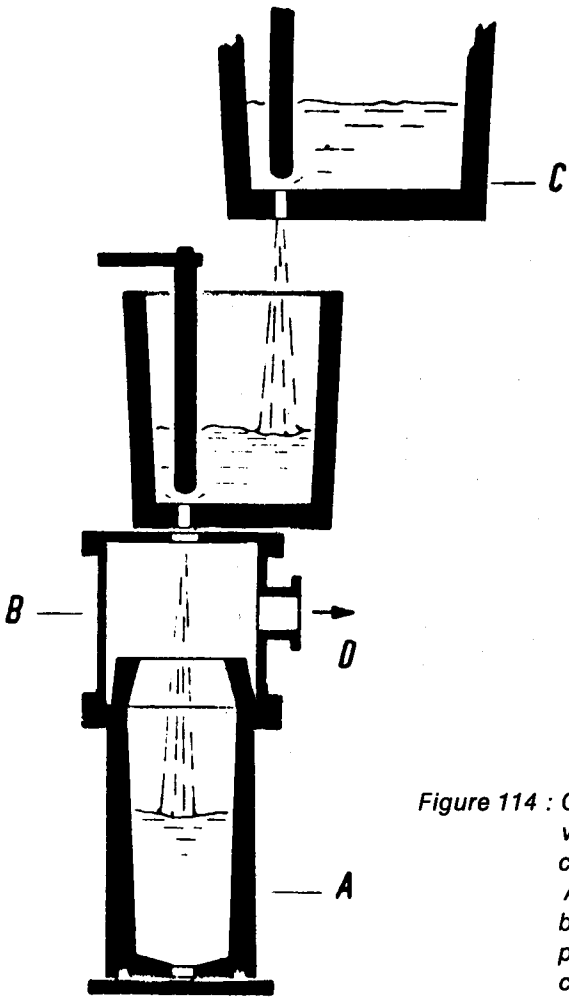


Figure 113 : Principe de la coulée de lingots sous vide

A = enceinte à vide — B = couvercle avec regard — C = conduite d'aspiration — D = lingotières — E = poche intermédiaire — F = poche de coulée.

s'écoule rencontre la membrane d'aluminium, la fond instantanément et pénètre dans le récipient sous vide où le jet est pulvérisé en fines gouttelettes de la façon décrite plus haut. Le dégazage des gouttelettes s'accomplit alors pendant la chute libre en lingotière. La vitesse de coulée s'établit suivant le débit de la poche intermédiaire adopté, entre 4 et 8 t/mn.

Il existe des installations permettant de couler des lingots d'un poids allant de 6 jusqu'à 240 t. Pour la coulée des lingots des poids les plus élevés on peut utiliser l'acier de plusieurs poches de coulée. Par contre, si l'on emploie le contenu d'une poche à la coulée d'un lingot à la fois, on peut se passer de la poche intermédiaire de la *figure 113*, si la poche de coulée a un fond muni d'une collerette permettant de la déposer directement sur le couvercle du récipient tout en assurant une étanchéité parfaite.



*Figure 114 : Coulée en lingotière sous vide avec lingotière étanchéifiée
 A = lingotière – B = chambre intermédiaire – C = poche de coulée – D = conduite d'aspiration.*

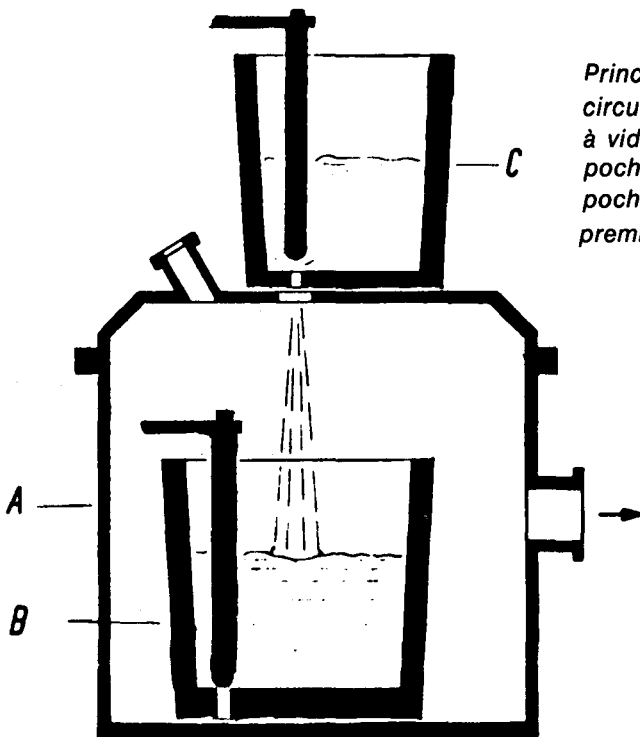


Figure 115 :

Principe du dégazage par circulation A = réservoir à vide — B = seconde poche de coulée — C = poche intermédiaire ou première poche de coulée

Dans une variante de la coulée en lingot sous vide, on rend étanche les différentes parties de la lingotière les unes envers les autres et on y dépose un réservoir intermédiaire sur lequel vient se placer la poche de coulée, l'ensemble formant une enceinte étanche (figure 114). De cette manière, on économise l'installation d'un grand récipient à vide.

On recourt au *dégazage continu* si l'on doit couler l'acier dans plusieurs petites lingotières, ou en source à l'aide d'une nourrice centrale. Dans ce cas, on ne peut plus exécuter la coulée en lingot sous vide. On introduit alors dans l'enceinte de dégazage, au lieu de la lingotière, une seconde poche de coulée dans laquelle l'acier est recueilli pendant le processus de dégazage (figure 115). Puis après la fin du dégazage sous vide, l'acier est coulé à l'air de façon normale avec cette poche. Du fait de l'utilisation d'une deuxième poche, les déperditions de température de l'acier sont particulièrement élevées dans ce procédé.

Pour réduire les pertes de température, on a perfectionné le dégazage continu en supprimant la première poche de coulée. Avec ce procédé, appelé dégazage à la coulée en poche, l'acier est alors coulé directement dans la poche intermédiaire (*figure 116*). Comme la vitesse de coulée doit être réglée en synchronisme avec la vitesse de sortie de l'acier hors de la poche intermédiaire, le procédé implique des fours basculants.

Avec le dégazage à la coulée en poche, on emploie des poches de coulée qui peuvent être rendues étanches au vide, par la mise en place d'un couvercle d'acier. Elles comportent en outre un mécanisme d'élévation des quenouilles muni du dispositif propre à assurer l'étanchéité.

Pour préparer le traitement de dégazage, après avoir monté les quenouilles dans la poche, le couvercle est mis en place avec, reposant sur lui, la poche intermédiaire pourvue d'une deuxième quenouille. Le pont de coulée enlève alors la poche ainsi préparée et la transporte devant le four. Là, la poche est reliée à la conduite d'aspiration établie jusqu'au four au moyen d'une tubulure d'aspiration montée sur le couvercle. Une partie de cette conduite d'aspiration est mobile pour permettre au pont d'abaisser la poche lors du basculement du four. La poche, est, alors, évacuée et l'on peut procéder à la coulée du four. On travaille également avec ce procédé sous des pressions de vide de 0,5 à 5 torr. En fin de coulée, on peut ajouter, pour désoxyder l'acier, de l'aluminium ou du silicium, soit par la poche intermédiaire, soit par une des capacités additionnelles rapportées sur le couvercle. Après la coulée, la conduite à vide est séparée de la poche, celle-ci emmenée à la halle de coulée et, là, l'acier coulé en lingots de façon habituelle.

Le *procédé par siphonnement sous vide*, appelé aussi procédé DH (DH = Dortmund-Höder-Hüttenunion SA) fonctionne d'après un principe totalement différent de ceux qui régissent les procédés de dégazage jusqu'à présent en service. La *figure 117* indique le principe du procédé qui est une application de l'expérience représentée (*figure 97*). Une enceinte à vide garnie de parois maçonnées en briques réfractaires qui comporte, au fond, une canalisation également maçonnée est plongée dans la poche de coulée remplie d'acier. Lorsque le vide est fait dans l'enceinte, l'acier est alors aspiré à l'intérieur de celle-ci jusqu'à une hauteur d'environ 1,40 m au-dessus du niveau du bain dans la poche. Si, à ce moment, on élève l'enceinte d'environ 60 cm, l'acier s'en écoule parce que la différence des niveaux de 1,40 m entre la poche et l'enceinte doit rester constante pour les raisons indiquées dans la section 4.5.2. Il reste purement et simplement dans les tubulures d'aspiration une colonne d'acier de 1,40 m de hauteur. Si l'on redescend l'enceinte, l'acier y remonte et se trouve dégazé par la dépression qui y règne. Par des élévations et immersions répétées de l'enceinte

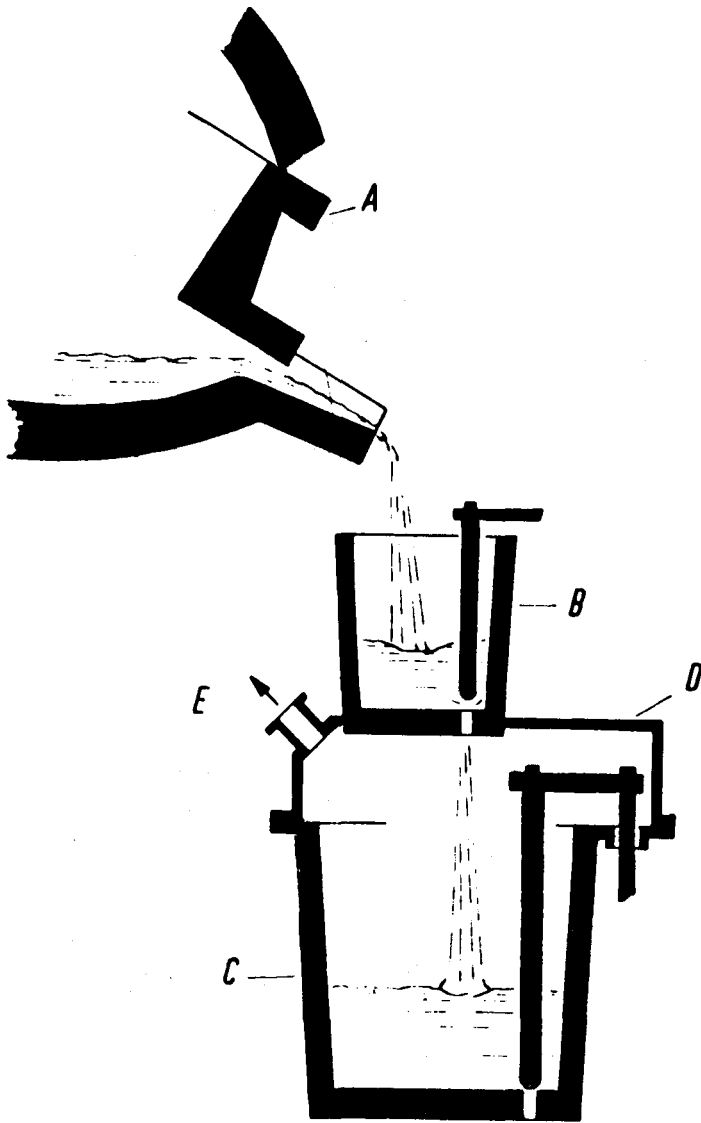


Figure 116 : Principe du dégazage à la coulée du four

A = four basculant – B = poche intermédiaire – C = poche de coulée – D = couvercle de poche – E = conduite d'aspiration de gaz.

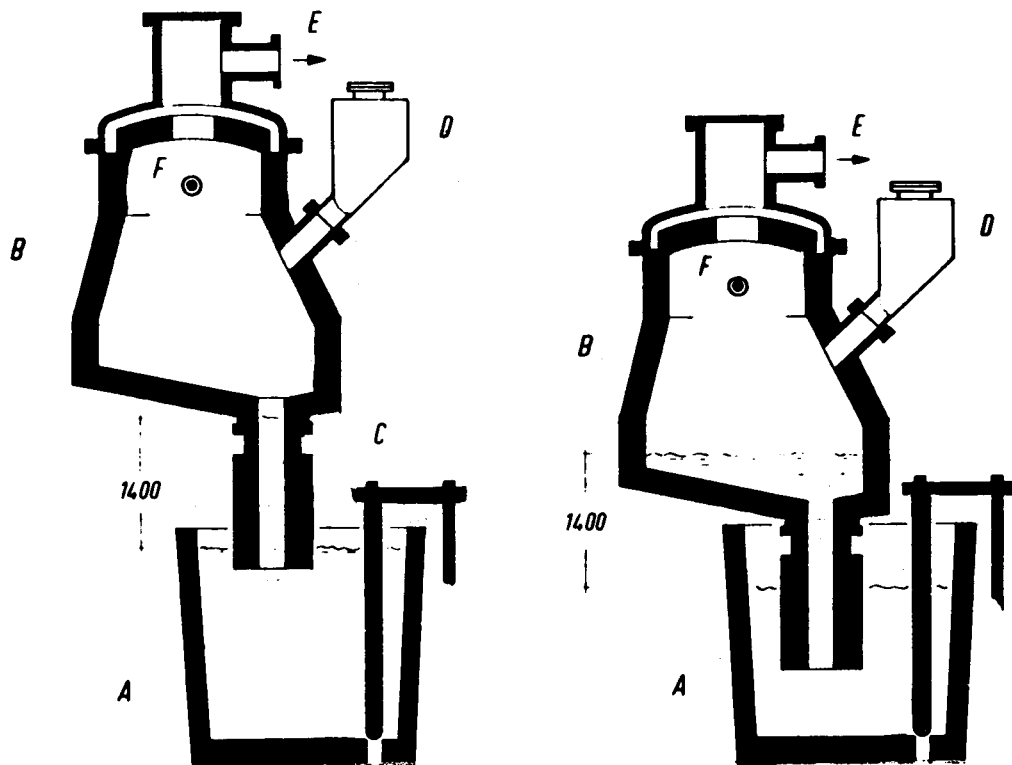


Figure 117 : Principe du procédé à aspiration par le vide
A = poche de coulée – B = réservoir à vide – C = tubulure d'aspiration – D = réservoir à alliages – E = conduite d'aspiration.

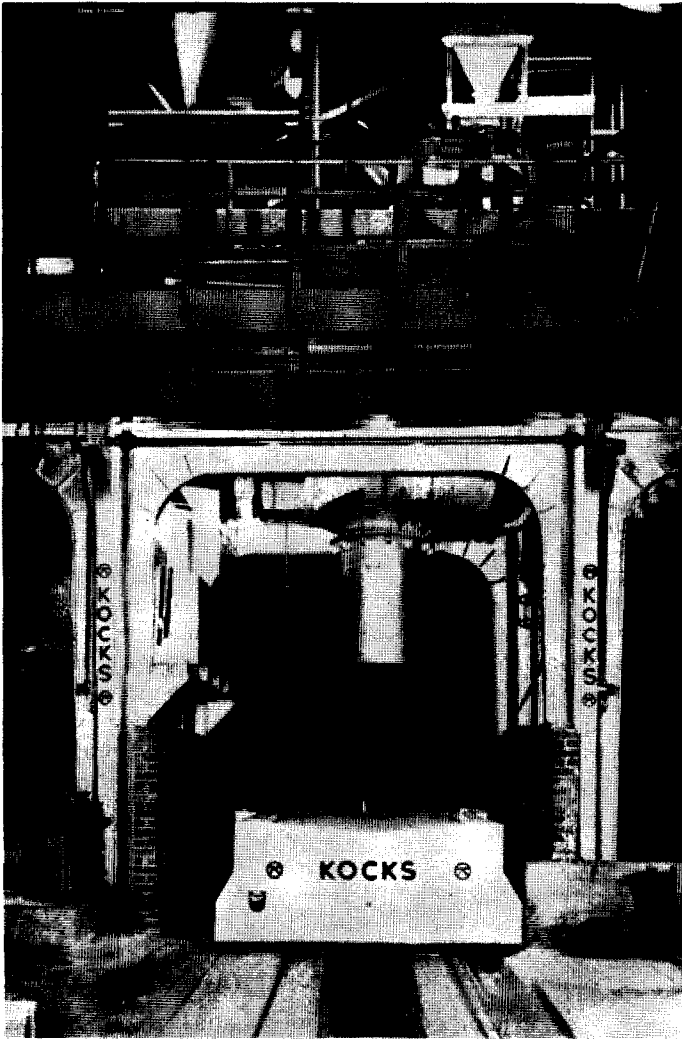


Figure 118:
*Installation à vide,
système
élevateur
de réservoir*

à vide, la teneur en gaz du bain se trouve de plus en plus réduite, L'équipement agit également comme une pompe. En conséquence, il est possible, pendant ou vers la fin du traitement par le vide, d'ajouter de grandes quantités d'éléments d'alliage et de les répartir de façon homogène dans le bain. C'est pourquoi le procédé est appliqué le plus souvent de façon à effectuer

d'abord le dégazage du bain, à l'origine effervescent, et ensuite à procéder à la désoxydation, ce qui permet d'obtenir des analyses rigoureuses.

Le procédé s'est largement répandu dans les aciéries, car il permet, sans préparation importante, de traiter les coulées les unes après les autres. Il existe en service des installations pour le traitement de coulées de 10 à 400 t.

Avec le système dit élévateur d'enceinte, celle-ci est insérée dans une plate-forme qu'on peut élever et descendre hydrauliquement (*figure 118*). La poche est amenée sous l'installation au moyen d'un wagon.

Avec le système élévateur de poche, c'est au contraire celle-ci qui est élevée et abaissée et non plus l'enceinte (*figure 119*). Le wagon à poches est alors muni d'une traverse de levage dans laquelle la poche est engagée.

Le système à fléau de balance (*figure 120*) représente une autre variante, dans laquelle l'enceinte est reliée avec la plate-forme à une extrémité d'un bras de levier muni d'un contrepoids. Dans quelques installations, la poche est déposée à une place déterminée dans la fosse de coulée et l'installation est amenée au-dessus.

La chambre intérieure maçonnée de l'enceinte de dégazage est chauffée électriquement par résistances à barreaux de graphite jusqu'à la température de l'acier liquide et maintenue à cette température pendant tous les déplacements de l'enceinte. Ainsi les pertes thermiques sont très minimes pendant le traitement, de sorte qu'avec les grandes unités d'affinage, il est pratiquement inutile de surchauffer l'acier dans le four. On trouve aussi dans quelques installations un chauffage avec brûleurs à gaz et à mazout. Toutefois ce mode de chauffage ne peut être utilisé que pendant les temps morts entre les traitements.

Outre l'installation de vide, on trouve une salle de service qui comporte le pupitre de commande (*figure 121*) et les appareils indicateurs (*figure 122*). De plus, des salles sont nécessaires pour recevoir les installations hydrauliques des stations de commande et du transformateur de chauffage.

Le traitement par le vide selon le procédé DH s'effectue de la façon suivante. L'acier est coulé, comme d'habitude, du four dans la poche, mais sans apport d'agents désoxydants. Pendant la coulée, on fixe à l'extrémité de la tubulure d'aspiration de l'installation de vide un déversoir à laitier et la plate-forme, avec l'enceinte, est élevée à sa position haute. La poche est ensuite placée sur le wagon d'amenée sous l'installation. En descendant l'installation, la tubulure d'aspiration heurte et traverse la couche de laitier puis plonge dans le bain. On met alors l'ensemble des pompes en route. Du



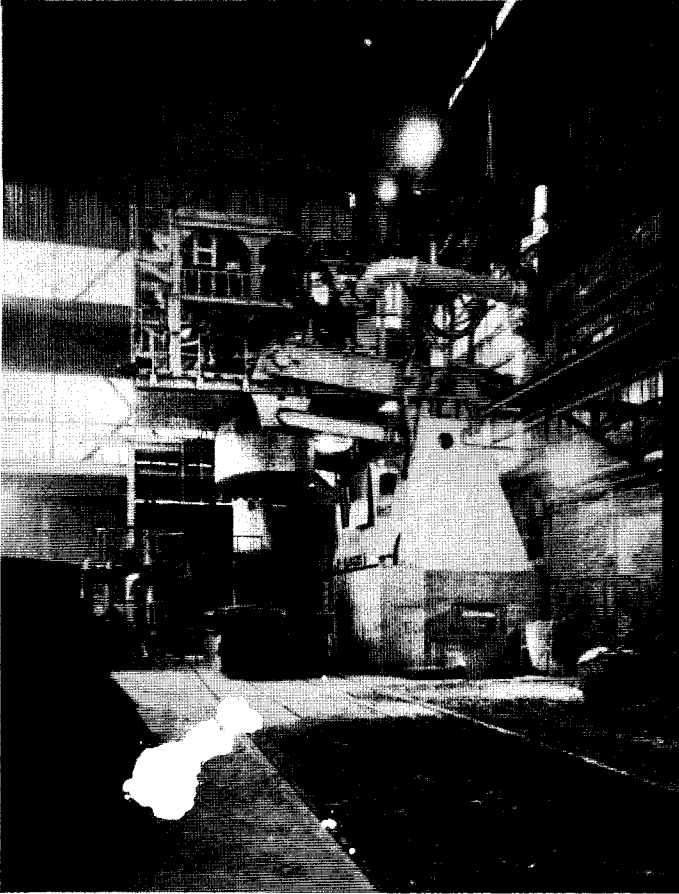
Figure 119:

**Installation à vide,
système
élevateur
de poche**

fait de la dépression créée, l'acier plonge dans le bassin métallique. Environ 30 s après l'immersion commencent l'ascension dans l'enceinte et la descente vers la poche, d'abord par commande manuelle, ensuite par commande automatique. La pression dans le réservoir à vide prend ici l'allure caractéristique représentée à la *figure 123*. Chaque fois qu'une nouvelle quantité d'acier pénètre dans l'enceinte à vide, la pression remonte en raison du

Figure 120 :

Installation à vide, système fléau de balance



dégazement brutal qui se produit, puis retombe pendant l'écoulement vers la poche. Le maximum de pression atteint joint à l'examen de la composition chimique du gaz et de la quantité d'air aspirée, donnent des indications sur la teneur en gaz de chaque coulée. Au fur et à mesure de l'avancement du dégazage, les pointes de pression diminuent au cours du traitement. Lorsque le degré de dégazage voulu est atteint, on ajoute par les trémies de

chargement les éléments d'alliage indispensables, comme le ferro-manganèse, le ferro-silicium, l'aluminium, etc., pour amener le bain à la composition désirée.



Figure 121 :
Pupitre de service d'une installation à vide

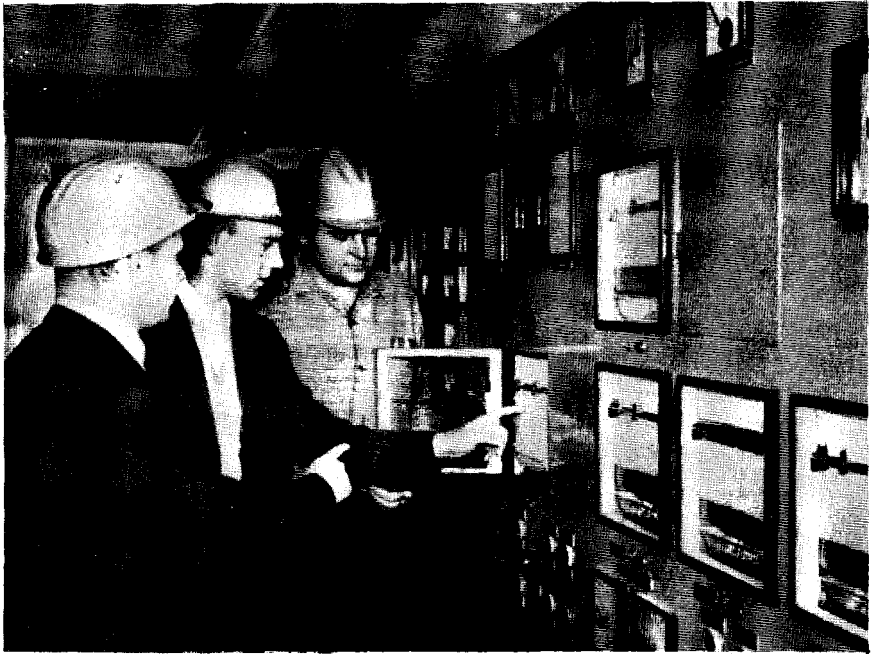


Figure 122 : Tableau d'appareils indicateurs d'une installation à vide

Enfin on exécute encore quelques cycles de levée et descente afin d'obtenir une répartition homogène des additions dans le bain. La série de pompes est alors mise hors circuit, l'enceinte ramenée à la pression atmosphérique et la tubulure d'aspiration sortie du bain. La poche est enlevée de l'installation, prise par le pont, puis coulée comme d'habitude en chute ou en source.

Le traitement proprement dit dure de 10 à 20 minutes, selon la qualité de l'acier et le poids du bain. Le procédé est largement automatisé; toutes les manœuvres en cours de traitement peuvent être commandées par un opérateur unique, à partir du pupitre de commande. On peut, en outre, prélever des échantillons dans la poche pendant le traitement, et contrôler en cours d'opération la température du bain dans la poche par thermo-couple à immersion.

Le procédé de dégazage par circulation R - H (figure 124) utilise, comme le procédé de vide par aspiration, une enceinte à vide garnie de briques réfractaires. Mais ici, au lieu d'une unique tubulure d'aspiration, ce sont deux conduites maçonnées en briques réfractaires qui sont rapportées sur le fond du réservoir et immergées dans le bain pendant le traitement. Quand l'enceinte est sous vide, 2 à 5 t d'acier sont aspirées dans le bain. Afin de soumettre l'acier à un mouvement circulatoire, on introduit dans une des deux conduites – la conduite d'admission – un gaz d'entraînement. Dans cette conduite plongeuse il se forme un mélange d'acier et de gaz dont le poids spécifique est inférieur à celui de l'acier qui s'écoule dans l'autre conduite et, de ce fait, on atteint dans la conduite d'admission une plus haute élévation barométrique que dans l'autre. Pour éviter que circule constamment le même métal, les deux conduites sont prévues avec un grand espacement et divergentes.

Normalement, on utilise l'argon comme gaz d'entraînement. On peut aussi utiliser des gaz réactifs qui provoquent certaines modifications du bain.

Pour maintenir minimales les déperditions de température de l'acier pendant le traitement, le réservoir est préchauffé à la flamme de gaz à une température d'environ 1 200 à 1 300 °C Les agents désoxydants sont ajoutés à la fin du traitement, non pas dans l'enceinte à vide, mais dans la poche.

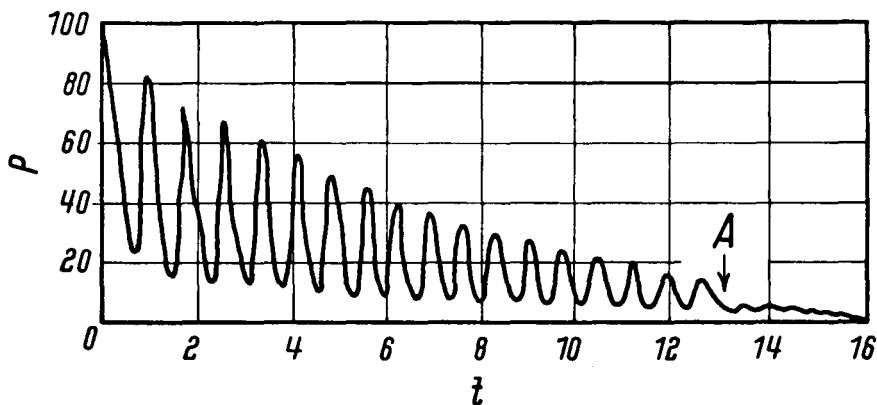


Figure 123 : Courbe de la pression dans le procédé d'élévation du réservoir à vide

p = pression dans le réservoir à vide – T = temps en minutes –
 A = addition de ferro-silicium

Des essais sont en cours pour accomplir le dégazage par circulation, non pas en poche, mais au four électrique, avant la coulée.

Indépendamment de ceux qui ont été décrits, il existe encore un certain nombre d'autres procédés qui ne se sont pas confirmés par l'exploitation dans des aciéries ou qui en sont encore au stade des essais. C'est pourquoi nous n'en citerons que trois exemples.

- A – L'acier coulé préalablement en lingotières est dégazé en plaçant sur les lingotières, après leur remplissage, des chapes amovibles étanches dans lesquelles on fait le vide (*figure 124*).
- B – Le dégazage en tunnel fonctionne d'après le principe du dégazage en lingotière. Au lieu d'une enceinte à vide on emploie un sas à vide à travers lequel les lingotières peuvent se succéder durant la coulée.
- C – Le dégazage par aspiration par le vide à deux tubulures d'aspiration emploie une enceinte dont la construction est semblable à celle de l'enceinte à dégazage par circulation.

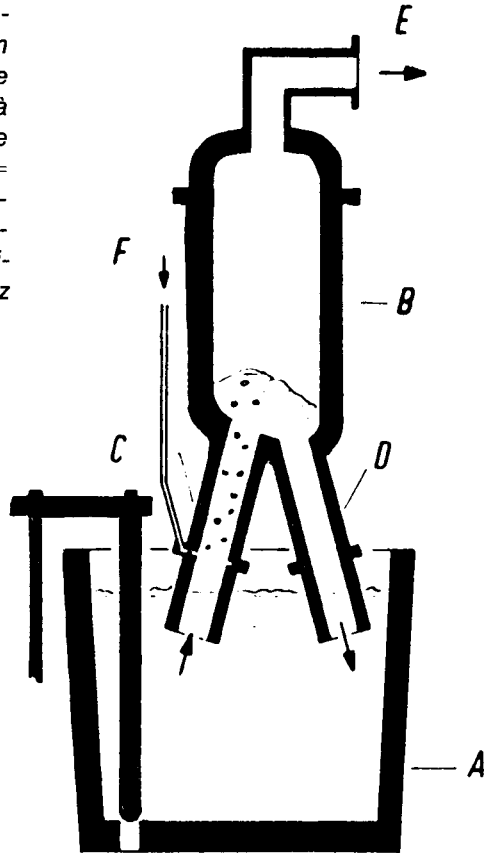
Cependant, l'acier n'est pas, comme avec ce dernier procédé, réintroduit dans la même poche, mais transporté dans une deuxième poche, ou bien dans une poche intermédiaire d'une installation de coulée continue. Dans ce cas, le transfert s'effectue par la différence de niveau des bains existant entre les deux poches. Il est inutile de faire intervenir un gaz d'entraînement.

4.5.4. Effet du traitement par le vide sur les caractéristiques d'emploi des aciers

Tous les procédés de traitement par le vide présentent un avantage commun: la diminution de la teneur en hydrogène dans l'acier. Elle est d'une importance exceptionnelle en raison de la très forte diminution de solubilité de l'hydrogène lors de la solidification de l'acier et de la diffusibilité de plus en plus faible pendant le refroidissement. Pour différentes qualités d'acier, des teneurs en hydrogène supérieures à $3 \text{ Ncm}^3/100 \text{ g}$ d'acier lors du refroidissement peuvent provoquer l'apparition de nombreuses criques fines, les redoutables tapures ou flocons. Avec des teneurs en hydrogène inférieures à $2 \text{ Ncm}^3/100 \text{ g}$ d'acier, le plus souvent, ces défauts ne se produisent plus. Les procédés de dégazage par le vide utilisés industriellement permettent tous d'atteindre des teneurs en hydrogène inférieures à cette limite.

La teneur en oxygène est également diminuée par le traitement sous vide. Pour les aciers à teneur en carbone moyenne et à teneur minimale en éléments d'alliage avides d'oxygène, on obtient des teneurs en oxygène de

Figure 124 : Principe du dégazage par circulation
 A = poche de coulée
 – B = réservoir à vide
 C = tubulure d'absorption
 – D = tubulure de décharge
 – E = tuyau aspirateur
 – F = conduite d'amenée du gaz d'entraînement



0,001 à 0,003 %. Avec les aciers moyennement et légèrement alliés, la diminution de la teneur en oxygène est moindre, si les éléments d'alliage ont été ajoutés à l'acier avant le dégazage par le vide. Les éléments avides d'oxygène agissent, en ce qui concerne ce gaz, comme ralentisseurs de dégazage, car ils le fixent sous forme de combinaison plus ou moins stable.

Une faible teneur en oxygène est importante dans l'acier parce que c'est la pierre de touche de sa pureté. C'est que l'oxygène se combine avec la plupart des éléments d'alliage et aussi avec le fer pour donner des oxydes qu'on identifie dans le produit fini comme inclusions non métalliques. Ils peuvent conduire, selon leur forme, leur dimension et leur nature à des

défauts importants et des hétérogénéités de matière dans les produits finis. Avec un traitement sous vide approprié et une addition d'éléments d'alliage convenable on arrive à diminuer non seulement le nombre de ces inclusions mais aussi leur dimension, et à modifier leur composition.

La teneur en azote de l'acier est également réduite par le dégazage sous vide. La diminution dépend largement de la teneur primitive. On arrive à des diminutions de 10 à 50 %.

Le contrôle d'analyse des bains, possible pendant l'application de certains procédés sous vide, ajouté à la stabilité du rendement des additions d'alliages dans les bains dégazés, fournit une sécurité d'analyse améliorée. Il en résulte une homogénéité d'une coulée à l'autre irréalizable avec le mode de travail normal. De ce fait, on réduit considérablement la dispersion des différentes coulées d'un acier d'une même qualité en ce qui concerne l'aspect de sa structure et son comportement à la transformation.

C'est pourquoi le traitement sous vide de l'acier sera avantageusement appliqué partout où sont exigées des conditions de fabrication constantes, une homogénéité aussi poussée que possible, un haut degré de pureté et des caractéristiques mécaniques transcendantes.

Les aciers pour roulements à billes, les aciers de cémentation et les aciers pour traitements thermiques, et en outre ceux pour de grosses pièces de forge constituent le groupe le plus important des aciers qui sont soumis au traitement sous vide. Les aciers pour rails, pour tôles de transformateurs, pour emboutissage extra-profond sont aussi de plus en plus traités sous vide. On note également des améliorations de qualité par le traitement sous vide des aciers réfractaires et inoxydables.

4.6. LA COULÉE CONTINUE DE L'ACIER

L'acier brut liquide fondu dans les aciéries est ordinairement coulé dans des lingotières, puis les divers lingots ou brames passent dans des laminoirs pour être transformés en demi-produits, c'est-à-dire en blooms, lingots méplats, billettes et largets.

Au cours des dix dernières années, les efforts entrepris en vue de mécaniser et finalement d'automatiser les opérations de la sidérurgie, ont permis de remplacer la méthode de travail «fractionnée» usuelle, composée de plusieurs stades, de la fabrication des demi-produits, par un procédé continu à un seul stade, susceptible d'être largement mécanisé et automatisé.

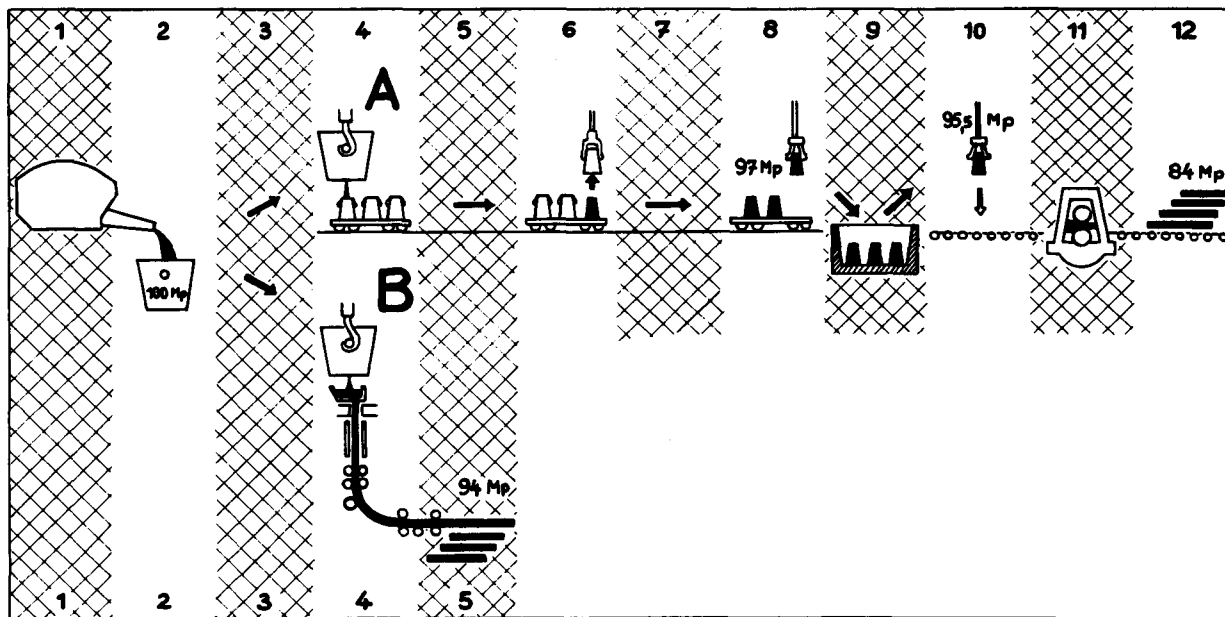


Figure 125 : Opérations et résultat de la fabrication de demi-produits par coulée normale de lingots ou de brames suivie de laminage, et par coulée continue.

Le demi-produit est donc fabriqué directement, sans être soumis au laminage. Le procédé consiste à couler, par exemple à partir d'une poche, une seule billette longue et continue (*figure 125*). C'est pourquoi ce procédé a reçu le nom de coulée continue, de même que l'installation dans laquelle est réalisée cette opération s'appelle atelier de coulée continue.

4.6.1. L'opération

En simplifiant beaucoup, on peut décrire de la manière suivante l'opération de la coulée continue, par exemple d'une billette : comme pour couler des lingots classiques, l'acier liquide est versé d'une poche de coulée (*figure 126*) dans une lingotière en cuivre, sans fond, refroidie à l'eau. La section intérieure libre de cette lingotière correspond à la section extérieure de la billette que l'on veut obtenir; avant la coulée, la lingotière est fermée par la «fausse billette», nom donné à un mandrin portant à la partie supérieure une plaque de même section que la lingotière. A cette plaque est fixé un boulon à tête à marteau destiné à être noyé dans la barre qui va être coulée. Dans la lingotière une mince couche d'acier brut coulé se solidifie très rapidement au contact direct des parois intérieures de la lingotière refroidies à l'eau, et à celui de la fausse billette servant de fond. Il se forme, pour ainsi dire, un récipient d'acier à parois minces rempli d'acier liquide. Si l'on abaisse lentement la billette servant de fond au fur et à mesure que continue à s'écouler le flot d'acier contenu dans la poche de coulée, il se forme une billette de plus en plus longue qu'il faut continuer à refroidir jusqu'à solidification complète et qui est ensuite tronçonnée à la longueur voulue.

4.6.2. Structure d'une installation de coulée continue

La *figure 127* représente de façon simplifiée une installation de coulée continue prévue pour couler simultanément deux billettes. Elle permet de bien distinguer les principaux dispositifs que comporte une telle installation. On voit tout d'abord en haut, la poche de coulée. Il s'agit d'une poche théière basculante grâce à laquelle l'acier est vidé par le bec (*figure 128*). Les poches sont garnies d'un matériau réfractaire comme les poches de coulée ordinaires. A l'intérieur de la poche est monté un siphon en matériau réfractaire destiné à retenir, au moment où la poche se vide, la scorie qui se forme à la surface, après le remplissage de la poche au convertisseur ou au four. Avant d'être remplies d'acier, les petites poches doivent être chauffées à 1 000 °C environ afin de réduire la déperdition de chaleur de la coulée, due au contact avec les parois des poches. Pour la même raison, la poche remplie d'acier peut être fermée par un couvercle muni d'un brûleur fonc-

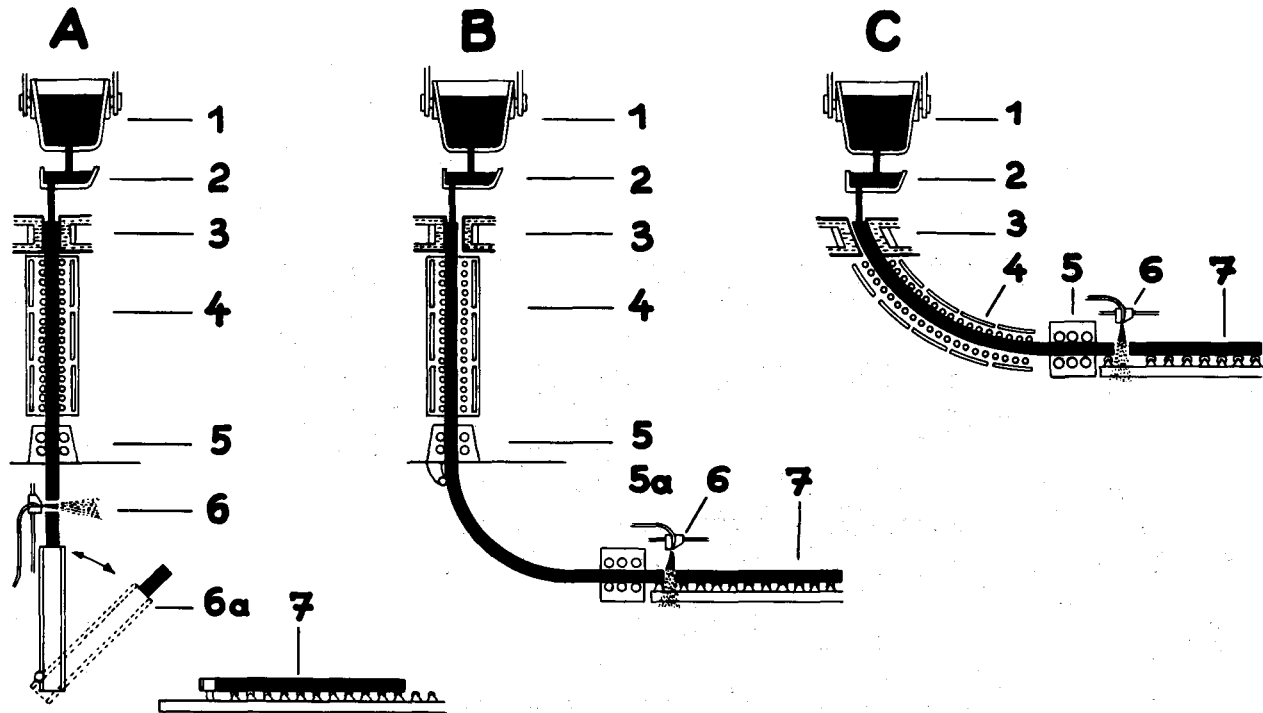


Figure 126 : Schéma de la coulée continue

a = installation de coulée continue de type vertical, b = installation de coulée continue de type vertical avec dispositif de coudage, c = installation de coulée continue en arc de cercle
 1 = poche d'acier brut, 2 = Tundish, 3 = lingotière, 4 = caisse de refroidissement, 5 = rouleaux moteurs, 6 = dispositif de cintrage, 7 = dresseuse, 8 = tronçonneuse, 9 = culbuteur, 10 = train de rouleaux.

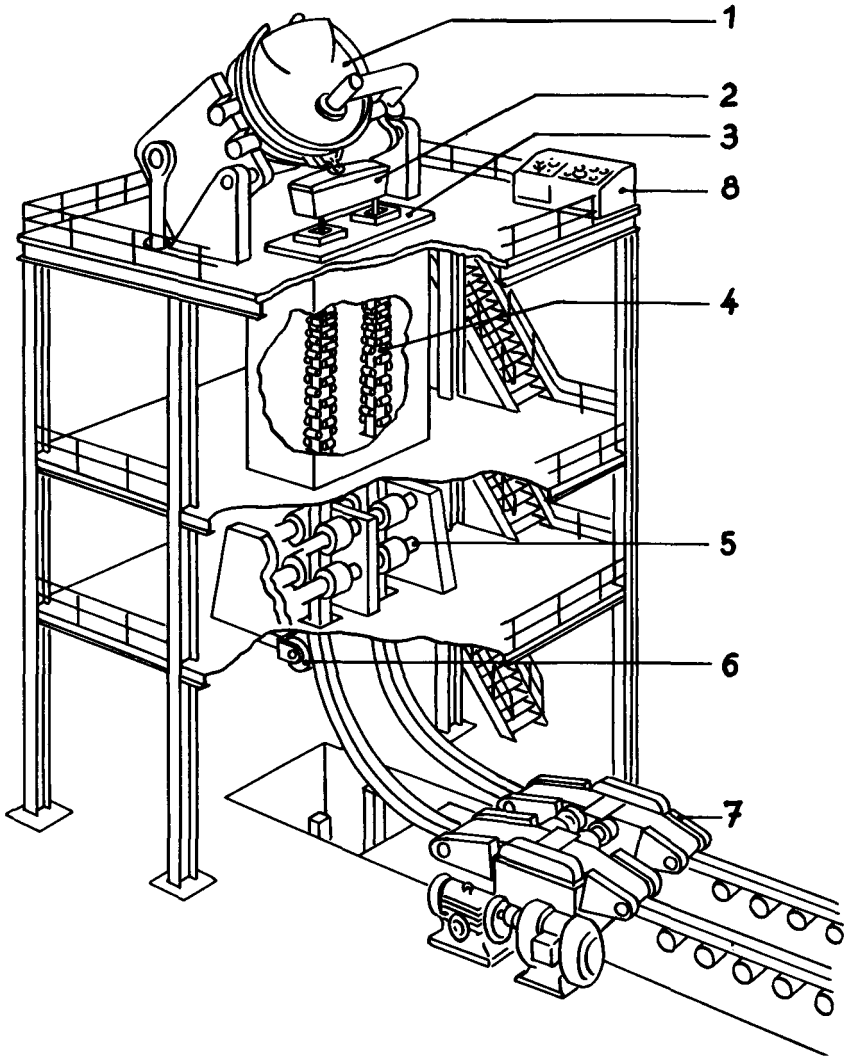


Figure 127 : Schéma d'une installation à deux lignes

1 = poche basculante, 2 = Tundish, 3 = lingotière, 4 = caisse de refroidissement, 5 = rouleaux moteurs, 6 = dispositif de cintrage, 7 = dresseuse, 8 = pupitre de mesure et de commande

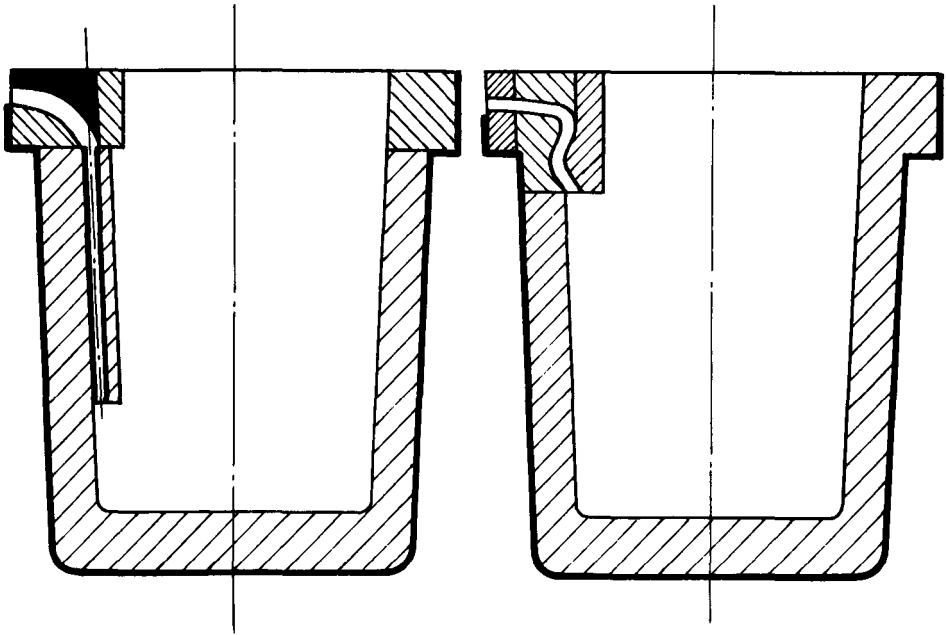


Figure 128 : Poche basculante.

tionnant au mazout ou au gaz et permettant de compenser au mieux les pertes thermiques pendant la coulée.

Un inconvénient des poches basculantes est le manque de solidité du siphon qui doit être remplacé au bout de quelques coulées, bien que l'on se serve d'un matériau réfractaire particulièrement résistant. De plus, lorsque se produisent des perturbations dans le fonctionnement de l'installation de coulée continue, il n'est pas possible, comme avec une poche à quenouille, de couler en bons lingots l'acier qui se trouve encore dans la poche.

C'est la raison pour laquelle, même dans la coulée continue, on se sert maintenant de poches identiques à celles utilisées à la coulée en lingotières classiques; ces poches sont donc munies d'une busette et d'une quenouille. Cela permet, en cas de perturbation du fonctionnement de l'installation de coulée continue, de couler l'acier correctement en lingotière. Dans cette éventualité, des lingotières de secours destinées à recueillir l'acier liquide (non visibles sur la figure 127) sont montées sur la plate-forme supérieure de l'installation (voir figure 131).

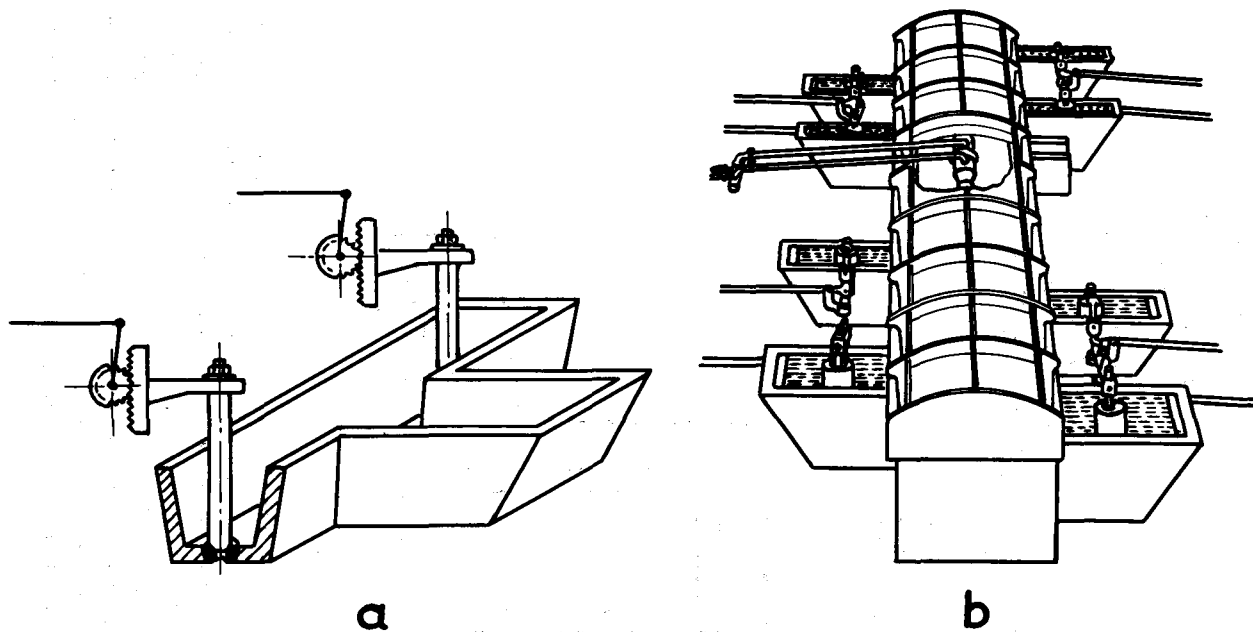
Au-dessous de la poche de coulée se trouve le récipient intermédiaire, appelé aussi panier répartiteur ou tundish (*figure 129*). Celui-ci est constitué, par un bac rectangulaire en tôle d'acier soudée garnie intérieurement d'un matériau réfractaire tel que, par exemple, de la chamotte. Le panier peut être divisé en deux compartiments par une petite digue en matériau réfractaire. L'acier liquide de la poche de coulée se déverse dans l'une et s'écoule ensuite dans l'autre par un trou percé à la base de la digue, ce qui permet de retenir la scorie entraînée ou formée à la surface. Dans l'autre partie, le fond du panier est muni, comme celui d'une poche de coulée, d'une busette calibrée fermée à l'aide d'une quenouille. En levant et en abaissant celle-ci au moyen d'un dispositif semblable à celui d'une poche de coulée ordinaire (voir *figure 129*), il est possible de régler avec précision la quantité d'acier qui se déverse, pendant la coulée continue, du panier dans la lingotière refroidie à l'eau, c'est-à-dire, la vitesse de coulée. Lorsque l'on coule les demi-produits de grande section, comme par exemple des brames, il est souvent nécessaire de prévoir deux ou plusieurs busettes. Il suffit alors, pour régler la vitesse de coulée, que l'une ou l'autre d'entre elles soit munie d'une quenouille.

La contenance du panier ne doit pas être trop grande. Plus le panier est grand, plus est grande la quantité de matériau réfractaire que l'acier liquide doit réchauffer au moment de la coulée. Par ailleurs, il se produit un rayonnement calorifique constant de la surface de l'acier liquide déversé dans le panier. C'est pourquoi, afin de réduire le plus possible la déperdition de chaleur de l'acier en fusion contenu dans le panier, celui-ci est muni d'un couvercle (voir *figure 129*) et chauffé préalablement à environ 1000 °C avant la coulée.

La capacité du panier à acier liquide est, en outre, calculée au plus juste, pour permettre de pallier les perturbations de courte durée pendant que se déverse le métal en fusion de la poche de coulée. C'est pourquoi le panier ne contient que la quantité d'acier qui s'en écoule en une minute.

Dans les installations de coulée continue où deux ou plusieurs lignes de demi-produits doivent être coulées en même temps, le panier sert aussi de répartiteur. Il est alors muni d'un nombre de busettes avec quenouille égal au nombre de lignes de demi-produits (voir *figure 129*). Pour couler simultanément deux lignes de demi-produits, on se sert aussi de dispositifs appelés répartiteurs basculants ou pivotants (*figure 130*).

Avec le répartiteur basculant, le réglage de la vitesse de coulée n'a pas lieu au moyen de quenouilles, mais par inclinaison du répartiteur basculant en direction de la lingotière où il est nécessaire d'augmenter le débit d'acier



247 Figure 129 : Tundish

a = installation à deux lignes, b = installation à huit lignes.

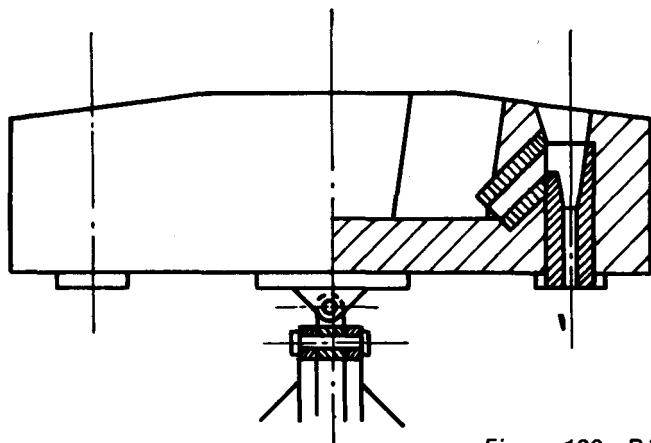
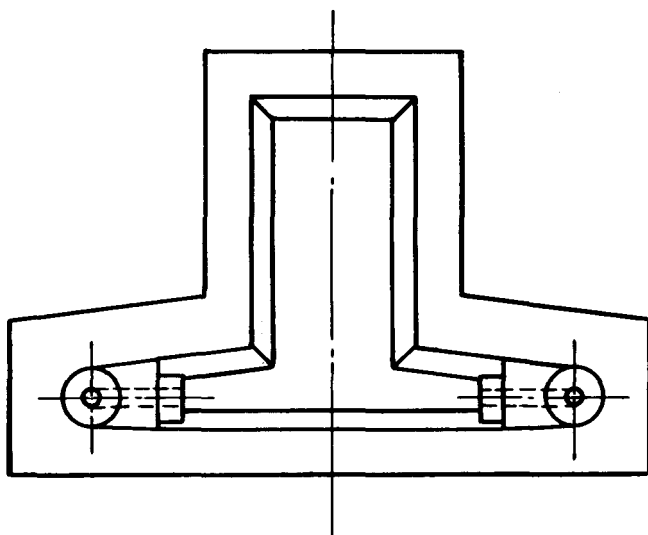


Figure 130 : Répartiteur basculant.



liquide. Ce mouvement augmente la hauteur d'acier au-dessus d'une busette donnée, ce qui a pour conséquence d'en modifier le débit par l'augmentation de la pression ferrostatique. Les répartiteurs basculants sont moins avantageux que les répartiteurs à quenouille, car le mouvement de bascule imprimé à l'appareil modifie la direction du jet de coulée, ce qui peut être nuisible, en particulier lorsque la ligne de demi-produits à couler est de petite section et que, par exemple, par suite d'un changement de direction du répartiteur, la paroi de la lingotière est atteinte par le jet de coulée et endommagée.

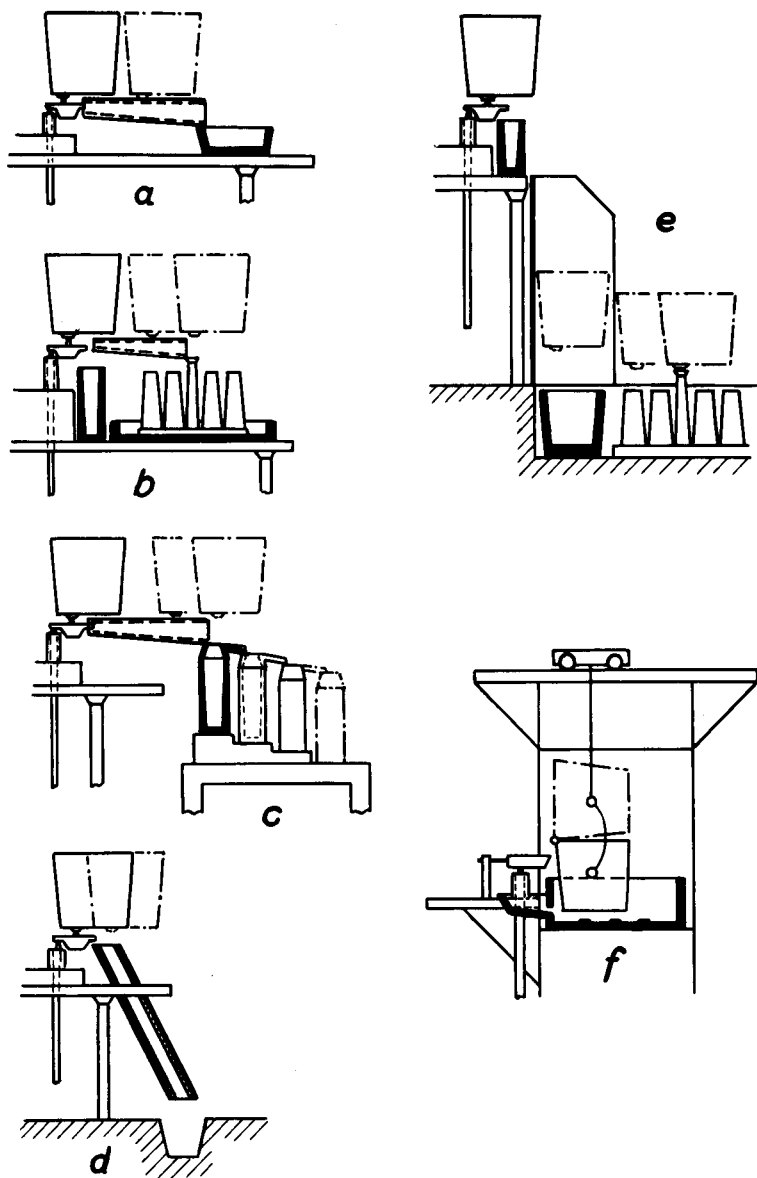


Figure 131: Dispositifs de protection des installations de coulée continue pour les cas d'écoulements d'acier.

Après la coulée, le panier est basculé pour être nettoyé et réparé. Il peut servir plusieurs fois. Le revêtement réfractaire est débarrassé des restes de métal solidifié qui peuvent y adhérer et, après remplacement des busettes et quenouilles, le panier est réchauffé pour servir à nouveau.

Dans l'installation de coulée continue il est bon de prévoir, auprès et en dessous de la cuve intermédiaire, des dispositifs permettant de recueillir l'acier liquide de la poche de coulée en cas d'incidents au cours de la coulée, par exemple si l'on constate des fuites aux quenouilles. La *figure 131* donne schématiquement trois exemples de dispositifs protecteurs de ce genre (cuves de secours).

La partie principale d'une installation de coulée continue est constituée par la lingotière refroidie à l'eau. Ainsi qu'il a déjà été mentionné brièvement, les lingotières de coulée continue sont en cuivre. Elles sont à double paroi et refroidies à l'eau. Les lingotières sont, soit faites d'un bloc de cuivre massif (*figure 132*), soit façonnées à partir d'un tube de cuivre sans soudure (*figure 133*), soit fabriquées par assemblage de plusieurs plaques de cuivre (*figure 134*). Les lingotières de ce dernier type sont avantageuses, surtout lorsque des réparations doivent être effectuées. Les parois internes des lingotières s'usent, en particulier à la coulée, ce qui élargit la section intérieure libre de la lingotière et, par conséquent, aussi celle du demi-produit coulé. Comme il est aisé de le comprendre, le rétablissement de la section intérieure initiale des lingotières à coulée continue est particulièrement simple lorsqu'elles sont fabriquées par assemblage de plusieurs plaques.

En dehors des cas où elle serait endommagée par une utilisation anormale ou par des incidents de coulée, une lingotière de coulée continue peut servir pour plusieurs centaines de coulées. De temps à autre des réparations seront nécessaires, il est vrai : ainsi, par exemple, les fissures aux parois des lingotières doivent être ressoudées; il est nécessaire aussi de maintenir en parfait état les points de jonction des différentes plaques formant une lingotière, par soudage et façonnage des angles.

Dans la plupart des cas, les parois intérieures des lingotières sont légèrement inclinées les unes vers les autres, et la section interne de la lingotière se rétrécit vers le bas. Ceci est utile car il se produit un retrait entre l'acier liquide et solide, c'est-à-dire que la section du demi-produit diminue et il faut, pour assurer le refroidissement rapide nécessaire, que le métal reste le plus longtemps possible en étroit contact avec les parois intérieures de la lingotière refroidies à l'eau. Néanmoins, par suite de ce contact intime, le glissement de la barre de demi-produit, est rendu très difficile par le frot-

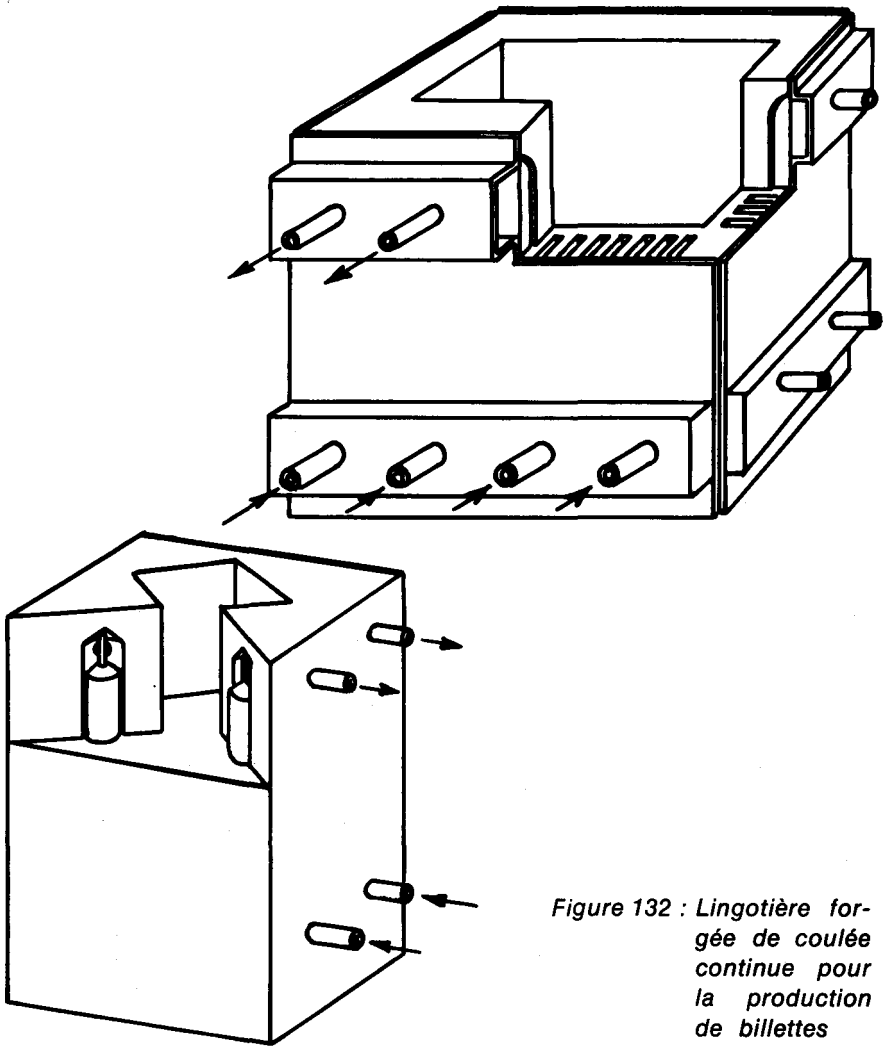


Figure 132 : Lingotière forgée de coulée continue pour la production de billettes

tement de ses surfaces contre les parois intérieures de la lingotière. Aussi arrive-t-il facilement que, par suite de l'adhérence de l'enveloppe métallique formée en premier lieu aux parois de la lingotière, il se produise une fissure à la surface de cette enveloppe, au moment où l'extracteur tire sur la barre de demi-produits. Pour empêcher que la surface du profil coulé ne soit ainsi

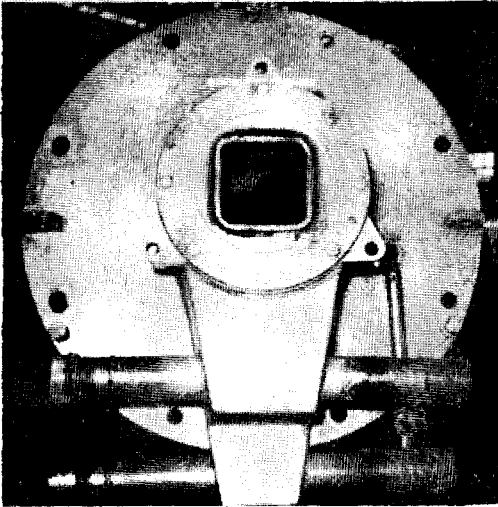


Figure 133 :

Lingotière de coulée continue en tube de cuivre.

détériorée et pour faciliter son glissement, les parois intérieures des lingotières sont enduites d'huile végétale, par exemple d'huile de colza. Pour faciliter davantage encore le dégagement de la barre de demi-produit et éviter les fissures à la surface de celle-ci, les lingotières sont généralement mobiles dans l'installation de coulée continue. De telles lingotières mobiles sont animées d'un mouvement de va-et-vient de haut en bas ayant la particularité suivante : le mouvement vers le bas est synchronisé avec la vitesse de descente de la barre; par contre, le mouvement de remontée est effectué en un temps deux fois plus court que celui de descente. Ce dernier mouvement provoque le décollement et le glissement de la barre dans la lingotière.

Le mouvement de va-et-vient se répète constamment pendant toute la durée de la coulée. On obtient de très bons résultats avec des lingotières mobiles dont le mouvement de va-et-vient est assuré soit par un dispositif mécanique, soit par un système hydraulique à huile.

Dans l'installation de coulée continue, il existe au-dessous de la lingotière un étage dit de refroidissement (*figure 135*). Celui-ci a pour but de refroidir la barre de demi-produits dont l'intérieur est encore liquide lorsqu'elle quitte la lingotière. Ce refroidissement s'opère par pulvérisation d'eau ou d'un mélange d'eau et d'air comprimé, au moyen de plusieurs gicleurs disposés le long des rampes de refroidissement. Pour la coulée des brames de grand format, la ligne de refroidissement est équipée de nombreux

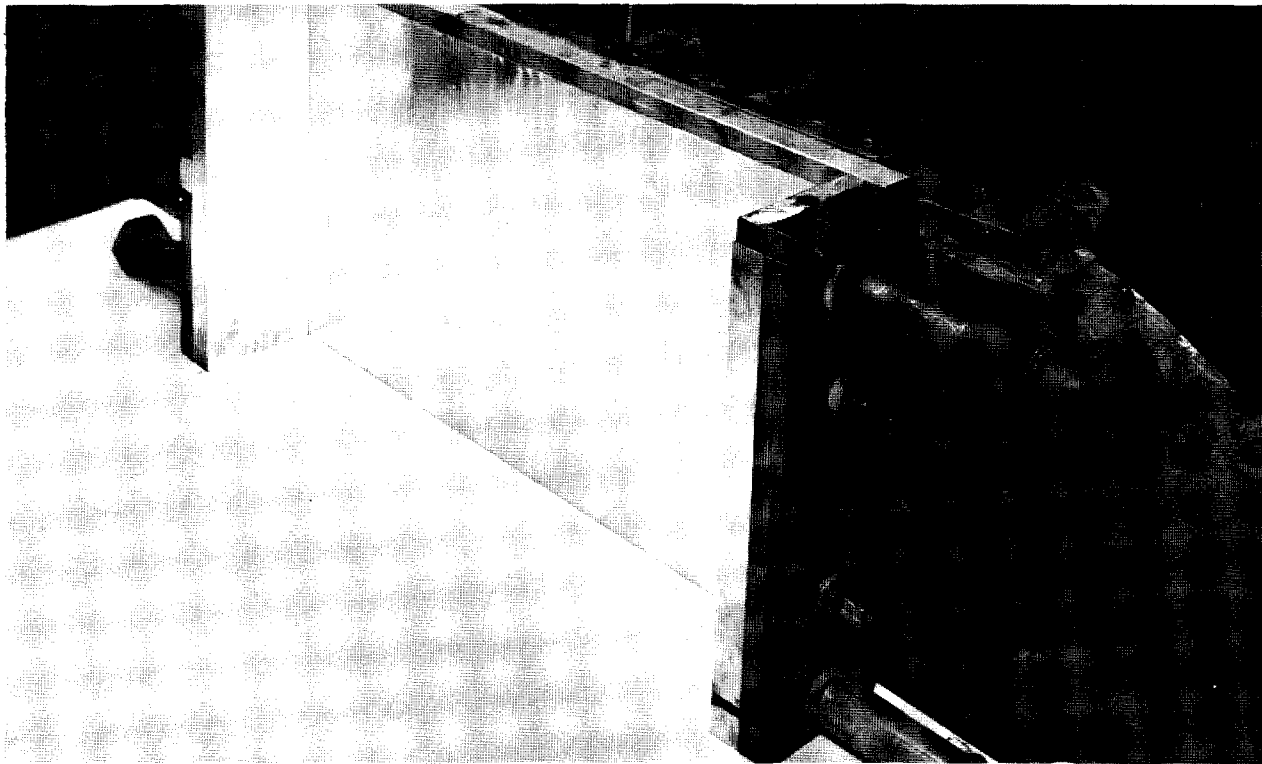


Figure 134 : Lingotière formée de 4 plaques pour la coulée continue de bames

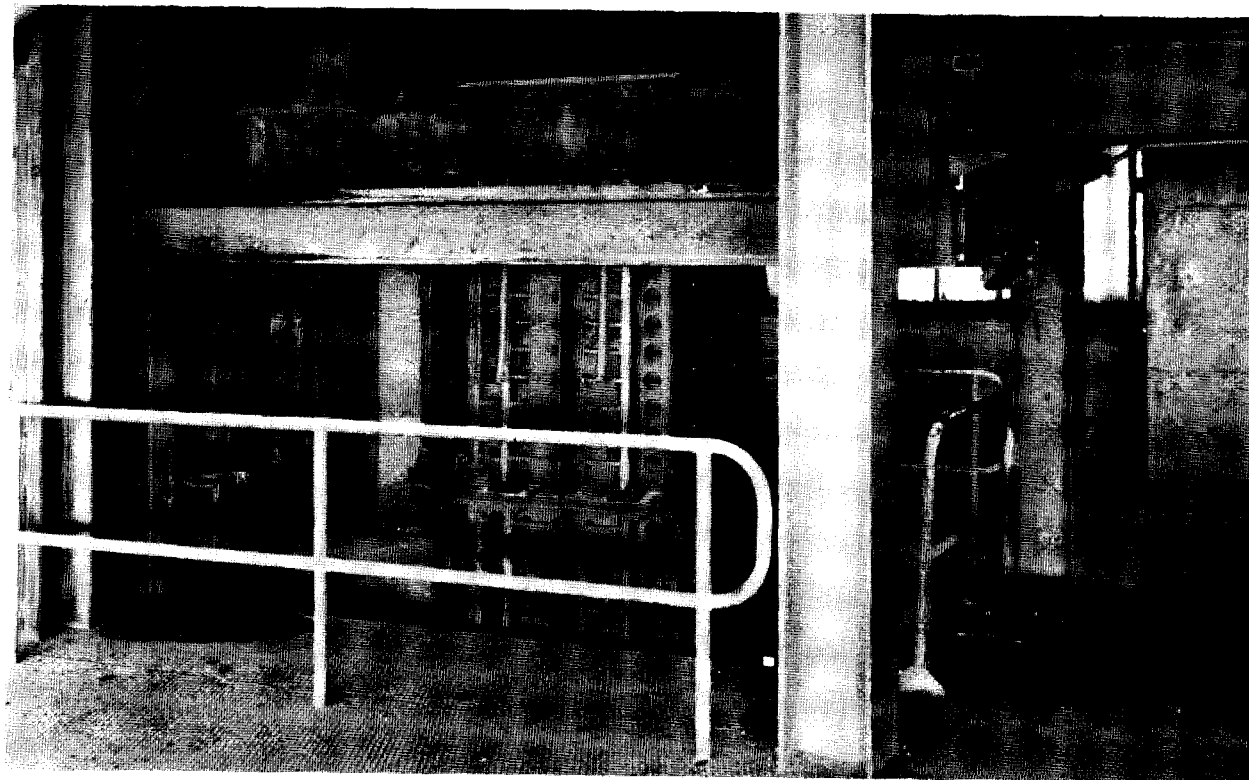


Figure 135 : Ligne de refroidissement.

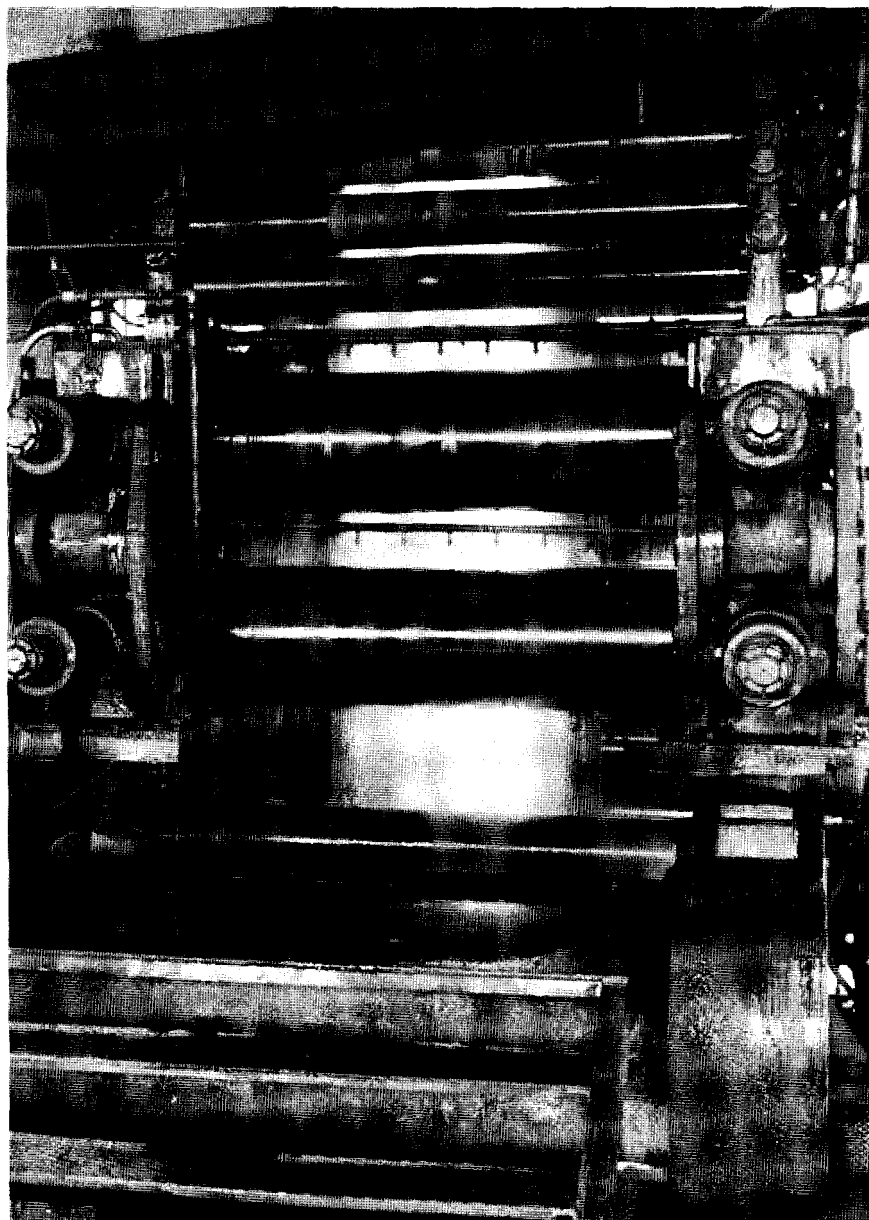
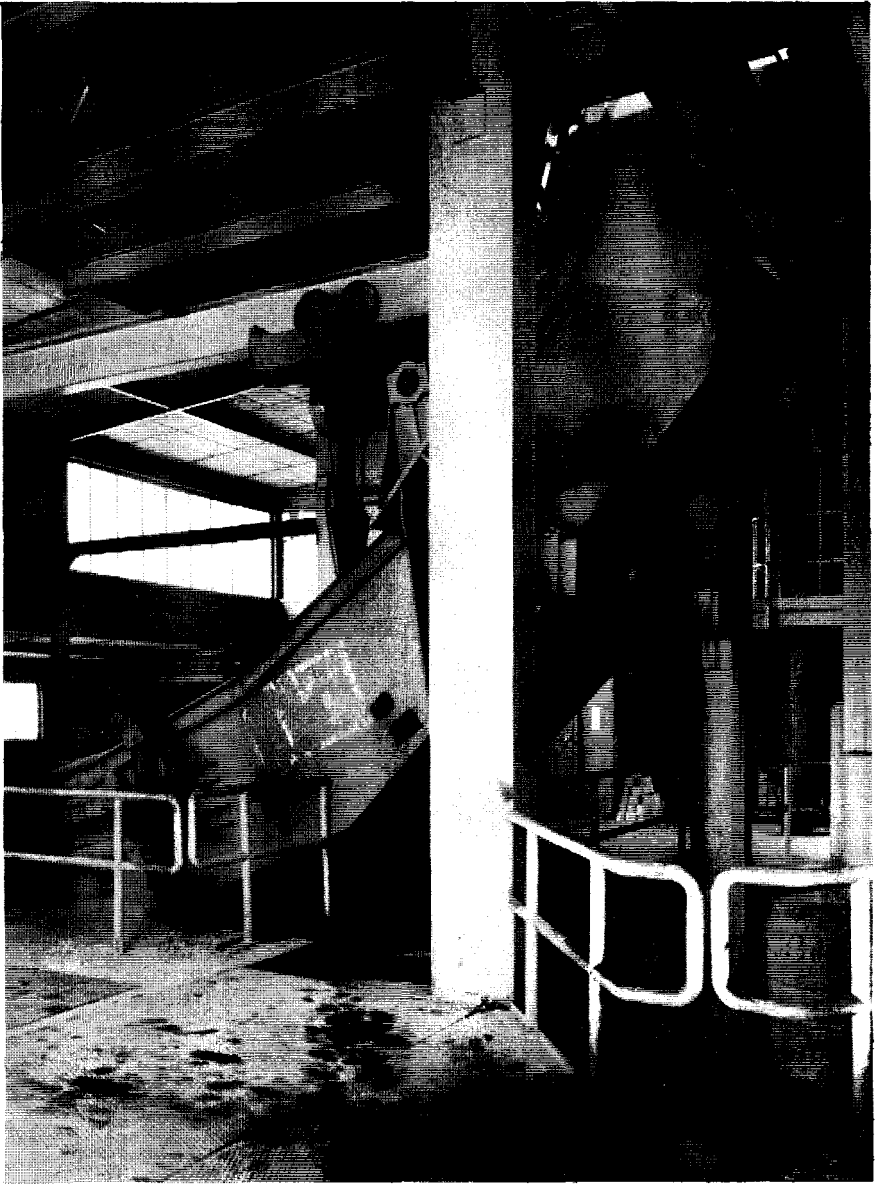


Figure 136 : Rouleaux moteurs



Figure 137 a et b :



Dispositif de coudage.



Figure 139 : Tronçonneuse.



Figure 138 : Dresseuse.

galets d'appui qui soutiennent l'enveloppe extérieure mince, incandescente, encore molle de la brame pendant sa descente. Ces galets empêchent que se produise un renflement, car le métal est encore liquide à l'intérieur. L'effet réfrigérant de la ligne de refroidissement sur la barre peut être adapté à tout moment aux exigences de la coulée continue par réglage du débit de l'eau vaporisée.

Dans l'installation de coulée continue, la zone de refroidissement est prolongée par un ou plusieurs couples de rouleaux extracteurs (*figure 136*) qui sont actionnés mécaniquement et qui entraînent vers le bas la masse coulée. La vitesse de descente est adaptée aux conditions de la coulée par un réglage du nombre de tours des rouleaux extracteurs.

Dans l'installation de coulée continue présentée à la *figure 127*, la barre passe ensuite, dans sa descente, entre d'autres rouleaux formant dispositif de cintrage. Ils permettent de faire passer la barre coulée de la verticale à l'horizontale.

La barre cintrée passe ensuite dans un dispositif redresseur (*figure 138*) et enfin, dans une tronçonneuse (*figure 139*) où les produits sont découpés à la longueur voulue avant d'être entreposés (*figure 140*).

Dans l'installation de coulée continue de type vertical, il n'y a pas de dispositif de cintrage ni de dresseuse. La tronçonneuse se trouve immédiatement au-dessous des rouleaux moteurs (*figure 141*). Les installations de coulée continue comportant un dispositif de cintrage ont été construites surtout pour éviter d'avoir à édifier une installation trop élevée.

4.6.3. Contrôle et réglage de la coulée

Dans l'installation de coulée continue, des instruments de mesure et des dispositifs de commande et de réglage sont prévus afin d'assurer le contrôle et le réglage de la coulée (*figure 142*). Ils servent par exemple, à mesurer les débits de gaz et d'air, ainsi que la température au moment du préchauffage du tundish, la température de l'acier liquide pendant la coulée, à déterminer les débits d'eau de refroidissement et la température de l'eau, la température de la coulée, à mesurer et à régler la vitesse de vidange de la poche de coulée, à contrôler automatiquement le niveau du bain d'acier liquide dans la lingotière, et la vitesse de descente de la barre, etc.

Ces systèmes de contrôle sont constamment améliorés afin de rendre la coulée, autant que possible, indépendante d'erreurs subjectives d'observation et afin d'éviter les fausses manœuvres.

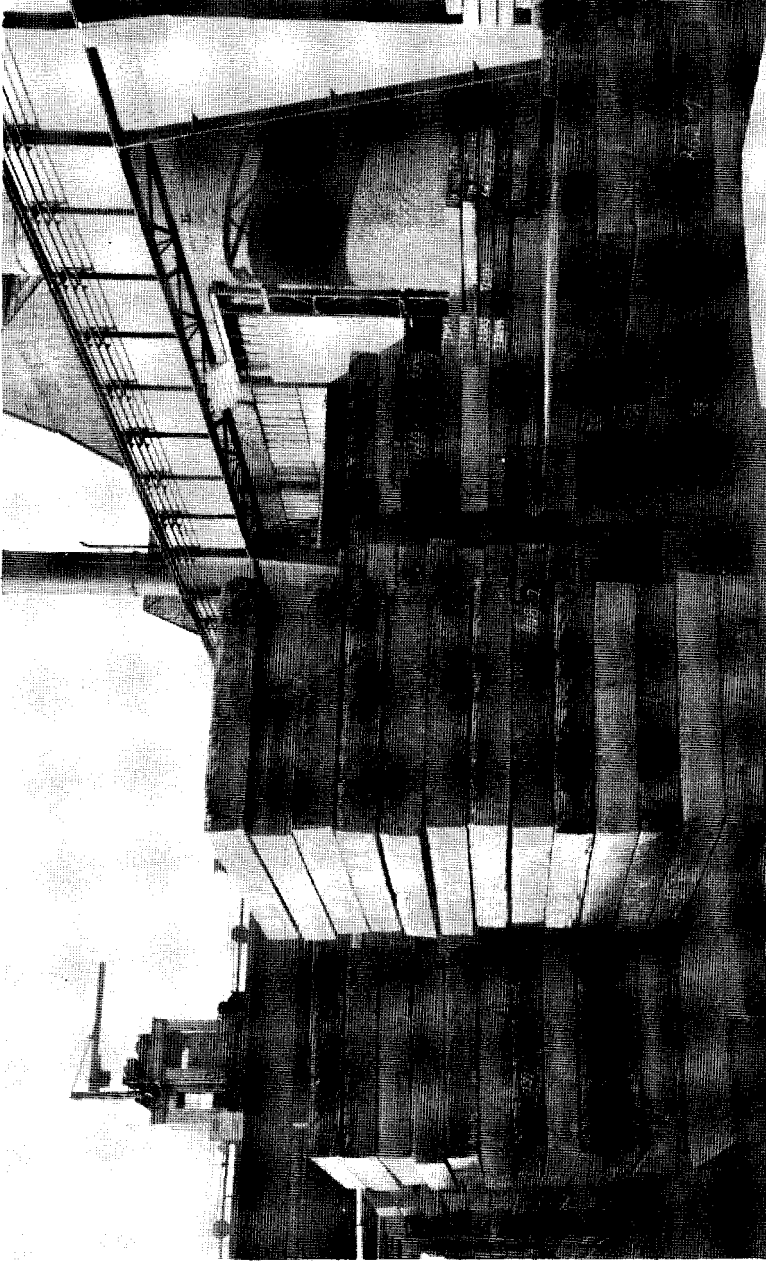


Figure 140 : Entreposage des demi-produits.

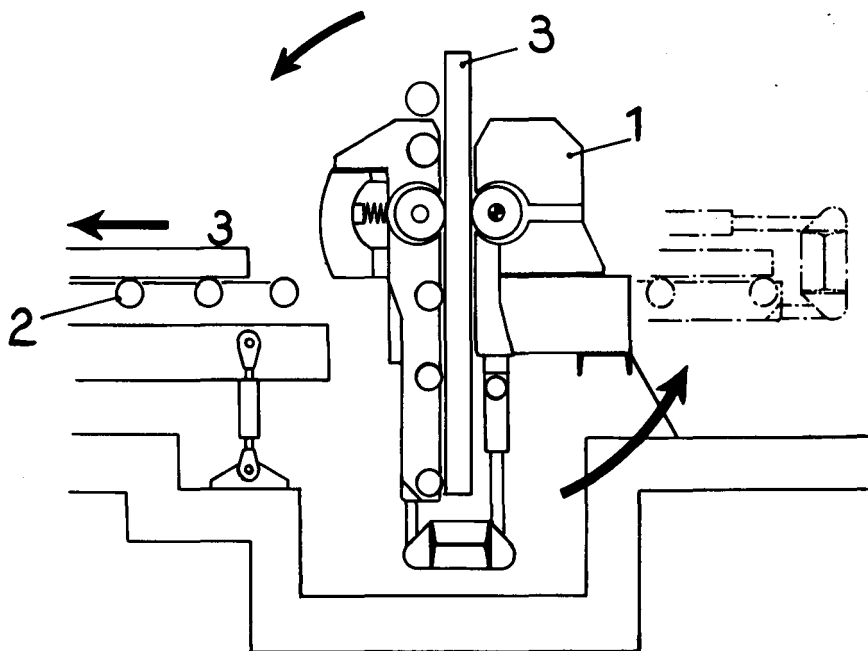


Figure 141 : Installation verticale de coulée continue, évacuation des demi-produits.

4.6.4. La coulée

Avant la coulée proprement dite, l'installation de coulée continue doit être préparée pour l'opération. Le revêtement réfractaire du panier intermédiaire est préalablement chauffé à une température d'un peu plus de 1000 °C, à l'aide des brûleurs prévus à cet effet. On vérifie le bon fonctionnement de tous les dispositifs de l'installation. La fausse billette (figure 143) qui sert à fermer la lingotière au début de la coulée, est placée sur un mandrin suffisamment long; introduite par en dessous dans la lingotière de cuivre, à l'aide des rouleaux extracteurs ou à l'aide d'un treuil. Dans la lingotière, on bouche ensuite l'espace libre entre la fausse billette et les parois de la lingotière, par exemple avec un cordon d'amiante.

La poche de coulée remplie d'acier liquide est amenée à l'aide d'un pont ou d'un monte-charge au-dessus de la cuve intermédiaire, puis, en levant la quenouille ou en faisant basculer la poche, lorsqu'il s'agit de poches

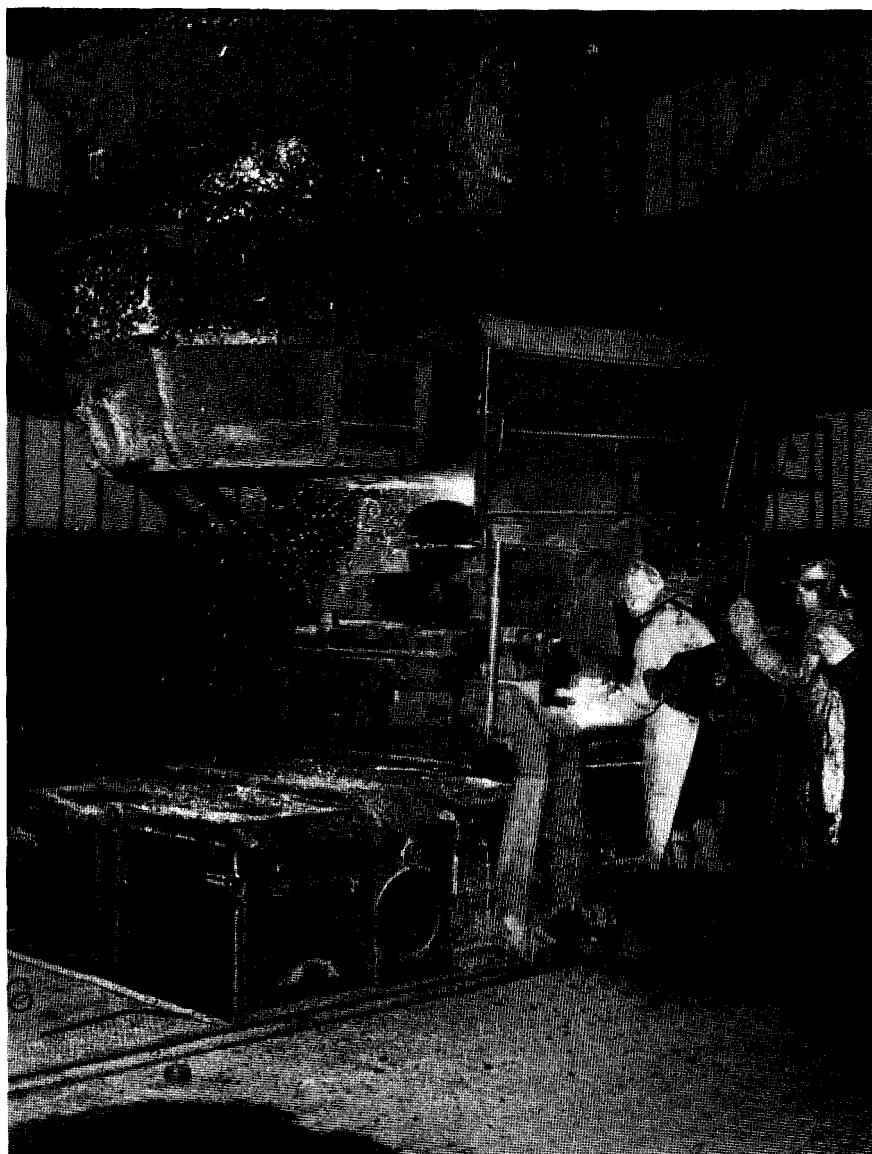


Figure 142 : Poste de mesure et de commande d'une installation de coulée continue.

théières, le couleux laisse l'acier se déverser dans la cuve intermédiaire. Simultanément les robinets d'eau froide alimentant la lingotière sont ouverts. Dès que la cuve intermédiaire est presque remplie, la quenouille qui en ferme le fond est levée. Pour pouvoir contrôler le bon fonctionnement de la quenouille, on peut, tout d'abord, laisser l'acier s'écouler dans une rigole spéciale dans la cuve de secours prévue en cas d'incident (voir *figure 131*). C'est seulement lorsque le jet d'acier liquide coule normalement que la rigole est enlevée, ce qui permet au métal de s'écouler librement dans la lingotière refroidie à l'eau. On met alors en marche le dispositif de va-et-vient de la lingotière, puis, progressivement, les pulvérisateurs de la ligne de refroidissement et les rouleaux moteurs. Le débit d'acier liquide dans la lingotière est réglé par relèvement ou abaissement de la quenouille du panier, de telle sorte que le niveau de l'acier liquide soit, pendant toute l'opération, à quelques centimètres en dessous du bord supérieur de la lingotière. Lorsque la barre ainsi coulée et encore chaude, a été saisie par les rouleaux extracteurs, la fausse billette est remplacée par la barre chaude et évacuée par le bas. La barre chaude descend, est saisie par le dispositif de cintrage et mise à l'horizontale; elle traverse ensuite la dresseuse avant de passer dans la tronçonneuse où elle est découpée à la longueur voulue, puis entreposée. L'acier brut, s'écoulant de la poche à la fin de l'opération et chargé, la plupart du temps, de scorie, est dirigé par la rigole vers la cuve de secours. En même temps, la descente de la barre qui vient d'être coulée est interrompue jusqu'à ce que l'acier versé en dernier lieu dans la lingotière se soit solidifié en surface. Alors seulement la coulée tout entière est évacuée. On peut accélérer la solidification de la tête de coulée par pulvérisation d'eau.

4.6.5. Défauts de coulée

L'état de la surface de la barre coulée et les conditions de solidification à l'intérieur de celle-ci dépendent aussi de l'élaboration correcte de l'acier au convertisseur, au four Martin ou au four électrique. Un élément d'importance particulière est la température de l'acier au moment de la coulée. Elle doit être réglée selon les nuances d'acier. Si la température de la coulée est trop élevée, il peut se produire des ruptures de la surface à peine solidifiée, laissant passer l'acier liquide à l'extérieur. Un autre élément non moins important est le réglage précis de la vitesse de solidification interne.

Les principaux défauts de coulée sont les retassures et les parties poreuses au cœur de la billette, les fissures, soudures froides et soufflures de peau, ainsi que les ségrégations et les recarburations.

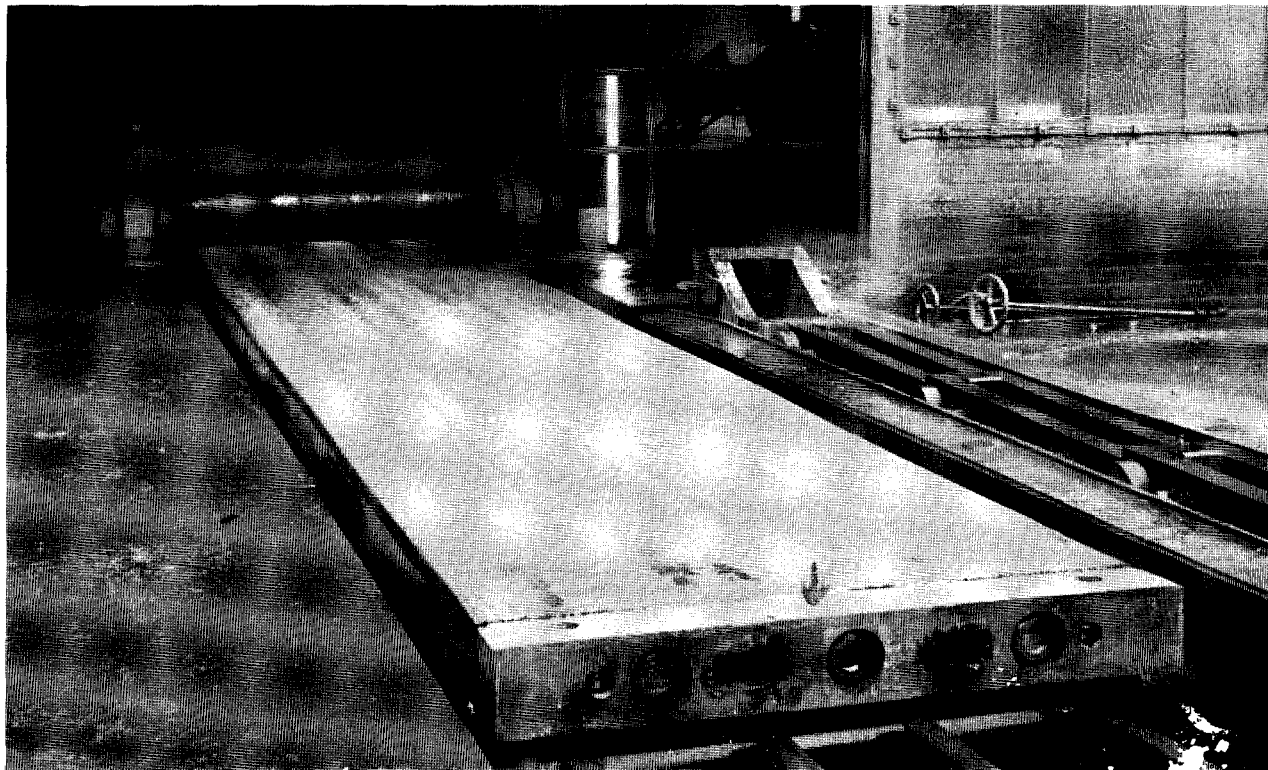


Figure 143 : Fausse billette.

Dans la plupart des cas, les retassures et parties poreuses au cœur de la billette n'entraînent pas des déchets dans les produits laminés. En règle générale, la surface de ces cavités dans le produit n'a pas été en contact avec l'air; elle ne s'oxyde donc pas et peut se souder dans de bonnes conditions au laminage.

Les fissures ont des conséquences beaucoup plus désagréables. Les fissures longitudinales dans le métal sont causées par une trop grande vitesse de coulée ou, par exemple, par un défaut de forme à l'intérieur de la lingotière. Les fissures dites de contraction se produisent lorsque le refroidissement de la billette, à l'intérieur et à l'extérieur de la lingotière, est trop fort ou lorsque, par exemple, l'intensité du refroidissement varie constamment, c'est-à-dire lorsque le refroidissement est mal réglé. Les fissures par déformation, appelées aussi fissures par écrasement se produisent lorsqu'une pression trop forte est exercée à la surface de la billette, par les rouleaux moteurs par exemple, avant que la billette ne soit solidifiée à cœur.

Les gouttes froides se produisent lorsque la coulée s'opère trop lentement ou que la température de coulée est trop basse.

Les soufflures de peau ou les flocons sont dus, le plus souvent, à des défauts dans l'élaboration et la désoxydation de l'acier. Mais ils peuvent aussi être provoqués par des parois de lingotière humides, par emploi d'huile hydratée pour enduire la lingotière ou par une lubrification trop abondante de celle-ci.

Les ségrégations sont des concentrations locales en impuretés de l'acier qui ne peuvent être entièrement évitées, en forte section surtout, lorsqu'il s'agit d'acier coulé effervescent.

Les recarburations à la surface du métal coulé peuvent être provoquées par exemple, par l'huile dont on se sert pour enduire les lingotières.

4.6.6. Possibilités de recours à la coulée continue

Le procédé de la coulée continue permet pratiquement de couler toutes les nuances d'aciers. Toutefois, en raison du phénomène de bouillonnement (formation d'oxyde de carbone dans l'acier) lors de la solidification de l'acier effervescent, il est beaucoup plus difficile de couler avec ce procédé les aciers effervescents que les aciers calmés ou semi-calmés, en particulier si la barre de demi-produits à couler est de petite section.

En ce qui concerne la quantité d'acier à couler à partir d'une seule poche, la coulée continue impose encore certaines limites, contrairement à ce qui se passe pour la coulée de lingots carrés ou méplats en lingotières. En raison des pertes thermiques, inévitables malgré toutes les précautions,

subies par l'acier liquide pendant la coulée, la durée totale d'une coulée ne devrait pas dépasser 60 à 90 minutes au maximum. C'est pourquoi, pour la coulée continue de demi-produits de petites sections, on construit aussi des installations permettant de couler sur plusieurs lignes à la fois afin de diminuer la durée totale de la coulée.

On peut couler par exemple, comme demi-produits : des billettes de 50×50 mm jusqu'aux blooms de 250×250 et aux brames de 180×800 mm à $250 \times 2\,000$ mm de section. Pour les billettes de petites dimensions (moins de 80 mm de côté), la coulée est assez difficile à contrôler et le procédé de coulée continue perd de sa rentabilité.

On essaye aussi de fabriquer des demi-produits de section ronde ou ovale, mais toutes les nuances d'acier ne s'y prêtent pas également bien. Ces formes ne permettent pas de maîtriser le processus de solidification aussi bien que dans les sections carrées et rectangulaires. C'est pourquoi, avec les barres de section ronde, il se produit facilement et davantage de défauts de coulée que, par exemple, pour les billettes carrées. Ce phénomène s'explique par le mauvais contact de la lingotière et de la surface de la barre. Celle-ci, au cours du retrait de solidification, n'est plus en contact que suivant une ou deux génératrices.

On est donc assez libre dans le choix des dimensions de la section du demi-produit à couler, mais on ne devrait pas, dans une même installation de coulée continue, couler une trop grande variété de demi-produits de sections différentes. Le changement des lingotières et le réglage des autres dispositifs d'une installation de coulée continue pour la dimension souhaitée du demi-produit exige du temps et du travail.

4.6 7. Avantages de la coulée continue

Les avantages de la coulée continue par rapport au procédé ordinaire de fabrication de demi-produits par la coulée de lingots carrés ou méplats et le laminage de ceux-ci sur des trains dégrossisseurs, bloomings ou slabbing, et sur des trains à demi-produits, sont importants.

Le nombre des opérations nécessaires à la fabrication de demi-produits est considérablement réduit (voir *figure 125*). Par là même, la surface nécessaire à l'installation de coulée continue n'est que la moitié de celle qu'exigent les installations du procédé normal et les dépenses entraînées par la construction d'une installation de coulée continue sont également moindres que celles qu'il faut engager pour construire une halle de coulée, avec tous les équipements qu'elle comporte, ainsi qu'un blooming complété

le cas échéant, par un train à demi-produits. La diminution du nombre des opérations permet aussi de réduire les dépenses de transformation. Par exemple, on économise le coût élevé des lingotières et les frais occasionnés, avec le procédé ordinaire, par les nombreux transports nécessaires.

Le rendement en demi-produits de bonne qualité est de 10 à 15 % plus élevé qu'avec le procédé ordinaire (voir *figure 125*). Lorsque la coulée s'effectue correctement, il atteint 92 à 98 % de la quantité d'acier déversée dans la poche de coulée.

Il n'est donc pas surprenant que le procédé de coulée continue se répande de plus en plus dans les usines sidérurgiques.

4.7. NOUVEAUX PROCÉDÉS DE MESURE POUR LE CONTRÔLE ET L'OPTIMISATION DE LA COULÉE DES LINGOTS CARRÉS ET DES LINGOTS MÉPLATS

La façon dont on réalise la coulée d'une poche d'acier liquide en lingots carrés ou en lingots méplats influence d'une façon tout à fait déterminante les propriétés internes et externes des lingots. Avec une coulée irréprochable, les lingots sont, dans une large mesure, exempts de défauts internes et externes, pour autant que ces défauts soient imputables à la coulée elle-même. Au nombre des défauts de cet ordre, on compte les retassures, les soufflures, les écailles, les pailles, les gerçures.

L'ouvrier qui manœuvre le dispositif de fermeture des poches de coulée, n'a pratiquement que deux possibilités d'influer sur la coulée. Il peut couler avec la busette de coulée complètement ouverte ou bien réduire le jet par fermeture partielle de la busette. En d'autres termes, il peut régler dans certaines limites la vitesse de coulée. Il ne sera pas question ici d'autres possibilités comme, par exemple, l'addition de petites quantités de désoxydants et d'alliages ou l'emploi de plaques de lingotières, poudres de coulée, chapes exothermiques et isolantes, etc., ces méthodes étant présumées connues.

La vitesse de coulée la mieux appropriée dépend, dans chaque cas, de la nature de l'acier à couler, de la température du bain, du mode de coulée ainsi que de la capacité des lingotières.

Avant tout, la température de l'acier et la vitesse de coulée appropriée doivent être en rapport étroit.

Un bain dont la température se trouve à la limite supérieure de la gamme thermique prescrite ou même au-dessus, doit, autant que possible, être coulé à busette réduite, c'est-à-dire à vitesse de coulée ralentie, afin que le

refroidissement plus important du jet aminci joint à la montée plus lente du niveau de l'acier dans la lingotière aient un effet compensateur sur la température initiale trop élevée.

On peut obtenir ainsi, en définitive, une solidification identique à celle obtenue avec une coulée à température normale et une vitesse quelque peu supérieure. La vitesse de coulée convenable dépend de la teneur en carbone de l'acier car celle-ci influence très fortement la température de solidification dans la lingotière. Plus la teneur en carbone est élevée, plus faible est la température de solidification. Des additions d'aluminium, par exemple, affectent le comportement de la coulée et, de ce fait, la température et la vitesse.

Le mode de coulée exerce aussi une influence. L'acier coulé en source se refroidissant plus vite en raison de son plus long trajet dans la mèche et dans les conduits de briques doit, à température égale en poche, être coulé plus vite que dans la coulée directe.

La capacité des lingotières commande également la vitesse de coulée car le refroidissement et, par conséquent, la solidification de l'acier, prend plus de temps dans les grandes lingotières que dans celles de moindre capacité. Il faut donc couler plus rapidement dans ces dernières.

Il ressort de ces considérations qu'on doit tout d'abord veiller à ce que la température du jet, lors de la coulée, ne soit ni supérieure ni inférieure au niveau fixé dans chaque cas. Il faut, autant que possible, conserver la température à 10 ou 20 °C près au maximum pendant la coulée. Cela implique que la température terminale du bain au convertisseur, au four Martin ou au four électrique, avant l'évacuation ou la coulée en poche doit, elle aussi, être comprise dans des limites préalablement fixées.

Pour déterminer si la température d'évacuation ou de coulée s'inscrit effectivement dans les limites prescrites, on effectue des mesures avec un pyromètre à couples immergé sur la plate-forme du four (cf. Volume 1, chap. 2.1.4.).

C'est pourquoi, au four Martin, on exécute avant la coulée toute une série de mesures de température, cinq et plus suivant les circonstances, à des intervalles de 10 à 15 minutes. De cette façon, le personnel du four est en mesure de régler le chauffage de façon à obtenir la température de coulée prescrite.

Au convertisseur, avec le procédé LD par exemple, on peut exécuter un ou deux repérages de température au maximum avant la coulée. Le cas échéant, on doit encore souffler brièvement pour corriger la température terminale.

Outre la correction de température, on peut aussi effectuer une correction de la teneur en carbone. Dans les aciéries à soufflage d'oxygène, ce procédé est connu sous le nom de méthode tec-tip. On entend par là la mesure de la température du bain et la détermination du pourcentage de carbone à partir de la température de solidification de l'acier.

Même si, grâce à ces modes opératoires ou par d'autres moyens (par exemple en recourant à des appareils de calcul pour établir un bilan thermique des procédés à l'oxygène pur (cf chapitre 4.2.4.), le maintien de températures se trouve facilité, il ne faut pourtant pas oublier que l'acier, jusqu'au moment de la coulée en lingotières, accuse encore une déperdition considérable de sa température. Il faut citer ici en premier lieu la perte qui se produit quand l'acier s'écoule dans la poche. En outre, la garniture réfractaire des poches, même quand elles ont été préalablement chauffées, absorbe des quantités considérables de chaleur, ce qui conduit à un refroidissement de l'acier. Enfin, la surface de la poche de coulée, surtout la surface libre, irradie de la chaleur dans le milieu ambiant.

L'intensité avec laquelle ces causes agissent sur la température atteinte finalement par l'acier lors de la coulée dépend des différentes conditions d'exploitation telles que la durée de la coulée, la dimension des poches, la durée d'attente etc.

Au cours des dernières années, dans beaucoup d'aciéries, on a fait des études sur la perte de température de l'acier, depuis la coulée du four jusqu'à la coulée en lingotières.

La *figure 144* représente un thermocouple à immersion avec une cartouche thermocouple. On l'utilise pour des mesures d'essai au jet de coulée. Lors de la coulée, le tube de quartz courbé en forme d'U de la cartouche thermocouple est introduit lentement par le pyromètreur dans le jet de coulée. Le pyromètreur peut contrôler sur un petit appareil fixé sur sa lance thermocouple le moment où la température reste constante. La mesure ne dure que quelques secondes. Les températures sont inscrites sur un appareil enregistreur également incorporé.

En exploitation courante, on n'effectue pas de mesures de ce genre. Mais elles peuvent servir, dans le cadre d'une série d'essais, à établir, sous forme de familles de courbes ou de tableaux, les conditions de refroidissement de l'acier.

Il faut préciser que la mesure de température au jet de coulée décrite ci-dessus donne les températures réelles contrairement aux pyromètres optiques (cf Volume 1, chapitre 2.1.4.), qui indiquent souvent des valeurs

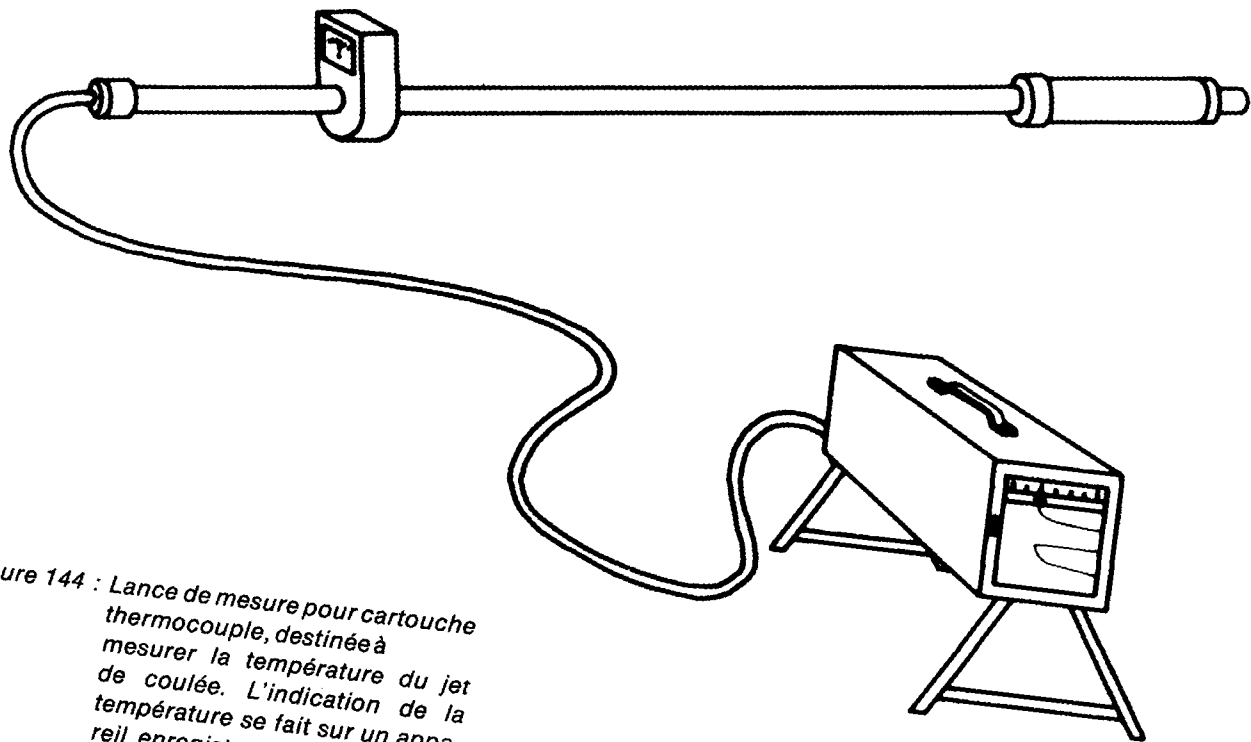


Figure 144 : Lance de mesure pour cartouche thermocouple, destinée à mesurer la température du jet de coulée. L'indication de la température se fait sur un appareil enregistreur et un petit appareil indicateur placé sur la lance.

trop basses, ce qui oblige à les convertir en températures réelles d'après des tableaux de correspondance.

Grâce aux moyens qui viennent d'être décrits, le fondeur connaît la température de l'acier qu'il est en train de couler.

Il doit alors, comme il a été dit au début, adapter autant que possible la vitesse de coulée à cette température, s'il veut obtenir les meilleures conditions de coulée suivant la qualité de l'acier et le mode de coulée.

Jusqu'à présent, le fondeur ne pouvait déterminer la vitesse de coulée que par le temps qu'il lui fallait pour remplir une certaine partie, par exemple la moitié, de la lingotière. Maintenant, avec la mise en service de bascules électriques, il dispose d'un moyen nouveau et meilleur. La vitesse de coulée instantanée est aujourd'hui indiquée directement en tonnes/minute sur beaucoup de bascules électroniques au moyen d'un cadran fixé au pont. La *figure 145* reproduit un tel cadran indicateur pour la vitesse de coulée. La bascule mesure la vitesse de coulée en déterminant la décroissance de poids de la poche par unité de temps. Le poids de la poche diminue par minute du nombre exact de tonnes qui ont été coulées dans les lingotières pendant ce temps.

La vitesse de coulée peut être également relevée ultérieurement au moyen de la courbe de poids de la coulée (Voir volume 1, figure 14).

D'autres tâches importantes incombent au personnel de la fosse de coulée: répartir au mieux l'acier dans les lingotières et souvent respecter d'aussi près que possible des poids de lingots ou de brames préalablement fixés. Ces deux problèmes sont plus aisément résolus lorsque le pont de coulée est muni d'une bascule électronique. C'est pourquoi nous décrivons ci-après, un peu plus en détail, les opérations avec une bascule électronique de pont de coulée.

Avec la plupart de ces bascules, le poids est indiqué sur un grand indicateur à chiffres lumineux à l'extérieur du pont. Un petit pupitre à touches permet au pontier d'actionner la bascule de sa cabine. Il peut également lire les poids sur un indicateur à chiffres. La *figure 146* représente un tel pupitre de service avec chiffres lumineux de 15 mm pour l'indication des poids.

Le pontier effectue le tarage de la poche vide; soit qu'il tourne un bouton de tarage jusqu'à ce que la bascule indique zéro, soit qu'il presse une touche qui commande le tarage automatiquement. La poche de coulée est alors remplie et, quand elle est pleine, la bascule indique le poids net. Il faut cependant savoir que ce poids net ne correspond pas seulement à celui de l'acier; la plupart du temps, notamment au four Martin ou au conver-

tisseur, une partie du laitier s'écoule en même temps dans la poche. En conséquence, pour des raisons de sécurité, et pour tenir compte de ce laitier, le fondeur doit retrancher une certaine proportion du poids indiqué. Il sait alors de combien d'acier il dispose dans la poche et peut alors décider comment répartir l'acier entre les différentes lingotières pour qu'il ne subsiste qu'un reliquat insignifiant. C'est-à-dire que le fondeur doit couler les lingots tantôt un peu plus lourds, tantôt un peu plus légers, s'il veut

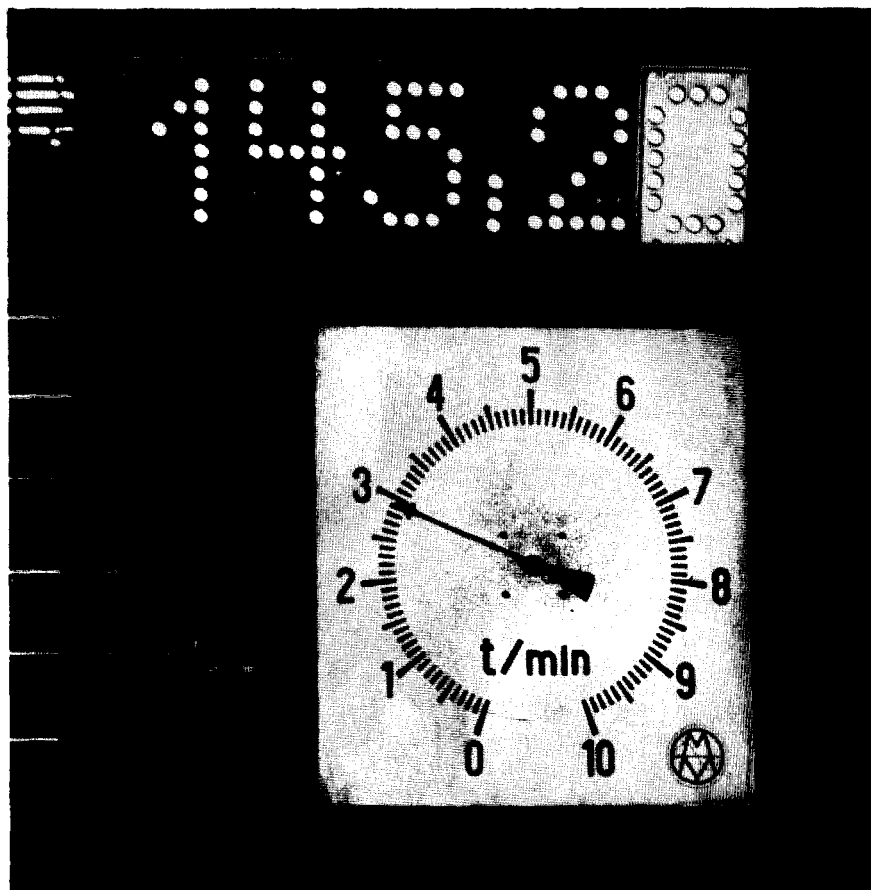


Figure 145: Cadran gradué pour la vitesse de coulée et indicateur de poids à chiffres lumineux sur une bascule électronique de coulée.

répartir aussi exactement que possible le contenu des poches. Il peut aussi être avantageux de couler en source avec un lingot de moins, afin que les autres lingotières soient aussi pleines que possible.

Ce faisant, le fondeur doit avant tout veiller à ce que le laitier qui surnage toujours sur l'acier liquide dans la poche ne pénètre pas dans les lingotières et ne contamine pas les lingots. A cet effet, il faut qu'après la dernière coulée en source ou en lingotière, il subsiste toujours un certain reliquat d'acier dans la poche. Celui-ci est coulé en un lingot dit résiduel qui est recyclé dans l'aciérie comme riblon. Antérieurement, quand il n'existait pas encore de bascules de pont, le fondeur devait évaluer, vers la fin du processus de coulée, la quantité probable d'acier restant dans la poche. En procédant ainsi il arrivait souvent que la poche se trouvait brusquement vide avant que la dernière source ou le dernier lingot soit entièrement coulés. Les lingots de la dernière source ou le dernier lingot risquaient alors d'être contaminés par le laitier et, par conséquent, rendus inutilisables. Mais, même quand tel n'est pas le cas, les lingots trop courts doivent être refondus car aux laminoirs, en général, ils ne peuvent pas être transformés au-dessous d'une longueur déterminée. Avec les bascules de pont, la coulée de lingots trop courts ou la contamination des lingots par le laitier peut être évitée dans une large mesure.

Il existe même de petits appareils de calcul (cf Volume I, chapitre 2.2.4.) pour la fosse de coulée, qui permettent au fondeur de déterminer les dimensions et le nombre de lingotières nécessaires pour la coulée, à partir de la quantité d'acier dont il dispose.

La plupart des bascules de pont indiquent le contenu des poches de 50 en 50 ou de 100 en 100 kg. Mais le plus souvent, la quantité d'acier en poche n'est pas connue avec autant de précision: seulement à quelques centaines de kilos près. Cela tient à l'ignorance de la quantité exacte de laitier, mais aussi au fait que le poids du garnissage de la poche varie d'une coulée à l'autre.

Des dépôts dans la poche, appelés «fonds de poches», qui se forment quand l'acier est trop froid, faussent également les indications fournies par la bascule électronique. Cependant, cette erreur éventuelle joue rarement un grand rôle dans la répartition convenable du contenu de la poche.

Quand le pont de coulée prend des poches remplies, il se présente une difficulté, puisque le poids de la poche vide n'est pas connu. Par contre, quand on a la possibilité de suspendre les poches vides au pont de coulée avant le remplissage d'acier, le tarage est possible, et le poids est relevé automatiquement dans une «mémoire de tares». Celle-ci retient le poids



Figure 146 :
Pupitre
de manœuvre
d'une bascule
électronique
de pont
dans la cabine
du pontier.

et le numéro de poche introduit manuellement, jusqu'à ce qu'on ait coulé cette poche.

Il existe aussi des cas dans lesquels on n'a pas l'occasion de suspendre la poche vide avant remplissage. Le pontier doit alors relever le poids de la poche vide aussitôt après la coulée et en prendre note, ainsi que du numéro de la poche. Lorsque, au bout de quelque temps, la poche est reprise par le pont et de nouveau remplie, il doit enregistrer manuellement la tare sur la bascule au moyen d'un clavier spécial ou d'un bouton de réglage. On peut aussi relever le poids sur une autre bascule et le communiquer au préposé. C'est pour cette raison qu'on équipe aujourd'hui de balances électroniques de nombreux ponts transporteurs qui ne manutentionnent que des poches vides.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le fondeur doit souvent couler des lingots ou des brames de poids exactement déterminés par le service de la mise en fabrication. Pour faciliter le travail du fondeur, de nombreuses balances électroniques modernes sont équipées d'un système qui fait apparaître, au choix, sur l'indicateur à chiffres lumineux, aussi bien la quantité d'acier existante dans la poche que la quantité coulée. Ce processus, simple en soi, est précisé par la *figure 147*.

Supposons que la poche contienne 100 t d'acier avec un peu de laitier. Ce poids apparaîtra sur le grand cadran à chiffres lumineux du pont si le pontier a actionné la touche «contenu de la poche». Lorsque la poche de coulée est amenée au-dessus de la lingotière, le pontier, avant le début de la coulée, actionne la touche «poids coulé», souvent appelée aussi «poids du lingot». Le poids de 100 t, c'est-à-dire le contenu de la poche, est alors emmagasiné dans la bascule avant le début de la coulée. A partir de ce moment, le dispositif de calcul de la balance électronique retranche chaque fois le poids subsistant dans la poche. Au début on a donc 0 t; ensuite, lors de la coulée, la différence entre le poids emmagasiné et le contenu momentané de la poche, correspond exactement au poids coulé jusqu'à cet instant. Ce poids est constamment indiqué sur le grand cadran à chiffres lumineux, ce qui permet au fondeur de suivre le poids du lingot qu'il est en train de couler. Avec la balance, il peut donc respecter sensiblement mieux un poids de lingot prescrit, alors qu'autrefois il était obligé de se servir de repères sur la paroi intérieure de la lingotière.

Mais, bien entendu, ce procédé n'est pas d'une précision absolue car les lingotières, en raison des inévitables irrégularités des moules, présentent des différences de volume, et peuvent être également plus ou moins évidées lors des réparations.

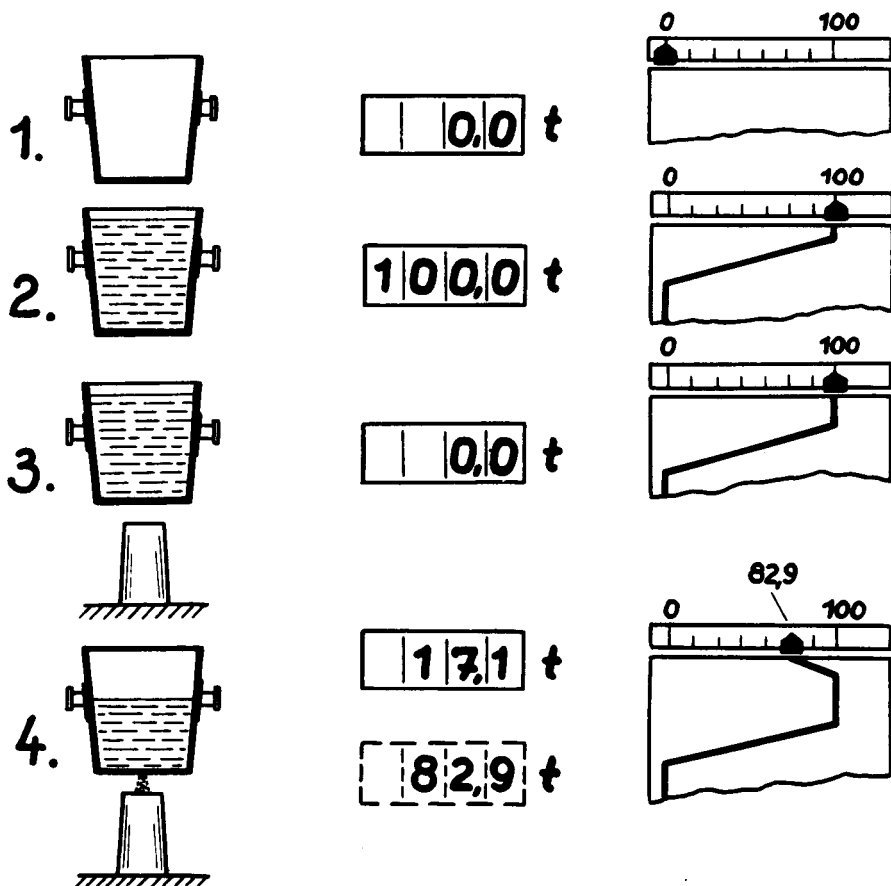


Figure 147 : Schéma de l'indicateur de poids «Contenu de la poche» et «poids coulé».

1 = Tarage de la poche vide – 2 = Indication numérique et enregistrement du poids net de 100 t de la poche pleine – 3 = Mise en action de la touche «poids coulé» avant le début de la coulée. Indication numérique 0 t, enregistrement du contenu de la poche de 100 t – 4 = Indication numérique du poids coulé de 17,1 t. Enregistrement du contenu momentané de la poche, soit 82,9 t. L'indication 17,1 est obtenue par la calculatrice de la bascule électronique, par la différence $100\text{ t} - 82,9\text{ t}$. L'indication numérique peut aussi indiquer pendant la coulée le contenu momentané de la poche, soit 82,9 t, après commutation.

Or, il arrive souvent que l'on veuille couler de petits lingots dont le poids doit être strictement respecté; la bascule du pont de coulée doit alors être graduée par unité inférieure à 100 kg. C'est pourquoi, dans beaucoup de cas, les balances électroniques sont équipées d'un second champ de mesure plus petit qui ne sert que pour la lecture du poids des lingots. Quand, par exemple, le «grand» champ de mesure couvre de 0 à 200 t, le second champ ne couvre que de 0 à 20 t. La déviation minimale de l'aiguille serait alors de 100 kg dans le grand champ de mesure, et seulement de 20 ou 50 kg dans le petit. Le petit champ de mesure de la bascule peut être mis en circuit quel que soit le contenu de la poche. Cependant, on ne peut avec lui suivre sans interruption qu'une coulée de 20 t. Il faut alors le ramener à zéro, après quoi on peut couler 20 autres tonnes.

Il faut encore indiquer que l'incertitude sur le contenu de la poche, due à la présence de laitier, disparaît lorsque la bascule indique le poids des lingots. Cela est facile à concevoir, puisque la bascule, lorsqu'on coule 5 t d'acier indique ces 5 t exactement, quelle que soit la quantité de laitier qui surnage encore dans la poche.

A propos de la précision des balances des ponts de coulée, on peut dire que le poids d'acier dans la poche peut être indiqué avec une exactitude supérieure à 0,5 % du maximum de pesée de la bascule. Avec une possibilité de 100 t, cela donne environ 500 kg. Par contre, le poids du lingot se lit à 100-200 kg près.

La précision relativement plus grande dans le pesage de la quantité d'acier coulé provient de ce qu'il s'agit ici d'une pesée différentielle sur une période de temps plus courte. Les erreurs portant sur une longue durée comme, par exemple, un lent décalage du point zéro de la bascule résultant de fortes variations de température aux boîtes dynamométriques, ne se font pas sentir pendant le temps de la coulée d'un lingot ou d'une source.

L'emploi des procédés thermiques modernes brièvement décrits qui permettent de maintenir exactement les températures de coulée en poche et en lingotières, ainsi que l'incorporation de balances aux ponts de coulée, ont contribué non seulement à éviter des erreurs de coulée, mais ont également rendu possible une amélioration de la production des lingots en éliminant le risque d'avoir des lingots coulés trop courts ou contaminés par le laitier.

Titres et chapitres principaux des volumes 1, 2 et 4

Volume 1

2. La technique de mesure et de l'automatisation dans les usines sidérurgiques

2.1. Mesures

2.2. Représentation des résultats de mesure

2.3. Régulation

2.4. Commande programmée

2.5. Télétransmission des résultats de mesure et des informations

2.6. Sécurité de fonctionnement, fiabilité, entretien et exploitation des installations de mesure et d'automatisation

Volume 2

3. Mécanisation, automatisation et technique de mesure dans l'exploitation des hauts fourneaux

3.1. Dosage et chargement

3.2. Surveillance de l'usure de la maçonnerie du haut fourneau au moyen des isotopes radioactifs

3.3. Les réchauffeurs de vent (cowpers)

- 3.4. Alimentation du haut fourneau en vent chaud
- 3.5. Analyse continue du gaz de gueulard
- 3.6. Analyse de la fonte et du laitier
- 3.7. Cabines centres de contrôle et de commande
- 3.8. Automatisation de la marche du haut fourneau ou automatisation de l'élaboration de la fonte.

Volume 4

5. Nouvelles techniques dans les laminoirs

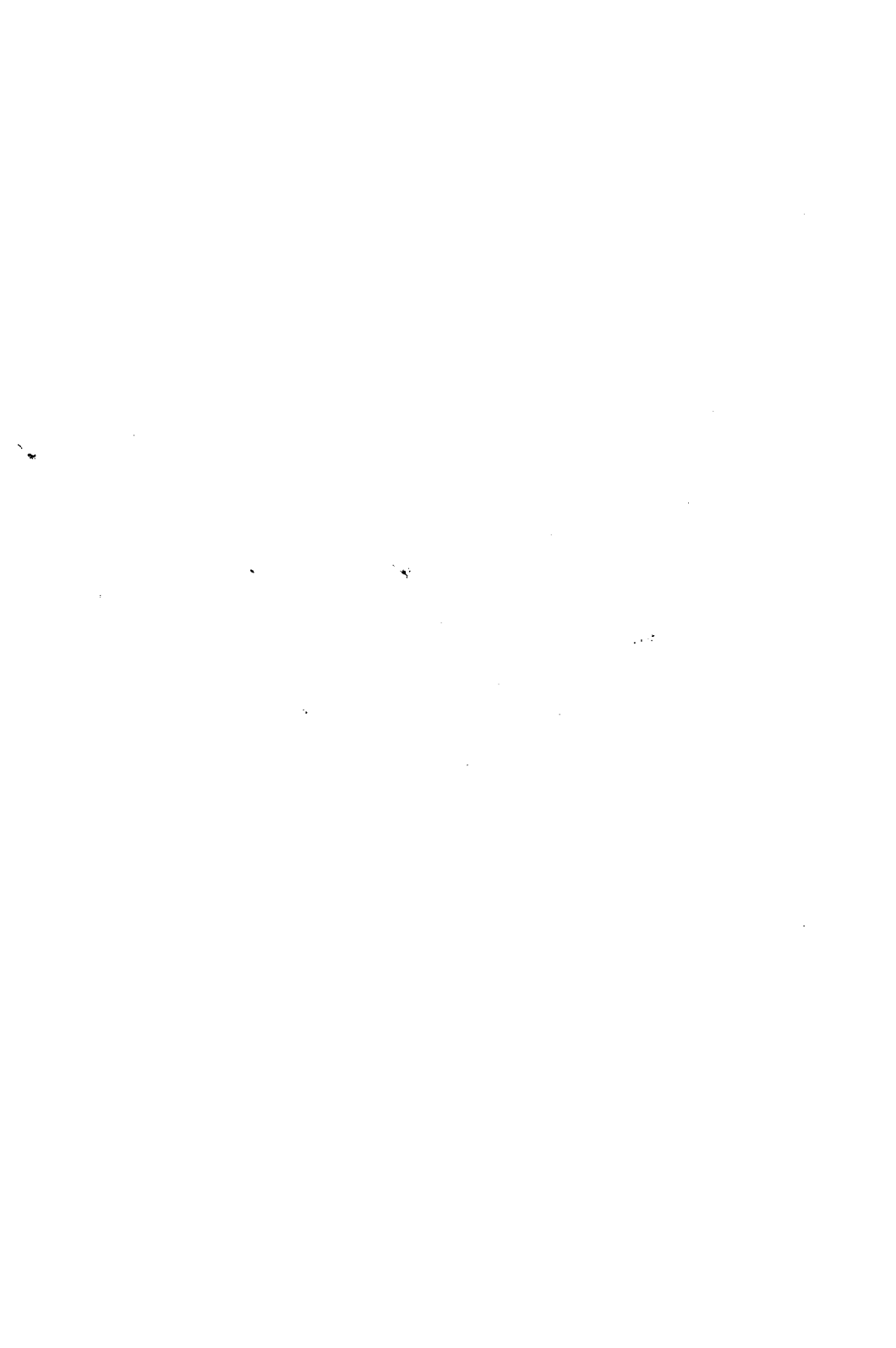
- 5.1. Fours à réchauffer
- 5.2. Trains de laminoirs
- 5.3. Installations de parachèvement
- 5.4. Le procédé à la presse à filer

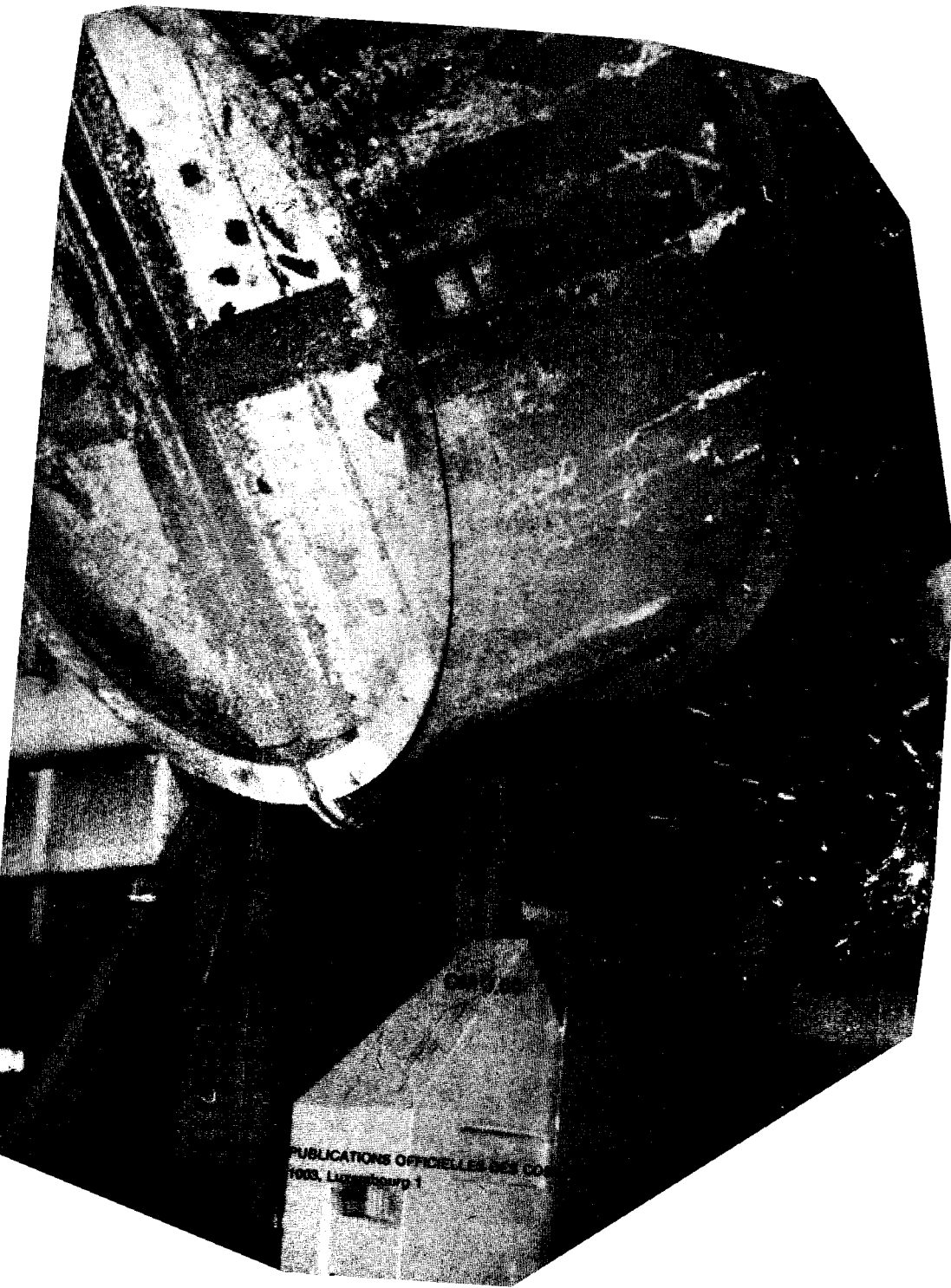
Sources des photographies, dessins, diagrammes et tableaux

	Figure n°
Amelung, E., Dortmund: Projet personnel	66-68, 70
Bartu, F., Schwegel, I., Renner, M.: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 108 (1963), p. 204	71
Beth-Handbuch	89
Berg- u. Hüttenmännische Monatshefte 104 (1959), n° 2, p. 37	95
Borowski, K. : Intervention dans la discussion, Congrès international sur les aciéries à l'oxygène, Le Tou- quet 23/25 sept. 1963, Dunkerque, 26 sept. 1963	40
CEAC: Publication 8114	96
Concast AG, Zürich u. Schloemann AG, Düsseldorf : Werbeschrift 2/60-3000-W9/31; 11.61 - DCS 1250	125, 127, 141
Daub, H. : 0.0.1960 – Aachen TH Dr. Ing. Diss.	35
Dehne, W. u. Müller, H.G. : Stahl u. Eisen 82 (1962), p. 764	93
Deutsches Museum München, service photographique	1
Dillinger Hüttenwerke AG : Photo de l'usine.	134-140, 142, 143
Dolomitwerke, Wülfrath : Photos ou dessins de l'usine	43-50
Engel, A. u. Hartmann, W., Dortmund : Projet personnel	8
Fachtagung Industrieentstaubung 1964, p. 42	94

Gesellschaft für Linde's Eismaschinen AG Höllriegelskreuth : Photo de l'usine	3
Grünberg, K., Schleicher, W., Kunz. R. : Stahl u. Eisen 80 (1960) p. 277 à 281	29-33
Hoesch AG Hüttenwerke, Dortmund : Photos ou dessins d'usine	65, 73, 76, 78-80, 92, 97-117, 121-123, 146
Hoffmann, G.W., Dortmund/Salzgitter : Projet ou calcul personnel	83, 85-88, 90, 96
Ilseeder Hütte, Peine : Photo d'usine	24, 51-60
Japanisches Stahlwerk : Photo de l'usine	13
Knackstedt, E., Krabiell H.I. : Stahl u. Eisen 80 (1960) p. 1492	69
Kocks GmbH, Düsseldorf : Photo de l'usine	118-120
Krainer, H., Borowski, K., Maatsch. I. : Techn. Mitt. Krupp, Werksberichte, Volume 23, 1965, H. 2	37-38
Krupp, Friedr. Industriebau Essen : Photos ou dessins de l'usine	9-12, 14-18, 20, 21, 23, 26, 41, 42, 61-64
Maßmetallurgie GmbH, Wetter/Ruhr : Photo de l'usine	145
Mayer, K.E , Dortmund : Projet personnel	2
Mühlrad, W. : Staub, Volume 23 (1963) p. 535/43	81, 82
Petz. M., Ternitz, N.-O. : Berg- u. Hüttenmännische Monatshefte 107 (1962), p. 159 à 170	128, 132
Plöckinger, E., Wahlster, M., Borowski, K., Maatsch, I. , Schildkötter, A., Schiel, V. : Stahl u. Eisen (1960), p. 1477 à 1486	25, 36, 39
Rösner, K., Wegscheider, A. Stahl u. Eisen 76 (1956) S. 1337 à 1343	84
Schleicher, W., Lutz, H., Graf, H. : Techn. Mitt. Krupp. Forsch. Ber. 21 (1963) p. 139 à 146	27, 28

Schmidt, F., Eisenwerk Breitenfeld : Berg- u. Hüttenmännische Monatshefte 107 (1962), p. 177	130
Semrau, K. : Staub, volume 22, p. 185.	84
Signora, M. u. Cardano R. : Berg- u. Hüttenmännische Monatshefte 107 (1962), p. 154 et 155	129, 133
Speith, KG, u. Bungereoth, A. Stahl u. Eisen 76 (1956), p. 440	131
Staub 19 (1959) n° 8, p. 293.	77
Wendt, H. : Techn. Mitt. Krupp, Ber. 23 (1965) n° 3, p. 97 et 106	12,22
Wiethoff, G., Dortmund : Projet personnel	144, 147
Wucherer, I. : Linde-Fränkel-Anlagen, 50 Jahre Linde-Sauerstoff-Anlage, p. 18.	4- 7
Zimmer, K.O. : Radex Rundschau 1965, p. 372 et 373	72, 74, 75





PUBLICATIONS OFFICIELLES DES COM
1903, Luxembourg 1