

COMPARAISON TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE FOURS UTILISES
DANS LA FABRICATION DU FERRO-SILICIUM, DU FERRO ET SILICO-MANGANESE

par H. Bromet* (présenté par M. Bromet)

RESUME

Technique :

Nous avons défini les différents types de fours utilisés : four ouvert, four fermé, four semi-fermé.

Nous avons présenté de façon plus détaillée :

- 1) le four fermé avec sa récupération de gaz à forte teneur en oxyde de carbone et attiré l'attention sur deux points importants :
 - . la nécessité d'un traitement des eaux de lavage qui contiennent des cyanures dans l'épuration par voie humide.
 - . les précautions à prendre avec les gaz à base d'oxyde de carbone.
- 2) Le four semi-fermé avec sa chaudière de récupération d'énergie.

Nous avons indiqué pour le four semi-fermé de Dunkerque Gravelines les concepts qui nous ont guidés dans le choix de la hotte du four puis de la chaudière.

Economique :

Nous avons chiffré la chaleur disponible à la surface du four :

- . pour un four fermé à ferro-manganèse
- . pour un four fermé et semi-fermé à ferro-silicium.

Dans le cas d'un four semi-fermé de 50 MW produisant du ferro-silicium, nous avons donné le prix de l'installation de récupération de la chaleur perdue avec production d'énergie : chaudière et turbo-alternateur et indiqué les conditions d'amortissement d'un tel ensemble.

Conclusion :

Enfin dans l'évolution prévisible des fours pour de nouvelles installations, sans préjuger de choix dicté

* Compagnie Universelle d'Acétylène et d'Electro-métallurgie (CUAEM), France

par les conditions propres à chaque producteur, nous avons rappelé que le four semi-fermé avec ou sans cuve divisée assure à l'heure actuelle le meilleur pourcentage de récupération d'énergie et peut être utilisé dans les différents types de fabrication du ferro-manganèse au silicium-métal sans danger propre d'exploitation.

La fabrication des ferro-alliages aux fours électriques à arcs immergés utilise trois types différents que nous classons dans l'ordre de leur apparition dans cette industrie.

- 1) Le four ouvert
- 2) Le four fermé
- 3) Le four semi-fermé.

1) Le four ouvert :

La surface de chargement du four est entièrement découverte et en contact avec l'air.

Le volume d'air introduit pour la combustion des gaz provenant des réactions dans le four et leur refroidissement n'est limité que par le débit des cheminées d'aspiration.

Il est en général de l'ordre de 12 fois le volume obtenu par la combustion sans excès d'air.

2) Le four fermé :

La cuve du four est fermée par un couvercle étanche.

Une légère surpression est maintenue à l'intérieur du four.

Les gaz provenant des réactions dans le four ne sont pas brûlés.

Leur volume est environ le tiers de celui qui serait obtenu par la combustion sans excès d'air.

3) Le four semi-fermé :

Dans ce four les gaz sont brûlés à la surface du four mais avec un excès d'air limité.

En général, pour différentes raisons techniques, le volume des gaz après combustion est réglé à 3 fois le volume obtenu par une combustion sans excès d'air.

Nous avons donc pour les volumes des gaz sortant du four l'échelle suivante :

Four fermé	0,3	
Four semi-fermé	3	soit 10 fois plus
Four ouvert	12	soit 40 fois plus

Rapportés à la puissance en Kilowatts :

Nous avons pour un four d'une puissance de 30.000 KW le volume de gaz ci-après :

Four fermé 9.000 m3/H
Four semi-fermé 90.000 m3/H
Four ouvert 360.000 m3/H.

Il est bien évident que les chiffres donnés ci-dessus n'ont pas une valeur absolue, mais ils traduisent la différence de volume gazeux dans les trois types de fours.

Les gaz sortant de ces fours sont évidemment de nature et température différentes.

1) Four fermé :

Suivant les produits, la teneur en CO pourra varier de 90 % pour le carbure de calcium à 40 % pour la ferro-manganèse et la température sous le couvercle de 300 à 800°.

2) Four ouvert :

Il s'agit de gaz brûlés. Suivant l'excès d'air, la température sera de 150° à 200° dans la cheminée.

3) Four semi-fermé :

La température des gaz brûlés sera de l'ordre de 850 à 900° à l'entrée de la chaudière.

Le dépoussiérage de ces gaz mettra en jeu des procédés différents :

1) Four fermé :

Dans le four fermé, nous avons à faire à des dépoussiérages humides.

A notre connaissance, les dépoussiérages à sec actuellement à l'étude n'ont pas à ce jour de réalisations industrielles sur les fours à ferro-alliages.

2) Four ouvert :

Dépoussiérage par manche filtrante en nomex ou produit analogue du fait de la température relativement basse.

3) Four semi-fermé :

Il est indispensable d'introduire entre les gaz et le filtre à manches un dispositif de refroidissement.

Deux solutions étaient possibles :

Quand le prix de l'énergie était relativement bon marché on pouvait envisager l'interposition entre le four et le filtre d'un simple système de refroidissement (type tubes en U).

Nous considérons que cette solution n'est plus valable maintenant.

A l'heure actuelle, il faut placer, entre le four et les filtres, la chaudière qui, en refroidissant les gaz, produit de la vapeur.

Au point de vue aspect sur la plateforme de chargement :

Le four ouvert malgré des rideaux de chaînes entraîne sur la plateforme de chargement une température élevée et un rayonnement pénible.

Le four fermé est absolument froid.

Le four semi-fermé avec ses panneaux baissés se rapproche du four fermé.

TABEAU DE COMPARAISON ENTRE LES TROIS TYPES DE FOURS

	Atmosphère du plancher de charge- ment	Volume des gaz	Type de dépous- siérage	Volume des filtres	Prix	Puissance absorbée	Produits recueillis
Four ouvert	Chaude	12	A sec	4	4	4	Poussières granulées inertes
Four semi- fermé	Froide	3	A sec	1	1	1	Poussières granulées inertes
Four fermé	Froide	0,3	Humide	-	0,8	1/3	Boues avec traces de cyanure

Le four ouvert du fait :

- . des conditions pénibles de travail
- . de l'importance et du prix de l'ensemble de filtration des gaz après combustion
- . de la puissance absorbée par la filtration
- . et, enfin, de la perte complète de l'énergie dégagée à la surface du four

verra son développement disparaître.

Il restera deux types de fours :

- . le four fermé avec utilisation du CO recueilli.
- . le four semi-fermé avec une chaudière de récupération d'énergie.

LE FOUR SEMI-FERME AVEC :

- SA CHAUDIERE DE RECUPERATION D'ENERGIE
 - SON GROUPE TURBO-ALTERNATEUR
-

Sa technique de construction bénéficie de toutes les améliorations apportées au four ouvert :

- . Alimentation électrique par trois transformateurs monophasés à changement de tension en charge, disposés à 120° situés très près des électrodes.
- . Sortie des transformateurs en tubes cuivre à circulation d'eau disposés verticalement sur la face côté four du transformateur.
- . Pas de faisceaux en barres cuivre ou aluminium, mais simplement des câbles cuivre noyés dans un tuyau souple parcourus par l'eau.
- . Alimentation en mélanges par goulottes débouchant sous le plafond de la hotte de préférence 12 (4 par électrode).
- . Course importante des électrodes permettant pour l'entretien de monter au-dessus du plafond de la hotte l'ensemble du dispositif d'amenée de courant aux électrodes.

Ses caractéristiques propres :

La hotte du four sera prolongée jusqu'au niveau du plancher de chargement par des panneaux pleins. Ceux-ci seront mobiles pour permettre l'intervention de la machine à piquer.

Cette fermeture de la hotte va modifier les conditions de marche.

Le contrôle de l'air qui rentre dans le four et la diminution du volume aspiré vont entraîner une augmentation correspondante de la température des gaz brûlés.

Dans l'étude de la conception de cette hotte, deux solutions vont donc se présenter :

- 1) Continuer à la traiter comme une hotte de four ouvert, c'est-à-dire la refroidir par une circulation importante d'eau, d'autant plus importante que la température des gaz est plus élevée.

La chaleur emportée par cette eau sera pratiquement non récupérée.

Il en résulte une perte de 6 à 10 % de l'énergie récupérable et des risques de corrosion par condensation de la hotte elle-même maintenue à basse température.

- 2) Considérer cette hotte comme la chambre de combustion de la chaudière qui va être montée à la suite.

Faire participer cette hotte à la production de vapeur, c'est ce que nous avons fait à l'usine de Dunkerque et ce sont les conceptions qui nous ont guidés que nous allons exposer.

Si nous examinons l'évolution dans les chaudières de la technique des chambres de combustion, nous notons que l'on a eu successivement :

- la voûte en briques réfractaires
- la paroi en blocs réfractaires accrochés et suspendus
- la paroi en blocs réfractaires portés par des tubes d'eau
- la paroi composite derrière des tubes d'eau non jointifs
- la paroi constituée de tubes d'eau jointifs.

Les parois à tubes jointifs et apparents ont une efficacité relative égale à 1, c'est-à-dire qu'elles absorbent pratiquement tout le rayonnement et une partie importante de la chaleur sensible des gaz.

Si les tubes sont recouverts, l'efficacité sera diminuée suivant la nature et l'épaisseur de la couche qui les recouvre.

Dans la réalisation de la hotte du four, nous serons donc conduits à choisir la paroi à tubes d'eau jointifs avec ou non un léger recouvrement par produit réfractaire.

Choix de la chaudière :

Deux considérations importantes doivent maintenant nous guider.

- 1) La combustion à la surface du four n'est pas contrôlée comme dans la chambre de combustion d'une chaudière.

Les chargements irréguliers, les effondrements de mélange, les piquages du four etc., vont entraîner, par moment, des montées importantes et rapides de température.

Il faudra donc prévoir une circulation rapide de l'eau ou de l'émulsion eau-vapeur qui assurera le refroidissement de la hotte et de la conduite de liaison hotte chaudière. Pour cette raison, il est nécessaire d'avoir de nombreux circuits relativement courts à alimentation contrôlée.

Le plafond de la hotte avec ses tubes horizontaux, la conduite de liaison hotte chaudière vont donc nécessiter une circulation par pompe de l'émulsion eau-vapeur.

Si le coefficient de transmission du métal à l'émulsion était très grand, la température du métal serait très voisine de celle de l'émulsion interne.

On se fait souvent des illusions sur la valeur de ce coefficient et par suite sur les conditions de refroidissement du métal.

Ce coefficient d'échange augmentant avec la vitesse de circulation de l'émulsion, il est donc important de prendre une valeur élevée pour cette vitesse d'où un débit important pour les pompes.

L'intensité de cette circulation permettra d'augmenter la tenue dans le temps du matériel soumis à de dures conditions.

- 2) La quantité de poussières entraînées par m³ de gaz de combustion est beaucoup plus importante que dans une chaudière normale.

Il faudra donc :

Réaliser une conduite de liaison entre la hotte et la chaudière non sujette au bouchage et, pour se faire, supprimer toute partie horizontale qui facilite les dépôts de poussières.

Choisir pour la chaudière un type de ramonage particulièrement efficace et ceci de façon pratiquement continue.

Les différents systèmes employés sont :

- Le ramonage par des ramoneurs à poste fixe ou télescopique.
- Le grenailage.

Ces différentes raisons nous ont conduits à choisir une chaudière type La Mont à circulation contrôlée.

Elle comporte un important réservoir d'eau et de vapeur et deux systèmes de circulation : l'un à circulation naturelle, l'autre à circulation forcée.

Le système à circulation naturelle est constitué par les parois et le plafond de la chaudière.

Le système à circulation forcée est composé :

- des faisceaux vaporisateurs de la chaudière proprement dite
- des parois refroidies de la hotte du four
- des parois refroidies de la conduite de liaison hotte chaudière.

Les pompes de circulation prennent l'eau dans le ballon, la refoulent dans les trois circuits indiqués ci-dessus et le mélange vapeur-eau qui en sort est reconduit au ballon pour séparation de la vapeur.

La répartition de l'eau entre les différents tubes branchés en parallèle sur chacun de ces circuits est obtenue au moyen de tuyères calibrées, placées à l'entrée de chaque circuit. L'orifice de ces tuyères crée la perte de charge principale de chaque circuit de sorte que le débit d'eau n'est que peu influencé par les autres résistances dépendant du tracé du serpentin.

Le débit total d'eau de circulation et le diamètre de chaque tuyère doivent être tels qu'à l'allure maxima de vaporisation, la teneur en vapeur de l'émulsion ne dépasse pas une valeur déterminée.

La propreté de cette chaudière est assurée de la façon suivante :

- 1) Nous avons choisi le grenailage qui est, à l'heure actuelle, le plus efficace des moyens de nettoyage sans perturbation de fonctionnement pour la chaudière. Il faut toutefois qu'au départ la chaudière ait été prévue pour une telle utilisation.

Le nettoyage par grenailage consiste à distribuer à la partie supérieure de la chaudière une pluie de particules dures dont la chute et les rebondissements de proche en proche sur les surfaces à nettoyer en maintiennent la propreté.

Les grenailles employées, d'une grosseur de 5 à 7 mm, ont une forme irrégulière, ce qui contribue à leur dispersion.

Ces grenailles sont reprises à la partie inférieure sur cribles. Elles sont remontées par élévateurs.

Nous avons, dans notre chaudière, deux postes de grenailage.

- 2) Nous avons ajouté à ceci deux ramoneurs à effacement dont nous avons judicieusement choisi l'emplacement.

Grâce au grenailage surtout, au complément par ramoneurs, nous avons une chaudière toujours propre.

Turbo-alternateur :

Nous avons monté un groupe turbo-alternateur à condensation qui utilise cette vapeur.

L'énergie recueillie à la sortie de l'alternateur est de 20 % de la puissance du four.

Nous pensons que cette solution du groupe turbo-alternateur est extrêmement souple.

Tout engagement de livraison de vapeur à un tiers devra prévoir les défaillances obligatoires de la fourniture, les arrêts prévus et non prévus pour entretien, et entraînera de ce fait un rabais dans le prix de la fourniture.

Aéro-condenseur :

Dans une usine moderne sans fumée, nous avons recherché une solution qui n'entraîne aucun dégagement de vapeur.

Deux solutions ont été examinées.

Le refroidissement par eau de mer. Ceci nous posait des problèmes d'attaque par l'eau de mer, de traitement de celle-ci et enfin celui de la prise d'eau elle-même étant donné l'importance des marées qui atteignent 6 m.

Nous nous sommes donc orientés vers la solution de l'aéro-condenseur qui, après quelques mises au point au début, nous donne entière satisfaction.

L'aéro-condenseur a également l'avantage d'une consommation plus faible d'énergie. Il est en effet possible de faire varier le nombre d'éléments en service en fonction de la température ambiante et de la production de la vapeur.

Chaudière :

- Débit de gaz : 150.000 Nm³/h à 165.000 Nm³/h
- Température du gaz en amont chaudière : 850 à 900° C
- Température en aval chaudière : 240° C
- Production de vapeur : 47 T à 50 T/h
- Pression de la vapeur en aval du surchauffeur : 36 bars
- Température de la vapeur en aval du surchauffeur : 435° C

Turbo-alternateur :

a) Turbine à condensation :

- Admission vapeur : 35 bars/435° C
- Echappement : 0,08 bar

b) Alternateur :

- Tension : 5,5 KV
- Vitesse : 1500 t/m
- Fréquence : 50 HZ
- Puissance : 12,8 MW avec cos. φ 0,8

Le groupe turbo-alternateur a été conçu pour avoir son meilleur rendement au 3/4 de sa charge, soit vers 9,6 MW.

LE FOUR FERME

LA RECUPERATION DU CO

LE PROBLEME DES BOUES ET DES EAUX DE LAVAGE

Nous ne nous étendrons pas sur la description du four fermé. Nous distinguerons deux cas.

- A) Cette technique est utilisée pour la fabrication des ferro-manganèse carburé, silico-manganèse, ferro-chrome carburé.

La température relativement élevée des gaz sous le couvercle 200 à 500°, le danger dû à leur composition à base d'oxyde de carbone, ont pratiquement, jusqu'à ce jour, empêché la réalisation d'installation d'épuration à sec.

Le faible volume des gaz sortant du four a facilité au contraire les épurations par lavage à l'eau et les systèmes par venturi en particulier fonctionnent bien.

Le prix d'une telle installation est relativement modeste.

Deux points sont à surveiller particulièrement.

- 1) L'eau de lavage tourne en circuit fermé. Un bac de décantation et un filtre rotatif permettent l'extraction des boues.

Il y a toutefois un problème délicat à résoudre.

Dans un four fermé, les gaz contiennent une certaine quantité de cyanure qui se retrouve dans les eaux de lavage.

Ces eaux seront donc traitées pour transformer au mieux les cyanures en cyanates.

Si les matières premières arrivant au four sont préalablement séchées, il y aura peu d'eau en excès. Dans les fabrications avec laitier, cette faible quantité d'eau excédentaire sera utilisée pour refroidir par

arrosage les laitiers et, à cette température, les cyanures seront transformés en cyanates.

Mais beaucoup d'usines ne sèchent pas leurs matières premières. Une production de 100 T/jour de Fe-Mn peut ainsi introduire 15 T d'eau et, pour une unité moderne actuelle de Fe-Mn de 300 T/jour, c'est 50 T d'eau supplémentaire qui seront introduites.

Il faudra donc monter un traitement chimique de ces eaux cyanurées.

Les boues humides recueillies : 50 Kgs environ par tonne de Fe-Mn, soit 15 T/jour pour une unité de 300 T de Fe-Mn/jour produits, devront être périodiquement contrôlées et déposées dans un stockage étanche de façon à éviter que les pluies puissent entraîner les traces de cyanure qu'elles renferment encore.

2) Les gaz non brûlés sont à base d'oxyde de carbone.

Parfaitement inodore, il est à très faible dose un poison violent pour l'homme.

Il faut donc contrôler rigoureusement l'atmosphère aux différents étages du four et dans toutes les opérations d'entretien qui conduisent à intervenir à l'intérieur de conduites ou cyclones etc., parcourus par les gaz du four.

De même, il faut en tout point de son parcours prendre toute précaution pour éviter tout danger d'explosion.

Les incidents et les accidents graves, exceptionnels survenus dans ce type de four, doivent être pris en considération et conduire à des consignes d'exploitation et de surveillance très précises.

B) Pour la fabrication du Fe-Si 75 %, du silicium-métal, il est nécessaire d'intervenir par piquage dans la charge à la surface du four.

De ce fait, nous ne connaissons pas en Europe de four fermé pour ces fabrications.

La Société ELKEM a mis au point le four à cuve divisée qui semble permettre la descente de la charge sans piquage pour ces fabrications.

A partir de cette cuve divisée, elle a mis en service un four expérimental de 10.000 Kw produisant du Fe-Si 75 %.

La température des gaz sous le couvercle serait de 500 à 800°.

Ce couvercle serait de ce fait équipé de circulations d'eau importantes.

A ce jour, les gaz recueillis sont épurés par lavage à l'eau.

Le problème des boues et de l'oxyde de carbone reste celui que nous venons d'exposer précédemment.

Utilisation des gaz recueillis

Ces gaz sont à base d'oxyde de carbone.

Différentes utilisations sont donc possibles.

- 1) On peut envisager une épuration complexe permettant l'utilisation du CO s'il existe dans le voisinage l'usine de produit chimique adéquate.
- 2) La solution la plus courante consistera à brûler le CO contenu et à utiliser la chaleur dégagée pour sécher, préchauffer les matières premières; pour produire de la vapeur.

ENERGIE THERMIQUE DISPONIBLE

Four fermé ferro-manganèse
Four fermé ferro-silicium 75 %
Four semi-fermé ferro-silicium 75 %

1) Four fermé à ferro-manganèse

Dans un four fermé à Fe-Mn, nous avons une série de réactions successives que nous rappelons rapidement.

Après une zone de préchauffage, MnO_2 se dissocie en Mn_2O_3 et Mn_3O_4 à une température d'environ 400° , l'oxygène libéré se combine au CO qui monte à travers la charge et cette combustion va ajouter sa chaleur à la charge.

Mn_2O_3 et Mn_3O_4 sont ensuite réduits à l'état de MnO .

Et enfin MnO est réduit par le carbone dans la zone de fusion.

L'existence de ces différentes réactions successives et simultanées nous montre qu'il se dégagera à la surface du four un gaz qui sera un mélange de CO et de CO_2 auquel s'ajouteront, en petite quantité, de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène.

C'est ainsi que, dans un four à ferro-manganèse carburé normalement conduit, nous allons obtenir, par tonne de ferro-manganèse fabriqué :

650 à 700 m³ de gaz à 1.300 Kg calories
soit 845.000 à 910.000 Kg calories disponibles.

Pour produire une tonne de Fe-Mn, il faut 2.400 Kw, soit :

$2.400 \times 860 = 2.064.600$ Kg calories.

C'est donc 40 à 44 % de l'énergie dépensée pour les productions de Fe-Mn que nous pouvons espérer récupérer.

Il faut dire que, dans un four fermé de ce type, l'énergie thermique perdue dans le refroidissement du couvercle et ensuite dans le lavage des gaz représente environ 10 % de l'énergie électrique nécessaire pour la production du Fe-Mn.

2) Four fermé à Fe-Si 75 % et four semi-fermé à Fe-Si 75 %

L'expérience du four fermé à Fe-Si 75 % étant actuellement très réduite,

nous avons été amenés à étudier le four semi-fermé que nous connaissons bien et à en déduire les valeurs correspondantes pour le four fermé.

A l'intérieur du four semi-fermé à Fe-Si 75 % vont avoir lieu un certain nombre de réactions.

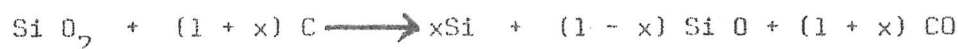
La réaction idéale de réduction de la silice est :



Si nous appelons x le rendement de transformation de la silice, dont une partie sera transformée en Si et la différence en Si O, nous aurons les deux réactions suivantes :



En additionnant ces deux réactions simultanées, nous avons :



Dans une marche normale, on peut admettre pour la silice un rendement $x = 0,9$.

Nous avons, en outre, un certain nombre de réactions accessoires, à savoir la réduction de l'alumine, de la chaux, contenues dans le Quartz employé.

Il faut aussi ajouter la réduction d'une certaine quantité d'oxyde de fer lorsque le fer est ajouté dans le four sous forme de battitures.

Nous avons donc les réactions suivantes :



En partant de ces réactions et de l'analyse des différents produits que nous utilisons comme réducteurs : houille, coke et bois, nous avons calculé, pour un mélange couramment employé, le poids de chacun des gaz produits avant combustion, par tonne de Fe-Si 75 %.

Ces valeurs seront les mêmes pour un four semi-fermé et un four fermé.

C'est ainsi que nous trouvons :

$$\text{CO} = 1.791 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2 = 25 \text{ Kg}$$

$$\text{CH}_4 = 119 \text{ Kg}$$

$$\text{Si O} = 131 \text{ Kg.}$$

Carbone brûlé en surface : 22 Kg

Eau vaporisée : 143 Kg.

La quantité de chaleur disponible pour notre four semi-fermé sera donc la somme de :

La chaleur contenue dans ces gaz à leur température à la sortie de la surface de chargement environ 360.000 Kg calories.

La chaleur dégagée par leur combustion, soit :

CO	=	4.330.000 Kg calories
H ₂	=	725.000 Kg calories
CH ₄	=	1.430.000 Kg calories
Si O	=	577.000 Kg calories
C	=	170.000 Kg calories
		7.232.000 Kg calories

dont il faut déduire la
chaleur absorbée par la
vaporisation de l'eau

-	91.000 Kg calories
	7.141.000 Kg calories

TOTAL :

360.000 Kg calories + 7.141.000 = 7.501.000 Kg calories.

Dans le four fermé, à couvercle refroidi sans récupération d'énergie et après lavage des gaz, nous aurons les pertes suivantes :

Le carbone sera entraîné dans les boues	170.000 Kg calories
Le Si O instable dissout dans l'eau	577.000 Kg calories
La chaleur contenue dans les gaz perdue dans le lavage	
	360.000 Kg calories
	1.107.000 Kg calories

La quantité de chaleur disponible dans le four fermé sera donc de :

7.501.000 - 1.107.000 = 6.394.000 Kg calories

Nous avons donc pour une même tonne de Fe-Si 75 % produite :

- . Un four fermé qui peut récupérer 6.394.000 Kg calories
- . Un four semi-fermé qui peut récupérer 7.501.000 Kg calories

Si nous rapportons la quantité d'énergie récupérable à l'énergie nécessaire pour la production, nous avons ceci :

Energie électrique nécessaire pour la production
d'une tonne de

Fe-Si 75 % : 8.500 Kw

soit : $8.500 \times 860 = \dots\dots\dots 7.310.000$ Kg calories

Dans un four semi-fermé :

l'énergie de récupération disponible est : 1,026
de l'énergie nécessaire pour la production.

Dans un four fermé :

0,87

Il est très important de prendre conscience de l'énergie actuellement perdue.

Elle est égale à l'énergie nécessaire pour la production, avec les mélanges actuellement utilisés pour la fabrication du Fe-Si 75 %.

Elle lui est nettement supérieure de 10 à 15 % dans le cas de fabrication de silicium utilisant exclusivement du bois.

INVESTISSEMENT NECESSAIRE POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE AVEC UNE CHAUDIERE ET UN GROUPE TURBO-ALTERNATEUR SUR UN FOUR SEMI-FERME DE 50.000 Kw

Les prix indiqués ci-dessous s'entendent pour matériel rendu monté. Ils sont établis sur la base de 1978.

. Hotte du four	
. Conduite de liaison hotte-chaudière	
. Chaudière	F.f. 25.000.000
. Turbo-alternateur avec son bâtiment et son pont roulant - aéro-condenseurs	F.f. 15.000.000
. Filtres à manches avec leur bâtiment. Les filtres ont été dimensionnés de façon à pouvoir marcher avec le four ouvert à une puissance de 18.000 Kw (sans passer par la chaudière).	F.f. 7.000.000
	F.f. 47.000.000

Le même four traité en four ouvert aurait, dans les mêmes conditions, nécessité une dépense de F.f. 19.000.000 pour l'épuration des gaz.

Nous pouvons dire que l'investissement supplémentaire dans le four semi-fermé, équipé d'une chaudière et d'un groupe turbo-alternateur, est de :

$$47.000.000 - 19.000.000 = \text{F.f. } 28.000.000$$

Dans le cas d'une consommation annuelle de 400.000.000 Kw/H au four, nous pensons produire :

$$80.000.000 \text{ Kw/H avec le groupe turbo-alternateur.}$$

A ceci, il faut ajouter l'économie importante réalisée sur les puissances des ventilateurs d'aspiration des gaz.

Actuellement, nous avons une puissance de 700 Kw

La puissance serait pour :

. le même four ouvert de 1.800 Kw

soit, en plus 1.100 Kw
=====

Donc, une économie complémentaire de 8.800.000 Kw/H.

RENTABILITE D'UNE TELLE INSTALLATION

Nous venons de voir que le supplément de prix est de F.f. 28.000.000

Nous pouvons prendre comme amortissement annuel F.f. 5.600.000

Il nous est plus difficile à l'heure actuelle de chiffrer la dépense d'entretien chaudière et turbo-alternateur, mais nous pensons être dans des normes très valables en prenant pour l'ensemble, entretien et exploitation, la somme de :

F.f. 1.400.000 par an

soit, une dépense totale annuelle de :

F.f. 7.000.000 dont 80 % non indexé.

L'économie prévue de Kilowatts est de :

$$80.000.000 + 8.800.000 = 88.800.000 \text{ Kw/H.}$$

Nous prenons 80.000.000 à F.f. 0,12 :

$$80.000.000 \times 0,12 = \text{F.f. } 9.600.000$$

soit un gain de F.f. 2.600.000 qui augmentera pratiquement comme le prix du Kilowatt.

A ceci sur le plan national, nous pouvons ajouter l'économie d'importation de fuel correspondant à la production de 80.000.000 Kw/H.

COMPARAISON DE PRIX ENTRE LE FOUR FERME ET LE FOUR SEMI-FERME DANS LE CAS D'UN FOUR A FERRO-SILICIUM 75 % OU SILICIUM A RECUPERATION D'ENERGIE

Ces deux types de four présentent un grand nombre d'éléments identiques.

Notre tableau de comparaison ne va donc porter que sur les parties qui concourent à la récupération d'énergie.

Four semi-fermé	Four fermé	Prix
Hotte du four	Couvercle du four	Analogue
Chaudière avec sa conduite de liaison	Chaudière avec ses brûleur gaz et brûleur de sécurité fuel	Analogue
Dépoussiérage à sec	Dépoussiérage humide	Plus faible pour le four fermé
Turbo-alternateur à condensation	Turbo-alternateur à condensation	Même prix
Aéro-condenseur ou système analogue	Aéro-condenseur ou système analogue	Même prix
A/ Cuve normale	Cuve divisée obligatoire	Supplément important
B/ Cuve divisée	Cuve divisée	Même prix

Nous constatons que nous avons, pour les cinq premiers postes, une dépense analogue pour l'un ou l'autre type de four.

La cuve divisée obligatoire pour le four fermé entraîne un supplément important mais améliore le rendement.

Pour le four semi-fermé, l'amélioration de rendement obtenue peut également conduire à son installation.

EVOLUTION PREVISIBLE DU FOUR A FERRO-ALLIAGES

Fours existants

Les fours ouverts existants dans une même usine dont la puissance est valable pour la fabrication effectuée pourront être modifiés en fours semi-fermés et les gaz chauds recueillis dans une chaudière commune.

La hotte de ces fours ouverts sera étudiée en simple refroidissement ou en production de vapeur.

La nécessité d'utiliser au mieux un ensemble non prévu pour cet usage pourra conduire à maintenir les gaz de combustion à une température moins élevée et à monter une chaudière produisant uniquement de l'eau chaude.

Nouveaux fours

1) Four fermé à cuve fixe

Nous avons indiqué les inconvénients et les dangers non négligeables dans leur exploitation, ajoutons y l'ennui de toute cassure d'électrode.

Ces difficultés étant contrôlées, la marche d'un four fermé avec ses goulottes apportant le mélange en charge sous le couvercle de façon continue restera toujours une solution séduisante pour la fabrication du ferro-manganèse à condition cependant d'utiliser un mélange correctement conditionné.

Ce choix sera d'autant plus justifié que le gaz récupéré pourra être utilisé en totalité :

- . dans le séchage des matières premières
- . dans leur préchauffage
- . dans l'alimentation de brûleurs mixtes, fuel et gaz, installés en complément dans la chaudière existante d'une industrie annexe.

2) Four fermé à cuve divisée

Il a les mêmes inconvénients d'exploitation que le four fermé à cuve fixe.

Il faut y ajouter les difficultés supplémentaires dans son emploi pour des fabrications comme le ferro-silicium où les mélanges de matières premières apportées au four forment facilement des voûtes.

Tout repose pour sa marche sur le bon fonctionnement de la descente de la charge par l'action de la rotation de la cuve divisée.

Tout incident dans la rotation de celle-ci entraînera très rapidement l'arrêt du four.

Les fabrications exothermiques envisagées dans ce type de four nécessitent un refroidissement très intense du couvercle. Il en résulte des pertes importantes de l'énergie récupérable.

3) Four semi-fermé avec hotte et chaudière de récupération (avec ou sans cuve divisée).

Ce type de four peut être employé dans les différentes fabrications de ferro-alliages du ferro-manganèse au ferro-silicium et silicium-métal.

Il ne présente pas de danger d'exploitation. Il est simplement recommandé de ne pas réduire l'entrée d'air en dessous d'une certaine valeur que l'on peut chiffrer à trois fois le volume théoriquement nécessaire.

La récupération de l'énergie disponible à la surface du four est la meilleure avec ce type de réalisation.

Nous avons montré la rentabilité de cette récupération.

L'utilisation de la cuve divisée doit améliorer le rendement.

Elle doit permettre la suppression du piquage dans la fabrication du ferro-silicium et du silicium-métal.

Un incident dans la marche de la cuve divisée n'arrête pas le four semi-fermé car il est toujours possible de faire intervenir la machine à piquer.

DISCUSSION

Mr. E. Hällgren*

I think you all know that we have had boilers on our furnaces for a long time and I would like to give some comments to Mr. Bromet's speech regarding our experiences. I do hope that Mr. Bromet does not object if I say that, to a great extent, the boiler installation he described has been copied from our latest boiler.

We entered this business already in the 50s. The reason was that the same company owned both a paper mill, which needed steam for the process, and a ferro-alloy plant where it was relatively easy to recover steam from the process. The first furnace equipped with a boiler was started in 1959. It was for an 11 MW ferro-silicon 75% furnace. A few years later, we had evaluated the project, we had corrected some mistakes and we built the second furnace, this time for 20 MW, also equipped with a boiler. This installation was so successful that when we next time built a furnace, well double the size - 45 MW, running now at 50 - we made practically no changes at all on the boiler.

I would like to give you some cost calculations we made at that time - it was in 1970. Of course we made comparisons between furnace plus boiler plus a small filter and furnace without boiler but with a big filter. The alternative we chose was calculated at 15 million Swedish Kr., the other - without boiler - was calculated at 12 million Kr. for the corresponding equipment, that is collection and cleaning of the gases. The difference was thus about 3 million Kr. We calculated, at that time, to have a pay off time of these 3 million Kr. of some $2\frac{1}{3}$ years. We sell the steam to the paper mill according to a price scale connected to the oil price. The oil price is now more than ten times higher than it was in 1970, so today's pay-off time would be less than three months. It gives us a very handsome profit which is well needed to pay for lower metal prices and also for high electricity prices.

I think the most important thing of all when you are going to recover energy from a furnace is what you can use the recovered energy for. In our case we were in the most favourable situation. We could sell the energy for approx. the oil price. Of course we have to sell it a little cheaper because the other party must also have some revenue from the cooperation, but for the biggest part of the steam we sell, this revenue of the customer is limited to 10%. That is an incentive big enough for him to try to take as much steam as possible from us. We do not produce as much steam as they need but still there is a certain part of our production they have difficulties to use, and that means that we have had to put in an extra incentive when they come close to full usage of our steam. So they get more rebate than 10% when they get close to 100%.

If you do not have the possibility to sell the steam as a replacement for oil, then you would normally do as Mr. Bromet has done, make electricity of the steam. But there are always large losses combined with condensing turbines. For the rather small turbines we are talking about now - small as compared to the large ones in the power plants - you will lose at least $2/3$ of the energy in the condenser. That means that, of course, the business is not quite as profitable as it is for us.

* Vargön Alloys, Sweden

I would say that all our three furnaces are still running with the same equipment as they had from the beginning. Few tubes have been replaced. We have steam producing hoods above the furnaces. The hoods are cooled on the inside by steam producing tubes. The gas temperature at the exit from the hood is between 900 and 1200°C. Thanks to the steam producing hoods we can use higher temperatures than other people who have started their energy recovery projects much later. This makes our recovery more effective, as a high gas temperature is of vital importance for the absorption of heat in every square unit of tube surface.

Mr. Bromet said that if you sell steam to some outside company you will have to give him some guarantee for the delivery. For us that is not the case. We do not give the customer any guarantee at all. He has to provide all the stand-by capacity of oil fired boilers himself, but still the 10% he gets as a discount from us is enough to make him take most of our production.

I said that the first furnace we started with a boiler was for 11 MW. It is running now at 17 MW, not with ferro-silicon anymore but with high carbon ferro-chrome. The following furnace we built was designed for 20 MW for ferro-silicon 75% and is running now at well 30 MW with high carbon ferro-chrome. The latest, which was started in 1972, is about the same size as Mr. Bromet's furnace, 1800 mm electrode diameter, the transformers are now as big as 105000 kWh - in fact bigger than we need - and this furnace is also producing high carbon ferro-chrome. In the two former furnaces we have produced not only ferro-silicon 45 and 75 but also silico-manganese and ferro-chrome silicon and now high carbon ferro-chrome. So the boilers do not create any trouble for you if you want to change from ferro-silicon to other products.

Mr. H. Bromet:

La Société Airco-Alloys et M. Hällgren ont été les premiers en Europe et probablement dans le monde à produire de la vapeur en utilisant la chaleur perdue dans le gaz de combustion d'un four électrique à ferro-alliage. Cette vapeur est livrée à un utilisateur voisin.

A la CUAEM, nous avons réalisé le premier four semi-fermé à ferro-alliage utilisant directement la vapeur produite dans un groupe turbo-alternateur marchant en parallèle avec le four.

Dans les deux cas les chaudières de récupération utilisées sont du type LA MONT à circulation contrôlée, mais de constructeurs différents. Elles ont été prévues à la construction du four, ce qui nous a permis en ce qui nous concerne de réaliser une liaison four chaudière évitant les dépôts de poussière.

Mr. A.G. Arnesen^{*}

To Mr. Bromet's highly interesting presentation, I would like to make a few comments on one certain aspect, namely the comparison between the semi-closed or, as we prefer to call it, the semi-open furnace and the completely closed ferro-silicon furnace. As you indicated in your paper, we have in our Company for about three years operated a fairly small 8.5 MW closed ferro-silicon 75% furnace and we consider that the problems of the vertical movement of the charge in this ferro-silicon furnace is solved through the use of the split furnace body system. One interesting observation we have made and which is

* Elkem a/s, Norway

relevant to your comparison between the open and the closed furnace is that we can see no signs in the dust from the closed ferro-silicon furnace of any decomposition of the SiO into a silicon metal and SiO_2 . I will not speculate on the mechanism behind this, but it affects the heat balance.

I think I agree 100% with your general observations of wet cleaning system and the large amount of sludge you will get from a closed ferro-silicon furnace. We have, therefore, for some years worked on the development of a dry cleaning system for a closed ferro-silicon furnace and we have the first industrial unit going on stream again later this month. And again, this would influence the comparison between the closed and the semi-open ferro-silicon furnace because in that case you do not lose the sensible heat in the gases from the furnace. And finally, I think a very important thing in the comparison is the gas volume that we have from the semi-open furnace compared with the closed furnace. The exhaust gas volumes you have from your heat recovery system, the boiler, will be much lower in case of the closed furnace; you can have stoichiometric combustion and your losses will be lower. So based on a number of assumptions we have found that you can regenerate approximately 15 or 20% more energy from the closed furnace in case of a dry gas cleaning than from the semi-open furnace.

Mr. H. Bromet:

Je suis d'accord que lorsque l'épuration à sec dans un four fermé fonctionnera, le problème se posera de façon différente. Lorsque j'ai écrit mon article, c'est-à-dire à la fin de l'an dernier, je savais que vous faisiez des essais mais je ne connaissais pas du tout les résultats de ces essais. Voici ce que je voulais préciser.

Mr. E. Hällgren

I forgot to say how our boilers were built. We went into cooperation with a boiler specialist, Svenska Maskinverken. We designed boilers and furnaces as a unit, not the furnace first and the boiler later. Special requirements on the electrode holders - to make them suited for the boiler hood - led to the design of holders everybody is using now, with rubber membranes around the electrode shoes.

I would also say that the more valuable the heat is which you recover, the more you should recover and if you want to recover much you must start with a high temperature coming out from the furnace. This means in turn that you must keep the influx of air from the sides very low. This is mostly called "false air" and, of course, you should keep the false air outside the furnace. That will help you a good deal to recover much of the heat from the furnace room and from the furnace gases.