La deuxième voie conduit à une production de 16,6 t/j ou 13,2 t/j de NO et la consommation énergétique finale dépend de l'efficacité du réacteur de trempe : 9,8 MWh/t ou 5,2 MWh/t. Elle correspond à la proposition de réalisation d'un réacteur hors d'équilibre en arc triphasé.

Ces considérations permettent d'envisager le calcul du coût d'une tonne d'acide nitrique 35º Baumé par la voie plasma. Cette estimation a été effectuée en employant les informations fournies par les études expérimentales en cours à l'Université de Limoges sur un pilote de 10 kW. Néanmoins, nous avons admis qu'une partie de l'énergie recueillie lors de la trempe pourrait être récupérée dans le cas d'une unité pilote de 10 MW. La figure 10 indique que le prix de HNO₃ est voisin de 400 à 500 F/t à condition d'admettre que l'énergie électrique est aux environs de 100 F/MWh (prix 1980 à partir de l'électronucléaire). Le prix de HNO₃ proposé dans les études économiques qui envisagent la gazéification des charbons est de 500 à 600 F/t et l'acide nitrique en 1980 à partir du méthane importé atteindra 450 F/t si l'on prend la référence des cours internationaux 106 BTU = 5 \$.

Conclusion

Cette étude ouvre la voie à la synthèse directe des oxydes d'azote par des techniques plasmas. Elle démontre que la technologie à plasma apparaît crédible, à condition de pouvoir mettre en œuvre un réacteur à lit catalytique capable d'améliorer le rendement à partir des espèces métastables de l'azote, c'est-à-dire sans passer par la dissociation en phase plasma.

Du point de vue économique, les calculs effectués dans un cas peu favorable indiquent malgré tout que la fabrication de l'acide nitrique par voie plasma est à un prix inférieur à celui de la technique de gazéification. La comparaison avec la voie naphta ou la voie méthane dépend bien évidemment de l'évolution du prix du brut et de la thermie-gaz. Dans l'hypothèse probable d'un alignement du prix du gaz sur le prix du brut (brut 1980 à 35 \$ le baril et 106 BTU à 5\$), le procédé plasma devient meilleur marché que la voie thermique. Enfin, ajoutons que dans l'état actuel de la préparation du nitrate d'ammoniac, le liant employé (craie) donne un granulé après séchage au four dont le calibre n'est pas compatible avec tous les semoirs. Cette médiocre présentation du produit conduit à une perte de 80 à 90 % de l'engrais en fonction des conditions climatiques de la région. Un encapsulage au plasma par une coque de céramique poreuse conduirait à l'utilisation à 80 à 90 % de l'engrais par la plante. Cette voie prometteuse constitue également une modification prochaine des techniques de fertilisation des sols.

Bibliographie

- (1) R. F. Baddour, R. S. Timmins, The applications of plasmas to chemical processing, Pergamon Press., 1967.
- (2) F. Haber, A. Koning, Z. Electrochem., 1970, 16 (7), 803.
- (3) J. Amouroux, S. Cavadias, D. Rapakoulias, Ann. Chim., 1977, 2,
- (4) A. Czernickowski, R. Bajorek, R. Pardsa, E. Reszke, 3^e Symposium international de chimie des plasmas, IUPAC, Limoges 1977.
- (5) P. R. Amman, R. S. Timmins, ATChE Journal, 1966, p. 956.(6) S. N. Ganz, A. P. Melnik, V. D. Parkhomenko, Plasma y
- khimiceskoy technologie, Tecnika, Iciev, 1969.
 (7) J. F. Coudert, J. M. Baronnet, J. Rakowitz, P. Fauchais, 3º Symposium international de chimie des plasmas, IUPAC, Limoges, 1977, p. G.1.6.
- (8) I. Pollo, Idem, p. G.1.9.
- (9) E. N. Eremin, A. N. Mal'tsev, L. A. Rusakova, Russ. J. Phys. Chem., 1974, 48, 1229; idem, 1256.
- (10) B. W. Brooks, R. M. Seaport, J. Appli. Chem. Biotectinol., 1974, 24, 621.
- (11) P. Meubus, Can. J. Chem. Eng., 1975, 53, 653.
- (12) E. N. Eremin, V. L. Syaduk, Russ. J. Phys. Chem., 1975, 49 (4),
- (13) D. Rapakoulias, Thèse d'État, Université P.-et-M.-Curie, 1979, Paris.
- (14) S. Cavadias, Thèse 3° Cycle, Université P.-et-M.-Curie, 1979,
- (15) D. Rapakoulias, S. Cavadias, J. Amouroux, Rev. Phys. Appl., 1980, 15, 1261.
- (16) D. Rapakoulias, J. Amouroux, 4e international Symposium on plasma chemistry, Vol. 2, p. 372, Zurich 1979.
- (17) S. Cavadias, D. Rapakoulias, J. Amouroux, *Idem*, p. 378.
- (18) J. M. Baronnet, J. F. Coudert, J. Rakowitz, E. Bourdin, P. Fauchais, Synthèse des oxydes d'azote en plasma d'arc. Rapport ATP « Utilisations physiques et chimiques de l'électricité », 1978. (19) J. Amouroux, S. Cavadias, N. Guihenec, Étude technicoéconomique de la synthèse des oxydes d'azote par des réacteurs à plasmas. Rapport Club EDF, Chimie des plasmas.

III. Étude technico-économique de production d'aciers au plasma

par J. Amouroux, J. L. Codron, D. Morvan

(Laboratoire de génie chimique, École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, 11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris)

L'article analyse l'intérêt économique de la technologie plasma appliquée à la réduction du minerai de fer.

L'utilisation de la technique plasma, pour l'obtention des métaux ultrapurs (fer et ferroalliages), apparaît bien adaptée aux nécessités

d'un marché exigeant la production d'aciers à hautes performances. Cette technologie présente comme avantages une grande souplesse de mise en œuvre (mise en route et arrêt rapide) et un faible encombrement comparé aux techniques thermiques. Dans le cadre d'un développement des aciers spéciaux, du recyclage des copeaux ou d'aciers, et enfin dans l'hypothèse de l'emploi de minerai riche et bon marché, cette technique semble très compétitive par rapport aux techniques classiques comportant de nombreuses étapes dans l'élaboration des matériaux finis. Dans le cas de la fonderie, elle permet en outre de s'adapter rapidement à une demande de produits diversifiés. Enfin, son prix de revient est actuellement tout à fait équivalent, voir inférieur, à celui des techniques classiques.

1. Introduction

La production d'acier dans le monde a plus que doublé durant les quinze dernières années. D'après les estimations de l'Institut international du fer et de l'acier, la tendance à la hausse devrait continuer durant les dix années qui viennent, années pendant lesquelles l'offre devrait pouvoir correspondre à la demande.

Toutefois, il est apparu récemment une diminution des réserves de minerais riches et une augmentation du prix de l'énergie et des matériaux réducteurs (gaz ou charbon). De plus, la mise au point de procédés industriels nouveaux a exigé, ces dernières années, la recherche de métaux ou alliages à haute tenue à la corrosion. Sur le plan des réalisations techniques, ces contraintes nouvelles se sont traduites par la recherche de procédés de fabrication de métaux ou alliages ultra-purs. Ainsi, l'étape de base de l'élaboration de la fonte est suivie d'un affinage au four électrique, d'une mise à la nuance et, pour certaines applications, une coulée sous vide qui permet l'élimination des gaz dissous.

Néanmoins, le choix d'une technique nouvelle de production d'aciers ou d'alliages exige de respecter les contraintes liées à tout procédé industriel :

- faisabilité de production,
- faisabilité économique,
- sécurité et conditions de travail,
- productivité,
- disponibilité des matières premières,

et, plus récemment :

- protection de l'environnement,
- réduction de la consommation d'énergie et des matières premières.

Dans ces conditions, le principal intérêt de l'utilisation d'un four à plasma résulte du fait qu'il permet de produire un acier ultra-pur en une seule opération.

2. Analyse technico-économique du procédé

De nombreuses études en laboratoire et plusieurs sociétés industrielles ont développé des unités pilotes d'une puissance de 1 à 10 MW pour explorer la faisabilité du procédé plasma (1 à 22). La bibliographie réunie à la fin de l'article présente les principales applications envisagées. Soulignons que, de tous les articles réunis, ceux de la Bethlehem Steel Co. sont les plus détaillés; en particulier, ils comportent la description de deux unités pilotes de 0,1 et 1 MW employées pour la réduction des oxydes de fer. L'unité de 1 MW peut fonctionner en continu et produire 300 kg de fer fondu par heure. Le gaz plasmagène est constitué d'hydrogène et de méthane. Ces unités ont permis d'obtenir, d'une

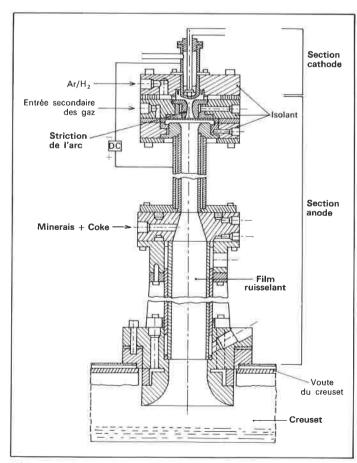


Figure 1. Four de 1 MW à film ruisselant (Bethlehem Steel).

part, du fer ultra-pur à partir d'hématite de Carol Lake et, d'autre part, du ferrovanadium et du ferrochrome (fig. 1).

3. Analyse du réacteur de réduction

Pour modéliser le réacteur, nous avons pris en compte le maximum de renseignements bibliographiques et avons distingué l'alimentation du réacteur plasma et de la production afin d'identifier les variables d'action et de calculer les bilans nécessaires au calcul économique.

L'étude du réacteur proprement dit peut alors être effectuée sous trois aspects distincts :

- bilan matière,
- bilan gazeux,
- bilan thermique.

A. Plan général de marche

A. 1. Alimentation (tableau 1)

La nature du minerai, la taille de la particule et la composition des gaz à l'entrée sont trois paramètres qui influeront directement sur le taux de réduction.

a) Composition chimique

Il est évident que la composition chimique, mais aussi la constitution minéralogique du minerai, doivent être connues avec précision. La teneur en fer des minerais varie généralement entre 30 et 50 %. Ceux-ci sont généralement destinés à un enrichissement. On assiste ainsi, depuis 1960 environ, à un développement considérable de la production de concentrés à haute teneur. La tendance est même très nettement vers la fabrication de concentrés fins, ultérieurement agglomérés en boulettes titrant 64 à 68 % de fer et plus si possible avec seulement 5 à 6 % de SiO₂. A titre indicatif, on peut citer que la Bethlehem Steel Co. utilise le minerai riche de Carol Lake constitué d'hématite dont l'analyse après broyage est la suivante : Fe : 67 %; O₂ : 30 %; Si : 1 %; Mn, Mg, Ca, Ti, Al chacun de l'ordre de 0,2 %; P, S, H₂ chacun de l'ordre de 0,1 %.

b) Granulométrie

La granulométrie est un paramètre important, car elle influe sur le rendement du réacteur. Il convient de choisir la bonne gamme granulométrique pour un temps de séjour donné. En effet, si les particules sont trop grosses, elles ne seront que partiellement fondues. Si, au contraire, elles sont trop petites, elles peuvent se vaporiser, ce qui a un effet désastreux pour le rendement. L'entraînement des fines particules dans les gaz de sortie devra donc être minimal. D'ailleurs, le broyage est une opération dont le prix de revient n'est pas à négliger, et il ne sera quelquefois pas rentable d'avoir une granulométrie plus fine si le rendement n'en est que très peu amélioré.

c) Gaz réducteur

Le facteur essentiel est cependant la composition du gaz réducteur, car il influe directement sur la puissance électrique totale délivrée au niveau de l'arc.

Les nombreux essais effectués en unité pilote par la Bethlehem Steel Co. aux États-Unis démontrent que l'énergie consommée peut être réduite par l'utilisation d'un mélange de gaz naturel et d'hydrogène plutôt que de l'un ou de l'autre seul. Selon les données publiées par la Bethlehem, le minimum énergétique (environ 2,65 MWh consommé par tonne de fer) serait obtenu pour un rapport de flux d'hydrogène à celui du méthane de l'ordre de 2 à 2,5.

L'expérience montre une variation approximativement linéaire entre l'énergie P consommée par kilogramme de fer sortant et l'enthalpie H emmagasinée par mètre cube d'équivalent d'hydrogène

$$\frac{P}{H}$$
 = (flux de H₂) × $\frac{k + 3.75}{k}$

Tableau 1. Alimentation.

Minerai	Nature du minerai				erai	Granulométrie	Débit matière	
	Minerai de Carol Lake:							
		Fe	O ₂	Si	С			
	%	67	30	1	0,5	Diamètre moyen : 37 μm	40 kg/t de Fe ₂ O ₃	
		Mn	Mg	Ca	Ti			
	%	0,2	0,2	0,2	0,2	Taille de sphéroïdisation : 150 μm	Flux équivalent de O ₂ : 93 m ³ /h	
		Al	P	S	H ₂			
	%	0,2	0,1	0,1	0,1			
Flux gazeux	Nature du gaz				z	Pouvoir réducteur	Débit/tonne de fer	
	$H_2 - CH_4$ avec: $H_2/CH_4 = 2 \text{ à } 2,5$				2,5	O/C=2 à 2,5 H/C=8 à 9 H_2 10 fois plus réducteur que CO à 2 500 K Pouvoir réducteur utilisé à 30 %	$F(H_2) = \frac{667 \text{ m}^3/\text{t}}{F(CH_4) = \frac{333 \text{ m}^3/\text{t}}{1000 \text{ m}^3/\text{t}}}$	
Flux thermique	Nature énergétique				que		Débit/tonne de fer	
	Énergie électrique				ue		3 650 kWh/t de fer	

avec :

$$k = \frac{\text{flux de H}_2}{\text{flux de CH}_4}$$
Cette formule per

Cette formule permet de calculer la consommation du mélange gazeux nécessaire à la réduction; elle indique une variation de débit comprise entre 1 000 et 1 600 m³/t selon le rendement énergétique. En nous plaçant dans les conditions optimales $F(H_2)/F(CH_4)=2$ et F (total) = 1 000 m³/t de fer, nous avons évalué que le rapport O/C dans le réacteur est approximativement égal à 2.

A. 2. Réacteur plasma (tableau 2).

Le générateur type sera par exemple celui de la Bethlehem : une cathode en tungstène gainée par une circulation d'hydrogène et

une électrode en cuivre à potentiel variable qui sert à étirer l'arc. L'injection du mélange gazeux se fait au niveau de la cathode, tandis que le minerai est injecté au-dessus de l'électrode de cuivre. Le film liquide est ainsi projeté sur cette électrode qui sert d'anode. Le temps de séjour à l'intérieur du réacteur peut varier entre 1 et 60 s.

La conversion du minerai s'effectuant a des températures de 2 500 K ou plus, les mécanismes réactionnels sont fort complexes et il est plus simple de raisonner sur des bilans matière et des bilans énergétiques plutôt qu'en terme de cinétique.

L'opération de base est celle de la réduction directe du minerai de fer, c'est-à-dire le passage de l'oxyde de fer au fer métallique, soit :

$$Fe_2O_3 = 2 Fe + \frac{3}{2}O_2$$
. $\Delta H (2 500 K) = 193 kcal, soit 0,224 kWh.$

Tableau 2. Réacteur.

	Réactions chmiques			
Aspect physico-chimique	$Fe_2O_3 = 2 Fe + 3/2 O_2$ 2 MWh/t de fer $FeO = Fe + 1/2 O_2$ 1,3 MWh/t de fer	$CH_4 + 1/2 O_2 = CO + 2 H_2 \text{ potentiel}$ $(H_2 + H_2 \text{ potentiel}) + 1/2 O_2 = H_2O$ $CO + 1/2 O_2 = CO_2$		
	Temps de séjour	Transfert de chaleur		
Rendement chimique du réacteur	t=1 à 60 s (film) Si la taille de la particule < 37 μ m Temps de séjour \approx milliseconde	Principalement par conduction et par radiatio		
	Répartition énergétique	Caractéristiques		
Bilan thermique	Refroidissement 20 % 530 kWh Réaction 28,5 % 755 kWh Pertes diverses 8,5 % 228 kWh Gaz sortants 28,5 % 755 kWh Métal réduit sortant 14,5 % 385 kWh	Puissance: 1 MW Rendement énergétique: 84 %		

A 2 500 K, l'énergie nécessaire à la réduction est donc égale à 2 MWh par tonne de fer. Ceci veut dire que le chiffre de 2 MWh/t est la limite inférieure des besoins énergétiques que l'on peut espérer dans les différents schémas réactionnels éventuels, en supposant que l'on parte d'hématite pure.

A.3. Production (tableau 3)

La sortie du réacteur plasma est constituée d'une paroi cylindrique sur laquelle coule le film de métal et le laitier recueillis dans un creuset. Les oxydes restants sont réduits par les gaz sortants à 2 200 K. Le fer obtenu est d'une grande pureté comme le montre les résultats de Mac Rae.

Les gaz de sortie présentent un intérêt économique en raison de leur haute valeur enthalpique et réductrice. Des considérations thermodynamiques permettent de prévoir le pouvoir réducteur global utilisé connaissant les rapports C/H et O/C (23 à 27).

Pour un rapport de flux d'hydrogène sur flux de méthane égal à 2, le pouvoir réducteur global utilisé s'élève environ à 30-35 %. Dans ces conditions, nous avons calculé que le flux de gaz de 1 000 m³/t de fer à l'entrée du réacteur donnait un flux de sortie de près de 1 700 m³. Les gaz sortants contiennent surtout H_2 et CO tels que flux de H_2 /flux de H_2 0 = 3,5 environ, mais ils contiennent aussi une

Tableau 3. Production.

	Analyse du métal sortant	Débit matière
Flux matière	C = 0,01 % S = 0,01 % P = 0,005 % Si = 0,01 % Cu = 0,01 %	310 kg/h soit environ 2 400 t/an
	Pouvoir réducteur sortant	Débit gazeux/t de fer
Flux gazeux	Environ 70 %	$F(H_2) = 1 090 \text{ m}^3/\text{t}$ $F(CO) = 309 \text{ m}^3/\text{t}$ $F(H_2O) = 242 \text{ m}^3/\text{t}$ $F(CO_2) = 24 \text{ m}^3/\text{t}$
		1 666 m ³ /t
Flux thermique	Température des gaz 2 500 K Température du métal : 2 200 K	Énergie récupérable : 755 kWh/t de fer dans les gaz sortants

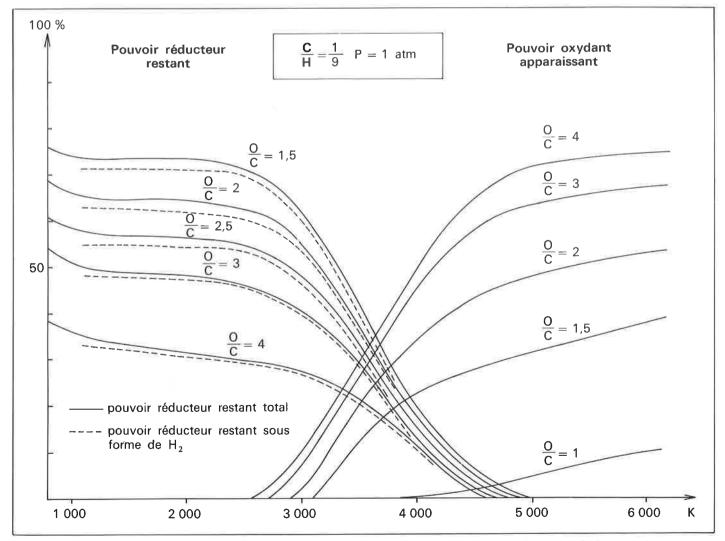


Figure 2. Variation du pourcentage du mélange gazeux réducteur puis oxydant en fonction de la température.

quantité non négligeable de H₂O et de CO₂ qui gênerait l'utilisation ultérieure du pouvoir réducteur restant de ces gaz de sortie (figure 2).

B. Bilan thermique du réacteur

Pour son réacteur de 1 MW, la Bethlehem Steel Co. indique que l'utilisation de l'énergie électrique est répartie de la manière suivante :

•	refroidissement de l'eau aux électrodes	20,0 %
	réactions	
	pertes diverses	
	gaz sortants	
•	métal réduit sortant	14,5 %

Les 28,5 % de l'énergie contenue dans les gaz sortants sont donc potentiellement récupérables.

C. Bilan économique de l'unité (40 à 48).

Nous avons jugé important d'essayer de chiffrer le coût de chaque poste de l'unité. Nous avons fait les estimations suivantes, en se rapportant à une tonne de fer sortant.

Le prix de revient total serait donc de l'ordre de 1 610 F/t avec le coût de l'énergie actuel et de 1 478 F/t dans l'hypothèse d'une utilisation d'électricité d'origine nucléaire (tableau 4, figures 3 et 4).

D. Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus par la Bethlehem Steel Co. aux États-Unis démontrent la faisabilité de la conversion d'oxyde de fer en fer en une seule opération, l'énergie nécessaire étant très proche du minimum théorique. Ces résultats soulignent la haute pureté du fer obtenu à partir des minerais riches.

Tableau 4.

Poste	Coût unitaire	Quantité nécessaire	Coût
Minerai à 60 % de fer	130 F/t	1,67 t	217 F
Broyage	20 F/t	1,67 t	33,4 F
Gaz : ● méthane ● hydrogène	0,80 F/m³ 0,35 F/m³	333,00 m ³ 667,00 m ³	265 F 233 F
Énergie	MWh actuel 150 F MWh nucléaire 100 F	2,645	397 F 265 F
Main-d'œuvre			65 F
Investissement – amortissement frais fixes			400 F

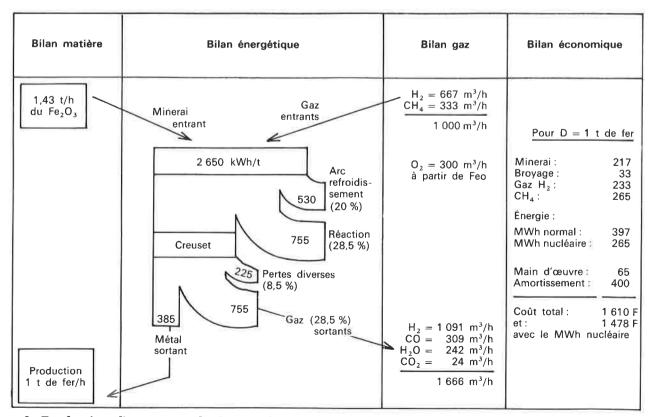


Figure 3. Production d'une tonne de fer par heure à partir de Fe₂O₃,

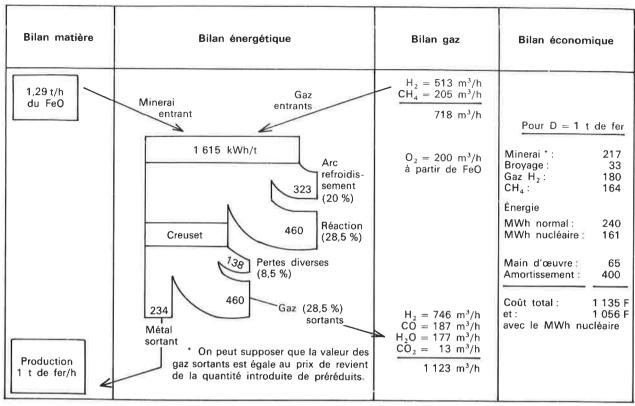


Figure 4. Production d'une tonne de fer par heure à partir de FeO.

4. Présentation des techniques de préréduction par les gaz et comparaison économique entre la préparation d'éponge de fer et l'élaboration d'acier au plasma

Les caractéristiques physico-chimiques des mélanges gazeux à la sortie du réacteur de réduction au plasma exigent d'envisager un couplage entre les techniques de préréduction et la technique d'élaboration d'acier au plasma.

D'autre part, la tendance actuelle est de développer des unités de fabrication de préréduits (éponges de fer) destinés à l'alimentation des fours à arcs des acièries. L'évolution récente des techniques dans ce domaine (500 000 t en 1965, 10 Mt en 1975 et de l'ordre de 50 Mt d'ici à 1985) montre l'intérêt de l'étape de préréduction dans l'élaboration actuelle des aciers.

Nous allons voir que, dans l'hypothèse d'un couplage, le procédé par lit fluidisé présente un intérêt tout particulier car il est à même de récupérer les calories et le pouvoir réducteur détenus par les gaz sortant du four à plasma (figure 2).

A. Principes physico-chimiques de la préparation d'un minerai

En partant des données physico-chimiques et thermodynamiques, il est possible de rappeler quelles sont les quantités théoriques d'énergie nécessaires à la réduction.

La limite énergétique inférieure que l'on peut espérer au cours de la réduction directe est de :

- 2,05 MWh/t de fer si l'on part de Fe₂O₃;
- 1,85 MWh/t de fer si l'on part de Fe₃O₄;
- 1,35 MWh/t de fer si l'on part de FeO.

Du point de vue énergétique, la réduction par les gaz est en théorie beaucoup moins onéreuse que la réduction par le coke. On trouve en effet de l'ordre de :

- 0,6 à 1,2 MWh/t de fer avec le coke;
- 0,25 MWh/t de fer avec l'hydrogène.

La réduction par CO est même exothermique jusque vers 1 600-1 700 K.

Il est intéressant de calculer les proportions du mélange gazeux $(\mathrm{H_2} + \mathrm{CO})$ telles que la réduction se fasse dans des conditions athermiques

T(K)	CO/H ₂	$\%~{\rm H_2}$	% CO
298	4,26	19	81
500	3,06	25	75
1 100	1,81	35	65
1 500	1,53	40	60

B. Techniques de mise en œuvre

Parmi les différentes techniques actuellement développées, nous pouvons distinguer deux types de procédés :

- les procédés de réduction par le gaz en four à cuve nécessitent le plus souvent du minerai de fer riche ou des boulettes (minerais agglomérés). La capacité du four à cuve varie beaucoup en fonction du degré de métallisation. Dans la pratique, la consommation totale d'énergie se situe aux alentours de 4 MWh/t de fer:
- les procédés de réduction par le gaz en lit fluidisé utilisent de fines particules dont le spectre granulométrique s'étale entre 4 µm et 4 mm, la vitesse des gaz étant réglée en fonction de la dimension moyenne des particules. Afin d'optimiser la réduction, il est nécessaire que le temps de séjour soit minimal, ce qui est obtenu en général par l'emploi de réacteurs en série. Les études publiées indiquent une consommation énergétique de 2,5 MWh/t de fer, mais ce chiffre exclut l'énergie nécessaire pour le « gaz process ». Dans les meilleures conditions opératoires, le taux de réduction obtenu est de l'ordre de 92 à 96 %.

C. Comparaison économique de l'obtention de la fonte brute et de l'éponge de fer (fig. 5)

Le développement de la production mondiale d'éponge de fer tient à deux raisons essentielles :

• les charbons cokéfiables utilisés en hauts fourneaux sont de

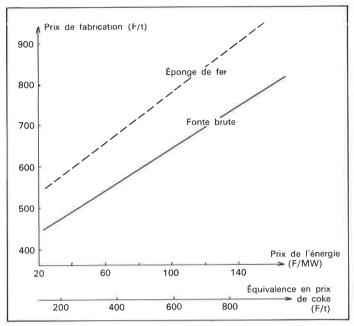


Figure 5. Comparaison des prix de revient de l'éponge de fer et de la fonte brute.

moins en moins disponibles sur le marché, et leurs prix n'ont cessé d'augmenter jusqu'ici. Cette tendance, qui ne peut que s'accentuer, oblige à rechercher d'autres réactifs réducteurs, tels que le gaz naturel:

• les minerais préréduits conviennent particulièrement bien à l'alimentation continue des fours à arcs d'acièrie et pallieront à l'avenir à la pénurie et aux prix croissants des ferrailles de bonne qualité. L'éponge de fer peut, en effet, être considérée comme une ferraille de haute valeur.

Il est donc évident que de grosses unités de réduction sur la base de l'éponge de fer seront amenées à se développer surtout dans les pays en voie d'industrialisation.

D'autre part, la tendance à séparer réactifs réducteurs et besoins énergétiques se fera de plus en plus sentir dans les zones industrialisées. Ainsi, dans le cas du gaz naturel, l'augmentation de son coût aura tendance à augmenter son emploi pétrochimique et de gaz réducteur. Les besoins thermiques devront alors être assurés par des combustibles à meilleur marché. Dans ces conditions, un couplage entre la technique de préréduction et le four à plasma paraît être une méthode pour la mise en œuvre du procédé et son alimentation en énergie.

Le problème du choix de la technologie de préparation des aciers (éponge de fer, haut fourneau, acier du plasma) doit être abordé par une étude économique à chaque site industriel.

5. Comparaison des coûts des différents procédés d'élaboration d'un acier

L'analyse technique des procédés de réduction de fer exige une comparaison entre les coûts des différents procédés d'élaboration.

A. Comparaison économique des procédés d'obtention d'acier

La figure 6 compare sous l'angle économique :

- le haut fourneau,
- la réduction directe,
- le convertisseur.

A partir de ces données, il nous a paru intéressant d'évaluer le prix de revient de l'acier pour les trois procédés suivants :

- haut fourneau + convertisseur,
- réduction directe + convertisseur,
- plasma d'arc.

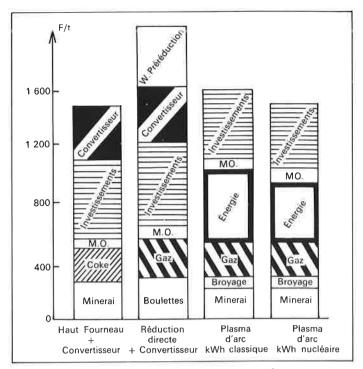


Figure 6. Comparaison économique des procédés d'obtention de l'acier (1978).

Les chiffres que nous avons portés en ordonnée peuvent varier avec le site industriel, toutefois ils montrent que le procédé plasma peut réussir à concurrencer les procédés classiques d'obtention de l'acier.

B. Possibilités de couplage du four à plasma et de la préréduction en fluidisation

L'intérêt du couplage d'une unité de préréduction et d'une unité de réduction directe au four à plasma provient d'arguments techniques et économiques :

- récupération possible de l'enthalpie et du pouvoir réducteur que détiennent les gaz sortants du four à plasma;
- possibilité d'introduire à l'entrée du four à plasma un mélange (minerais + préréduits), ce qui entraîne évidemment une diminution de l'énergie consommée au niveau du plasma (38, 39).

VI. Conclusions

L'utilisation de la technique plasma pour l'obtention des métaux ultra-purs (fer et ferroalliages) apparaît bien adaptée aux nécessités d'un marché exigeant la production d'aciers à hautes performances. Cette technologie présente comme avantage une grande souplesse de mise en œuvre (mise en route et arrêt rapide) et un faible encombrement comparé aux techniques thermiques. Dans le cadre d'un développement des aciers spéciaux, du recyclage des copeaux ou d'aciers et enfin pour l'hypothèse de l'emploi de minerai riche et bon marché, cette technique semble très compétitive par rapport aux techniques classiques comportant de nombreuses étapes dans l'élaboration des matériaux finis, elle permet en outre, dans le cas de la fonderie, de s'adapter rapidement à une demande de produits diversifiés. Enfin, son prix de revient est actuellement tout à fait équivalent, voire inférieur, à celui des techniques classiques.

Bibliographie

Techniques de réduction en four à plasma.

(1) R. G. Gold, W. R. Sandall, P. G. Cheplick et D. R. Mac Rae, Plasma reduction of iron oxide with hydrogen and natural gas at

100 kW and one megawatt. Homer Research Laboratories,

Bethlehem Steel. Co. Bethlehem, Pa, 18016.

(2) D. R. Mac Rae, R. G. Gold, C. D. Thompson et W. R. Sandall, Ferrovanadium production by plasma carbothermic reduction of vanadium oxide. Homer Research Laboratories, Bethlehem Steel Co. Bethlehem. Pa. 18016.

Co. Bethlehem, Pa, 18016.

(3) D. R. Mac Rae, Plasma processing in extractive metallurgy. Arc plasma processing workshop — 28th annual gazeous electronics Conference. The American Physical Society University of Missouri, Rolle, oct. 21-24 (1975).

(4) Tibur Metals Ltd., The development of flash reactors and their applications in metallurgical processes. Confidential project, May

1976.

(5) H. L. Gilles et C. W. Clump, Reduction of iron ore with hydrogen in a direct current plasma jet. *Ind. Eng. Chem. Process.* Desc. Develop., 1970. 9, n° 2, 194.

Des. Develop.. 1970, 9, n° 2, 194.

(6) P. H. Wilks et M. L. Thorpe, The heating of solids in high temperature plasma. TAFA/IONARC Dow Road Bov (concord),

New Hampshire 03301.

(7) L. Thorpe, Is there a bright future in store for high temperature in mining. Reprinted from Engineering and Mining Journal.

- (8) P. H. Wilks et M. L. Thorpe, Plasma torches industrial chemistry. Chemitech the Inovator's Magazine, January 1972.
- (9) P. H. Wilks et M. L. Thorpe, The survival of plasma chemistry. IUPAC symposium on plasma chemistry university of Kiel, Germany, TAFA Division.

(10) P. H. Dundas et M. L. Thorpe, Titanium dioxyde production by plasma processing. Chemical engineering progress, October

1970, **66**, n° 10, 66

(11) J. B. Schumaker Jr, Arc source for high temperature gas studies. *The review of scientific instruments*, January 1961, **32**, n° 1. (12) TAFA Division Commercial Revue.

(13) P. Capezzuto et F. Cramarosa, P. Haione et E. Molinari, The reduction of metal oxides in hydrogen at moderate pressure. Gazetta Chimica Italiana, 1974, 104, 1109.

(14) P. Fauchais et E. Bourdin, La chimie des plasmas et ses débouchés à court terme sur des synthèses inorganiques à caractère industriel (Laboratoire de thermodynamique, U.E.R. des Sciences, Université de Limoges). Congrès national des plasmas, C.N.R.S. Paris 6-10 décembre 1976

C.N.R.S. Paris, 6-10 décembre 1976.
(15) C. Bonet, Thermal plasma processing . C.E.P., December

1976, p. 63.

(16) O. Winkler, Le développement de la métallurgie sous vide et ses perspectives. Le vide. janvier/février 1976, 181, 1.

(17) R. J. McCullough, The plasmarc furnace. A new concept in melting metals. Proceedings of electric furnace conference, 1962, p. 319.

(18) S. M. Hamblyn, A review of applications of plasma technology with particular reference to ferro alloy production. National Institute for Metallurgy, Report no 1895, 14th April 1977, ISBN 086999 381 X.

(19) I. G. Sayce, Plasma processes in extractive metallurgy 533 9 669 053. Division of Inorganic and Metallic Structure, National Physical Laboratory, Teddington; Middlesex, 1977.

(20) Plasma furnace processing. A proposal for the production of steel from coal, and iron ore concentrate using the Tetronics expanded precessive plasma, 1977. Tetronics Research and Development Co. Ltd., 5b Lechchade Road, Faringdon, Oxfordshire. Foster Wheeler Limited, Reading, Berkshire.

(21) Plasma furnace processing. A proposal for the production of steel from red mud and coke or coal fines using the Tetronics expanded precessive plasma system, 1977. Tetronics Research and Development Co. Ltd., 5b Lechchade Road, Faringdon, Oxfordshire SN7 8AJ. Foster Wheeler Limited. Foster Wheeler House Station Road, Reading, Berkshire RG1 1LX.

(22) D. I. Kriklivyi, The use of natural gas an high temperature reduction processes. Russian journal of physical chemistry, 1976,

50, (4).

Thermodynamique.

(23) J. Amouroux, M. Cohen et J. Talbot, Ann. Chim., 1973, 8, 5. (24) J. Amouroux et D. Rapakoulias, Ann. Chim., 1973, 8, 193.

(25) J. Amouroux, J. P. Foll et D. Rapakoulias, Ann. Chim., 1974, 9, 181.

(26) Janaf publication du N.B.S.

(27) E. Bourdin, J. Aubreton et P. Fauchais, U.E.R. des sciences de Limoges. Laboratoire de thermodynamique. Composition et fonctions thermodynamiques des mélanges CH₄ - H₂, CH₄ - H₂ - Fe - O₂, H₂ - Fe - O₂. Détermination de l'action réductrice du mélange CH₄ - H₂ sur Fe₂ - O₃. Troisième symposium international de chimie des plasmas. Limoges, 13-19 juillet 1977. Tome II.

Cinétique.

(28) B. B. L., Seth et H. U. Ross, The mechanism of iron oxide reduction. *Metallurgical society of AIME. Transaction*, 1965, 233, 180

(29) N. J. Themelis et W. H. Gauvin, Mechanisms of reduction of iron oxides. Annual general heating, Quebec City, March 1961. Transaction, vol. LXV, 1962, 225. The canadian mining and metallurgical, Bulletin fer Joly, 1962, 444.

(30) H. W. Saint-Clair, Rate of reduction of an oxide sphere in stream of reducing gas. Transactions of the metallurgical society of

AIME, 1965, 233, 1145.

(31) N. A. Barcza, P. R. Jochens et D. D. Howat, The mechanism and kinetics of reduction of Transvaal chromite ores. *Electric furnace proceeding*, 1971, p. 88.

(32) K. J. Munz et W. H. Gauvin, The decomposition kinetics of molybdenite in argon plasma. AIChE journal, nov. 1975, 21, n° 6,

1132.

(33) S. Y. M. Ezz et R. Wild, The gazeous reduction of fine iron ores. Journal of the Iron and Steel Institute, Feb. 1960, p. 211.

(34) A. Bessières, J. J. Heizmann, J. Bessières et R. Baro, Mémoires scientifiques. Revue métallurgie, mars 1976, p. 179.

(35) A. Bessières, J. J. Heizmann, J. Bessières et R. Baro, Mémoires scientifiques. Revue métallurgie, janvier 1977, p. 3.

(36) I. Gaballah, P. Bert, C. L. Dufour et C. Gleitzer, Mémoires scientifiques. Revue métallurgie, 1972, LXIX, nº 7-8, 523.

(37) I. Gaballah, F. Jeannot et C. Gleitzer, Mémoires scientifiques. Revue métallurgie, 1972, LXIX, n° 7-8, 513.

Préréduction.

(38) J. E. Astier, Rewards and difficulties of the prereduction. *Iron*

making proceeding, 32, Chicago, 1972, p. 419.
(39) J. Astier et Y. Roux, Commentaires sur l'application de la fluidisation à la préréduction des minerais de fer. Revue de métallurgie, octobre 1975, p. 755.

Données économiques.

(40) J. F. Skelly et L. A. Chermely, Economics and productivity in tomorrow's arc furnace. *Electric furnace proceedings*, 1966, p. 113. (41) M. G. Fey, Electric arc heaters for the process industries. National industrial electric heating conference, Cincinnati (Ohio), Feb. 9-12 1976.

(42) M. G. Fey et J. McDonald, Electrode crosion in electric arc heaters, AIChE Plasma Chemical Processing Symposium, August

31, 1976.

(43) J. Astier, P. Folie, Y. De Lassat et C. Roederer, Journal du four

électrique, 1975, 3, 59.

(44) W. D. Liestmann, Herstellung von Eisenschwamm mit rheinischer Braunkohle im Drekrohrofen. Stabl. u. Eisen, 12 Feb. 1976, 96, n° 3, 97.

(45) H. Ottmar, A. Oerter, G. Schmeiduch et U. Siegers, Stabl. us. Eisen, 12 Feb. 1976, 96, no 3, 106.

(46) F. Luth et H. Konig, Beurteilung du Wirtchftlichkeit der Erzeugung und Verarbeitung von Eisenschwamm. Stabl u. Eisen, 13 mai 1976, 96, 477.

(47) H. Graf, Entwicklung auf dem Gebiet der metallurgischen Verfachenstechnik. Stabl u. Eisen, 12 Feb. 1976, 96, 117.

(48) F. R. Block et G. Stolzenberg, Verfahrensvorschläge für eisenerzreduktion auf der Basis von Methan und kernwärme. Stabl u. Eisen, 26 Aug. 1976, 17, 815.