

La marche des hauts-fourneaux au charbon de bois au XIX^{ème} siècle.

Rémy NICOLLE

1. Contexte

Au début du XIX^{ème} siècle, sous l'effet de la Révolution Industrielle, la demande d'acier connut une croissance forte. Malgré le retard pris en Europe continentale par rapport à la Grande Bretagne sur les plans technique et commercial, l'industrie sidérurgique française se développa rapidement (1).

Alors que la quasi-totalité de la fonte était produite en Grande Bretagne par des hauts-fourneaux de grande taille, alimentés en coke et soufflés par des machines à vapeur, la production de fonte au charbon de bois dans de petits hauts-fourneaux continua à croître en France pour culminer aux alentours de 1840 (1,2).

Le protectionnisme mis en place à partir de 1822 pour résister aux prix très inférieurs des aciers anglais a probablement contribué au maintien de cette forme de production dans de nombreuses petites forges essaimées le long des cours d'eau. A partir de 1860, néanmoins, le développement important de la production des hauts fourneaux au coke et surtout la suppression des barrières douanières, à la suite des accords de Free Trade libre commerce, conduisit, en quelques années, à la disparition des petits hauts-fourneaux au charbon de bois (1).

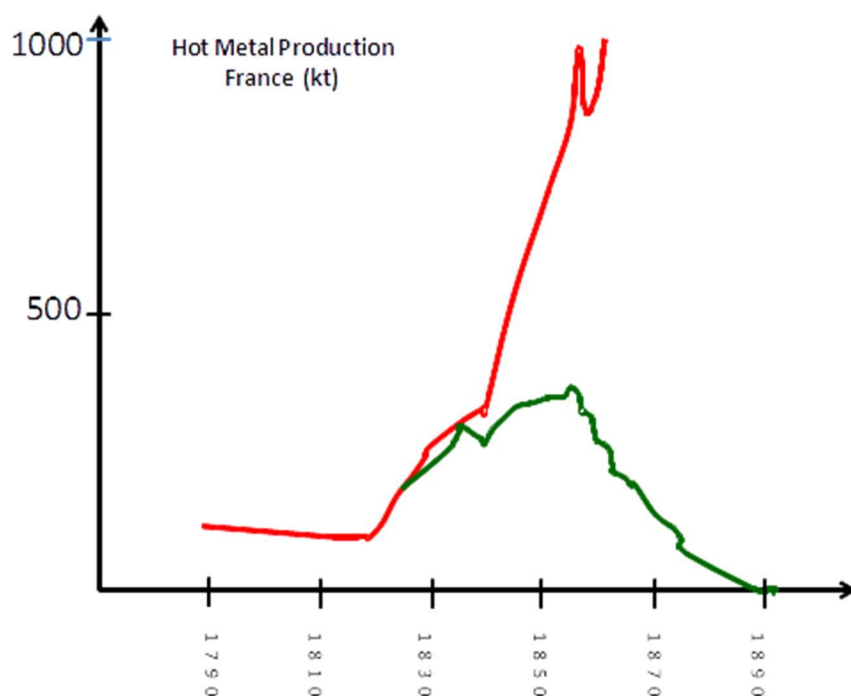


Figure 1. Production de fonte en France : charbon de bois (courbe verte) totale (courbe rouge)

Le développement maximal de la production de fonte au charbon de bois correspond à l'émergence des travaux scientifiques sur le haut-fourneau. Ainsi les travaux de Hassenfratz (3), Karsten (4), Dumas (5), et surtout Ebelmen (6), permettent de décrire avec une bonne précision, la marche de ces hauts fourneaux au charbon de bois.

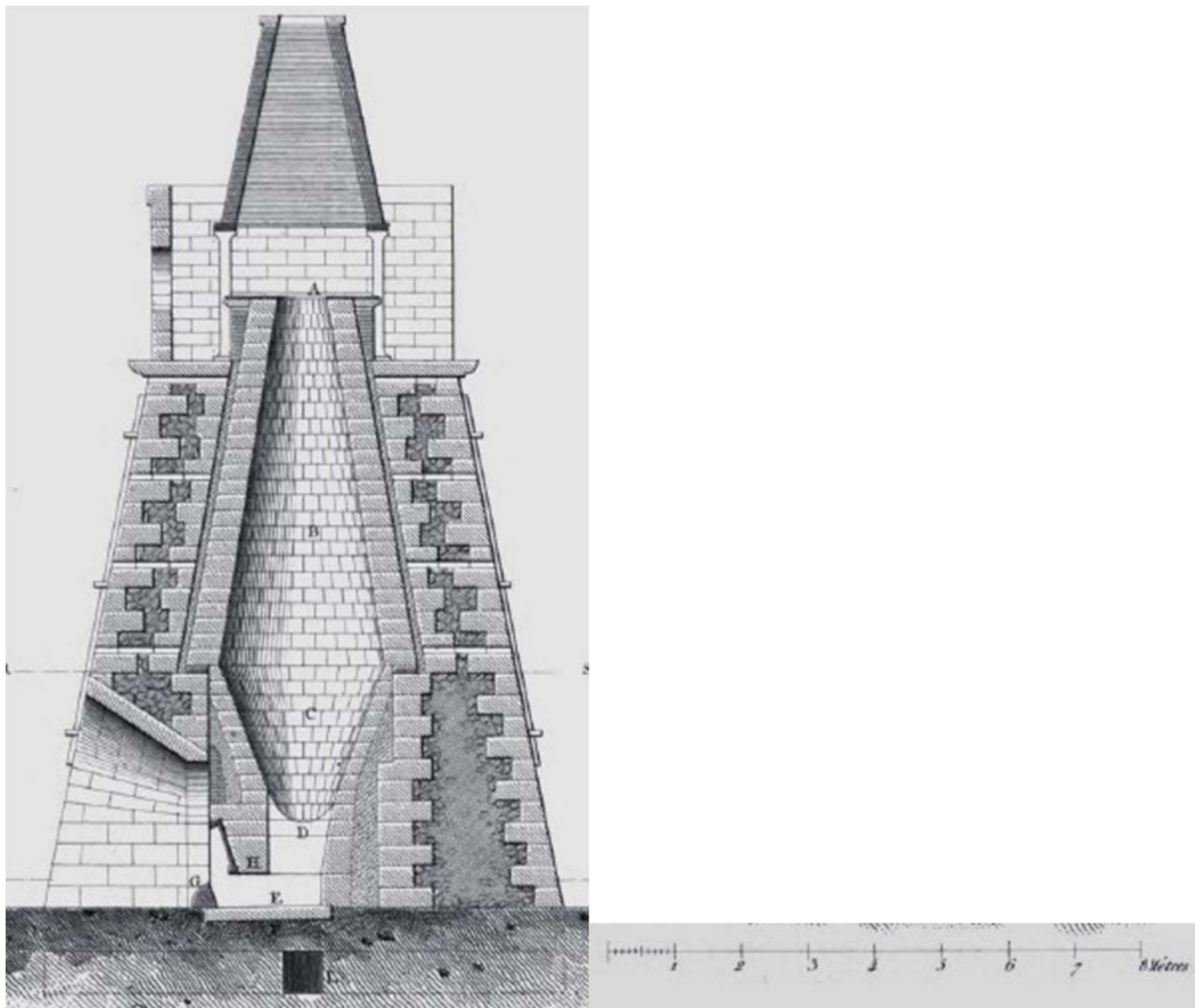
En particulier, les travaux d'Ebelmen (6) sur le haut-fourneau de Clerval dans le Doubs constituent le premier travail de description complète et détaillée du fonctionnement du haut-fourneau. Les relire à partir de nos connaissances actuelles, ne manque pas d'intérêt.

2. Les hauts-fourneaux au charbon de bois: quelques caractéristiques

Les travaux de Hassenfratz (3), Karsten (4), Dumas (5) décrivent les dimensions principales des hauts fourneaux au charbon de bois. Les dimensions du ventre sont définies par l'intensité de combustion du charbon, la hauteur de la cuve par la puissance de soufflage des soufflets.

W. Saint-Ange (7) donne une description beaucoup plus longue et détaillée en particulier les calculs des dimensions d'un haut-fourneau produisant 4t de fonte par jour avec une mise au mille de charbon de 1200 kg/tonne de fonte. L'intensité de combustion du charbon est comprise, par définition ou plutôt par expérience, comme devant être comprise entre 80 et 100 kg/m²/jour (225 pieds cubes d'air pour 1 kg de charbon).

Ces dimensions sont aussi fonction (au second ordre) de la nature des minerais (fusibles, moyennement fusibles, réfractaires) et des charbons de bois (légers, bonne qualité ou durs).



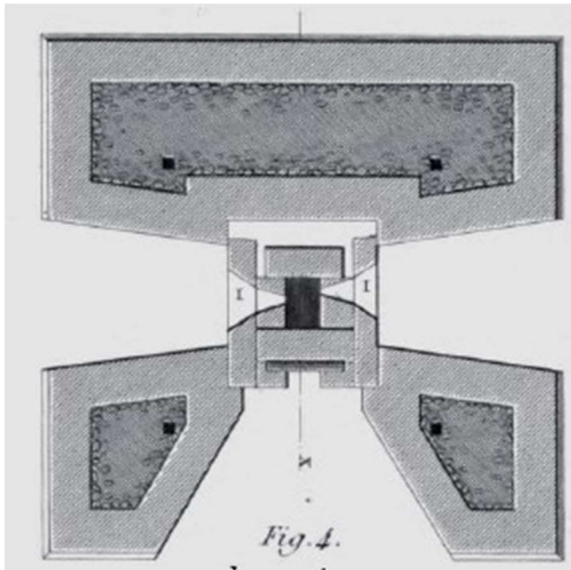


Figure 2. Haut-Fourneau à charbon de bois (4)

La hauteur totale du haut-fourneau est comprise entre 6 m (18 pieds) et 13,6 m (Sibérie). Elle est égale à au moins 3 fois la largeur du ventre (minerais fusibles) mais peut atteindre 5 fois avec des marches satisfaisantes. Au-delà d'un rapport de la hauteur totale du fourneau à la largeur du ventre de 7, il semble que la marche du haut-fourneau se dégrade.

A partir de la dimension du ventre, on peut déterminer celle du gueulard (comprise entre 1/6 et 1/4 du diamètre du ventre) avec une cheminée de 1,5 à 2m de haut.

La hauteur de l'ouvrage H_o est fonction de la hauteur du haut fourneau:

$$7 < H < 8 \text{ m} \quad H_o = 1,3 \text{ m}$$

$$9 < H < 10 \text{ m} \quad H_o = 1,5 \text{ à}$$

$$1,7 \text{ m} \quad H > 10 \text{ m} \quad H_o = 1,9 \text{ m.}$$

La hauteur du ventre à la sole du haut-fourneau est comprise entre 1/6 et 1/2 de la hauteur totale ; 1/4 pour les charbons légers et minerais fusibles, 1/3 pour les charbons durs et minerais difficilement fusibles.

Les étalages ont une hauteur et une pente d'autant plus élevée que les minerais sont réfractaires et les charbons durs.

Karsten (4) et de Pawlow (9), donnent les dimensions de plusieurs hauts-fourneaux au charbon de bois dans le monde. On observe des hauteurs variant entre 6m et 23m ; le diamètre du gueulard est proportionnel à la hauteur du haut-fourneau. Le volume utile du haut-fourneau semble lui aussi, une fonction linéaire du diamètre du creuset.

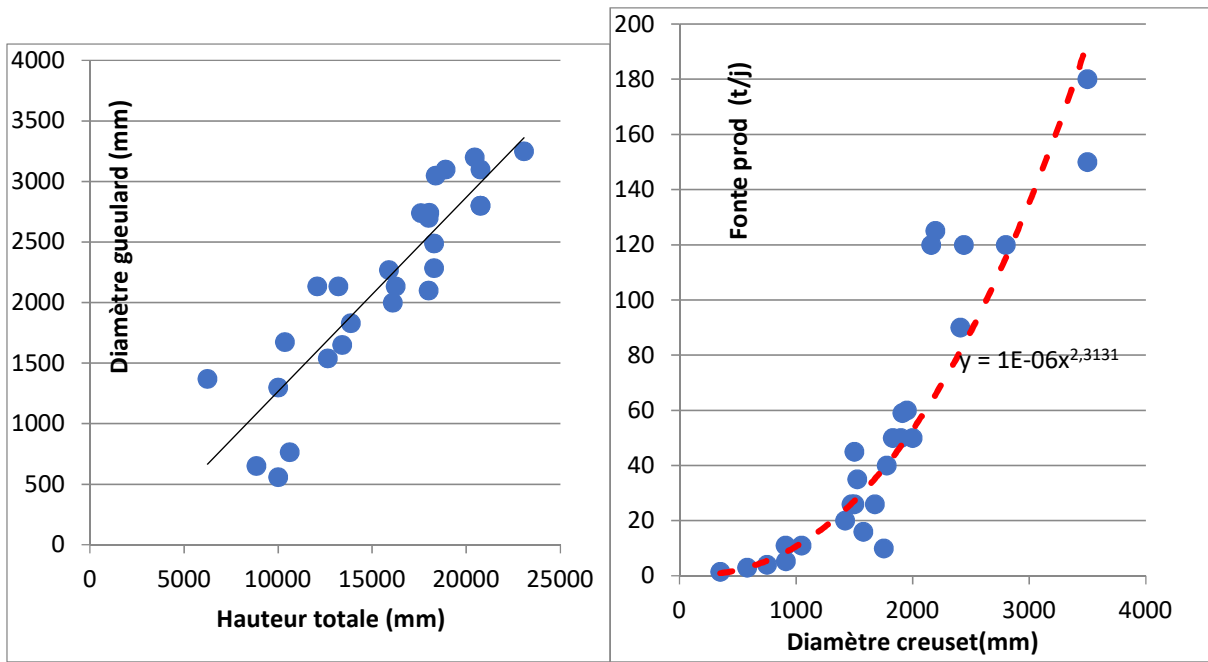


Figure 3. Dimensions des Hauts-fourneaux à charbon de bois

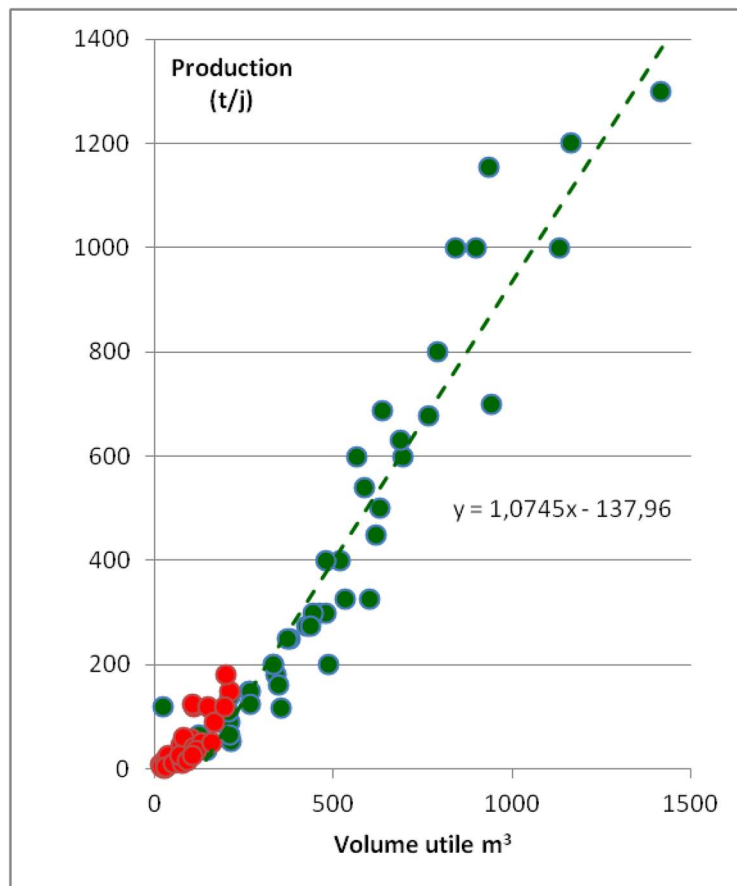


Figure 4. Relation Production - Volume utile pour les hauts-fourneaux à charbon de bois
points verts : Pawlow (7) points rouges Karsten (4)

La production du haut-fourneau est haut-fourneau proportionnelle au volume utile (ou au diamètre du creuset). Les productivités de ces hauts fourneaux sont de l'ordre de 1,1 t/m³/j à comparer avec les valeurs voisines de 2 t/m³/j. Les plus faibles poids de laitier, la préparation

de la charge, les grandes dimensions, les hautes températures de vent et les fortes pressions du vent ont contribué à cette évolution.

Les charges enfournées sont dimensionnées en fonction de la hauteur du haut-fourneau et de la nature des minerais :

7 <H < 8 m minerais fusibles : 3 à 3,5 hl réfractaires 4 à 5 hl

9 <H < 10 m minerais fusibles : 6 à 7 hl réfractaires 10 à 12 hl

H =12 m minerais fusibles: 15 à 16 hl réfractaires 20 à 22 hl

3. Les conditions de marche du haut fourneau de Clerval vers 1840

3.1. Dimensions du haut-fourneau de Clerval

Entre 1839 et 1848, Ebelmen (6) réalisa plusieurs essais sur le haut-fourneau de Clerval: analyses du gaz de gueulard, sondages verticaux avec analyses de gaz, récupération d'échantillons de minerais enfournés à diverses profondeurs dans le haut-fourneau, détermination des températures à diverses profondeurs dans la cuve.

Le haut fourneau de Clerval changea un peu dans cette période. Ses caractéristiques principales sont présentées figure 5 .

Diamètre au gueulard a..	0,67		
Hauteur de la cuve B	5,67	Diamètre au gueulard	0,56
Diamètre au ventre C	2,16	Hauteur de la cuve	6,67
Hauteur des étagés	2,12	Hauteur de la partie cylindrique ..	0,50
Diamètre de l'ouvrage au raccor-		Diamètre au ventre	2,50
dement avec les étagés e	0,62	Hauteur des étagés	2,03
Hauteur de l'ouvrage	0,44	Hauteur de l'ouvrage	0,40
Largeur devant la tuyère d	0,44	Hauteur du creuset	0,40
Hauteur totale du fourneau H	8,67	Distance de la tuyère au contrevent .	0,58
Du fond du creuset au ventre	3,00	Hauteur totale du fourneau	10,00

Figure 5. Dimensions principales du haut-fourneau de Clerval en 1841 (gauche) et 1848 (droite) (6)

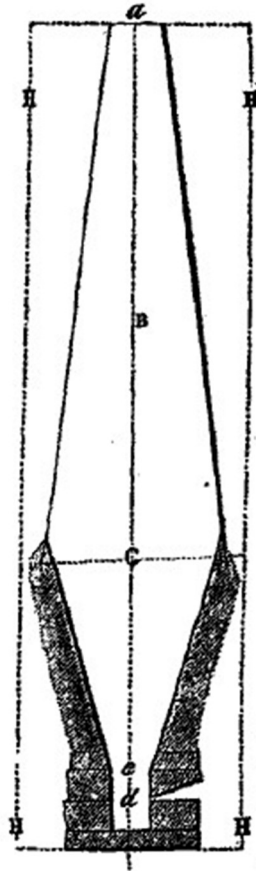


Figure 6. Profil du haut-fourneau de Clerval (6)

3.2. Conditions de marche en septembre 1841

3.2.1. Enfournements

La marche du haut fourneau au cours du mois de septembre 1841, pendant lequel ces essais ont été réalisés était la suivante:

Charbon de bois 391,05 m³ soit 90 045 kg

Castine 15,52m³ soit 22 700 kg

Minerais en grains de La Chapelle 85,89 m³ soit 154 800 kg

Minerai Calcaire de Laissey 44,25m³ soit 788 00 kg

La production a été de 61 170 kg de fonte (19 475 kg de gueuses, 13 685 kg de sapots 2^{ème} fusion, 17 021 kg sableries et moulages, 10 989 kg bocages fonte pour cubilot)

La charge unitaire produit 78,1kg de fonte; elle est chargée toutes les 45 mn environ. On coule toutes les 20 charges.

Charbon.....	m.c 0,500	pesant 115 kil.
Castine.....	0,020	29
Minerais en grains.....	0,110	198
Minerai calcaire	} 0 ^{m.c} ,050 à 0,060	89 à 107
de Laissey (Doubs).....		

Figure 7. Enfournement du haut-fourneau de Clerval (1841) (6)

La température du vent est de 175 à 190°C.

	Kg/tf
Lit de fusion	4190
Minerai	3819
Charbon	1472
Castine	371
Minerai calcaire	2531
Minerai en grains	1288

Figure 8. Enfournement du Haut-Fourneau de Clerval (1841) Mises au mille

On notera les mises au mille très élevées:

- Minerai 3 819 kg/tf, conséquence de minerais pauvres (Fe<40%) carbonatés et contenant 12,5% d'eau (on ne connaît pas la part de l'eau de constitution et de l'eau des hydrates; on supposera que, comme pour le minerai lorrain, l'eau de constitution est de 8% environ).
- Charbon 1 472kg/tf: ce charbon de bois contient 13% de matières volatiles et 8% d'eau

Mais la mise au mille demeure élevée en raison de la marche à très faible température de vent et à fort poids de laitier

Analyse des minerais

	Laissey	Chapelle St Quillain
Eau	10,0%	15,0%
CaCO ₃	36,8%	
Fe ₂ O ₃	36,2%	59,6%
MnO	0,4%	0,4%
Al ₂ O ₃	3,6%	7,2%
SiO ₂	12,6%	17,8%
Mise au mille	1288,2	2530,65

Figure 9. Analyse des minerais enfournés à Clerval

Les analyses de minerais proviennent de prélèvements faits lors d'essais de réduction au laboratoire.

Les analyses du lit de fusion recalculées à partir de ces analyses sont sensiblement différentes de celle donnée lors de l'essai de mesure des compositions du gaz dans le haut fourneau de Clerval en 1 841 (quantité de CaCO₃ moins importante: 880 kg par rapport à 1 220kg, quantité de silice plus importante 789kg vs 638kg, quantité de fer enfourné plus élevée). On retiendra l'analyse du lit de fusion proposée pour la période de l'essai.

Charbon		Kg/tf
Eau	8,0%	118
Carbone	88,0%	1199
Cendres	3,1%	42
MV	13,0%	177
C (MV)	4,0%	55

H ₂ (MV)	2,8%	39
O ₂ (MV)	6,4%	88

Figure 10. Analyse des charbons de bois enfournés à Clerval (1841)

En 1848, la marche du haut-fourneau n'avait pas beaucoup changé. Il était soufflé par du vent froid

	m.c		kil	
Charbon de bois.....	0,500	pesant	115	
Minerais en grains divers.....	0,100	—	180	} 310
Minerai calcaire de Laissey.....	0,065	—	115	
Castine.....	0,010	—	15	

Figure 11. Enfournement du haut-fourneau de Clerval (1848) (6)

Produisant pour 32 charges par jour, 2800 à 2900 kg fonte/j

Les hauteurs de couche chargées au gueulard étaient environ 1,5m pour le coke et 0,4m pour le minerai.

3.2.2 Analyse du gaz de gueulard

Ebelmen fut le premier à mettre au point l'analyse des gaz dans la sidérurgie. Il était, en effet, très intéressé par le parti que l'on pouvait tirer des gaz abondants générés par les cokeries ou les hauts fourneaux.

Analyse du gaz de gueulard

Débit vent sec: 4 733,9 m³N/tf

					Moy	Moy fin
CO	24,36	23,49	23,44	22,79	23,52	20,82
CO ₂	12,01	12,85	12,89	13,33	12,77	11,3
H ₂	5,71	6,01	5,75	5,82	5,823	5,153
N ₂	57,92	57,65	57,92	58,06	57,89	51,23
H ₂ O	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,5

Figure 12. Analyses des gaz de gueulard réalisées par Ebelmen à Clerval (1841)

Pour l'analyse du gaz de gueulard j'ai pris la moyenne des 4 analyses faites par Ebelmen en supposant en outre que la teneur en CH₄ du gaz de gueulard était de 0,75% (comme observé en 1848 sur ce même haut-fourneau). En outre la valeur de l'humidité de 11,5% correspond à la moyenne des analyses faites sur le gaz de gueulard.

CO	20,41%
----	--------

CO ₂	11,50%
CH ₄	0,76%
H ₂	3,72%
N ₂	51,95%
H ₂ O	11,5%

Figure 13. Analyse moyenne du gaz de gueulard (1841) recalculée

4. Les phénomènes se déroulant dans un HF à charbon de bois

Les travaux d'Ebelmen (analyses de gaz prélevés à plusieurs niveaux au moyen d'un tube de fusil, mesure de température à l'aide d'observation de la couleur de boîtes récupérées à divers niveaux ou de fils de divers métaux argent, cuivre, or, fer..., récupération et analyse de matières enfournées dans des boîtes récupérées à divers niveaux).

GAZ PRIS AU-DESSOUS DU GUEULARD.	A 1 mètre.		A 3 mètres.		A 6 mètres.		A 8 ^m ,55.	A la tympe.
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Acide carbonique.....	12,01	11,95	4,14	4,23	0,49	0,07	0,00	0,93
Oxyde de carbone.....	24,65	23,85	31,56	31,34	35,05	35,47	37,55	39,86
Hydrogène.....	5,19	4,31	3,04	2,77	1,06	1,09	1,13	0,79
Hydrogène protocarboné.....	0,93	1,33	0,34	0,77	0,36	0,31	0,10	0,25
Azote.....	57,22	58,56	60,92	60,89	63,04	63,06	61,22	58,17
Totaux.....	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Oxygène pour 100 volumes d'azote.....	42,5	40,8	32,7	32,7	28,5	28,2	30,7	35,8
Vapeur carbone pour 100 volumes d'azote.....	32,8	31,7	29,6	29,6	28,5	28,5	30,7	35,3

Figure 14. Sondages verticaux dans le haut-fourneau de Clerval réalisés par Ebelmen (1841)
(6)

Haut fourneau au charbon de bois, de Clerval. (Analyse d'Ebelmen.)

GAZ POUR 100 EN POIDS.	PROFONDEUR AU-DESSOUS DU GUEULARD.						A 0 ^m ,44 au-dessus de la tuyère.
	Au gueulard.	1 ^m ,33	2 ^m ,67	4 ^m ,00	5 ^m ,35	5 ^m ,67	
Azote.....	56,25	56,16	56,55	57,59	62,00	64,50	57,30
Acide carbonique.....	19,75	21,36	21,00	13,60	3,58	»	0,50
Oxyde de carbone.....	22,75	21,51	22,00	27,30	34,25	35,70	42,15
Hydrogène.....	0,35	0,42	0,38	0,28	0,26	0,14	0,10
Total.....	99,10	99,45	99,93	98,77	100,09	100,34	100,05

**Haut fourneau de Clerval, au charbon de bois.
(2^e analyse d'Ebelmen, 1848.)**

GAZ POUR 100 EN POIDS.	PROFONDEUR AU-DESSOUS DU GUEULARD.							
	1 mètre.		3 mètres.		6 mètres.		8 ^m ,55	A la tuyère.
Azote.....	56,56	57,75	61,30	61,29	64,10	64,11	62,10	58,81
Acide carbonique.....	18,66	18,56	6,56	6,70	0,79	0,11	»	1,46
Oxyde de carbone.....	24,18	23,55	31,71	31,90	35,50	35,70	37,80	40,22
Hydrogène proto-carboné...	0,26	0,75	0,20	0,44	0,21	0,19	0,06	0,15
Hydrogène.....	0,37	0,30	0,22	0,20	0,07	0,08	0,08	0,15
Total.....	100,03	100,71	99,99	100,53	100,67	100,19	100,04	100,68

Figure 15. Sondages d'Ebelmen dans le haut-fourneau de Clerval (1848) d'après de Vathaire (1867) (10)

Les points suivants en ressortent:

1. Une basse température de gueulard: en position haute de chargement, le soufre ne fond pas ($T < 112^{\circ} \text{C}$), en position basse de chargement, le soufre est fondu ($100^{\circ} \text{C} < T < 200^{\circ} \text{C}$). Il est même rapporté que parfois, le gaz de gueulard est saturé en eau (fumées troubles), de sorte que la température du gaz pourrait baisser jusqu'à $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$, température correspondant au point de rosée d'un gaz contenant 12 à 13% eau.
2. A une profondeur de 2,5m, soit 2h après l'enfournement, à une température probablement voisine de 500°C , les matières récupérées présentent les caractéristiques suivantes: - Le charbon de bois est resté identique au charbon de bois enfourné ($MV=12,8\%$)

- Les minerais enfournés contiennent moins d'eau: 5,2% pour le minerai de La Chapelle et 3,8% pour le minerai de Laissey. Le minerai de La Chapelle a commencé sa réduction (10,5% Fe_3O_4 et 56,2% Fe_2O_3 $y= 1,472$ atO/at Fe) tandis que le minerai de Laissey est identique à celui enfourné.

3. A une profondeur de 4,25m soit environ 4h30 après l'enfournement, la température de 700°C est atteinte (boîte rouge sombre). Les matières enfournées présentent les caractéristiques suivantes:

- Le charbon de bois a dégagé une partie de ses matières volatiles (MV=6,5%)
- Le minerai de La Chapelle est réduit en magnétite et wüstite (FeO 29% Fe_3O_4 36,5% $y= 1,18$ at O/at Fe), le minerai de Laissey est réduit en magnétite (12,7% FeO et 27,8% Fe_3O_4 $y=1,24$ at O/at Fe). La décomposition des carbonates n'a pas commencé ($\text{CaCO}_3 = 40,6\%$). Le minerai est complètement déshydraté.

4. A une profondeur de 5m soit environ 5h30 près l'enfournement (8 charges), la température de 800°C (boîte rouge cerise). Les matières enfournées présentent les caractéristiques suivantes:

- Les matières volatiles du charbon ont presque totalement disparu (MV=3,2%)
- Le minerai de La Chapelle est réduit en magnétite et wüstite (50,9% FeO 16,9% Fe_3O_4 $y= 1,08$ at O/at Fe) ainsi que le minerai de Laissey (10,9% FeO 30,7% Fe_3O_4 $y=1,24$ at O/at Fe). La castine a commencé sa décomposition (CaCO_3 26,6% CaO 4%)

5. A une profondeur de 5,7m soit environ 6h25mn après l'enfournement la charge a atteint une température supérieure à 1000°C. Les matières enfournées qui se situent légèrement au-dessus du raccordement étalages cuve, ont les caractéristiques suivantes:

- Les matières volatiles du charbon ont disparu (MV=0,8%)
- Le minerai de La Chapelle est en fusion partielle (Fe_{métal} 26,7% FeO 35% $y= 0,75$ atO/atFe), le minerai de Laissey est partiellement réduit (Fe_{métal} 10% FeO 30,2% $Y=1,18$ atO/atFe) et la castine est complètement décomposée (CaO 37,4%). Le maintien du degré d'oxydation du minerai de Laissey au niveau de 1,2 fait penser à une décomposition de la castine contenue dans le minerai calcaire et son remplacement par des ferrites de chaux (Ferrite monocalcique Fe_2O_3 CaO) dont le composé en équilibre avec la wüstite est C3WF (CaO 3FeO Fe_2O_3) de degré d'oxydation $Y=1,2$ atO/atFe). L'abondance de la chaux dans ce minerai autorise les combinaisons avec le fer (ferrites) et la silice (silicates) tout en laissant encore de la chaux libre.

	PROFONDEUR.				
	À 2 ^m ,80 3 ^e charge.	À 4 ^m ,35 6 ^e charge.	À 5 ^m ,00 8 ^e charge.	À 5 ^m ,70 11 ^e charge.	
MINÉRAI DE LA CHAPELLE.	100 parties se réduisent à . . .	89,30	82,31	81,22	72,91
	100 parties ont perdu. { Eau.....	10,40	14,40	15,00	15,00
	{ Oxygène...	0,30	3,30	3,78	12,09
	100 de peroxyde de fer ont perdu. { Oxygène...	0,48	5,55	6,33	20,16
Vitesse de réduction moyenne.	0,16	1,69	0,39	4,61	
MINÉRAI DE LAISSEY.	100 parties se réduisent à . . .	93,60	88,79	84,74	68,12
	100 parties ont perdu. { Eau.....	6,40	10,00	10,00	10,00
	{ Oxygène.....	0,00	1,21	1,66	5,88
	{ Acide carbonique	0,00	0,00	3,60	16,00
100 de peroxyde de fer ont perdu. { Oxygène...	0,00	3,34	4,58	16,24	
Vitesse de réduction moyenne.	0,00	1,12	0,62	3,83	

Figure 16. Analyse des solides retirés de la cuve par Ebelmen (6)

On constate bien ici que la réduction s'effectue en deux étapes (il y a deux maxima de vitesse) correspondant à la réduction hématite wüstite et wüstite fer (en fait au voisinage de la wüstite, il y a diminution de la force motrice de la réduction ainsi qu'on le voit sur le diagramme opératoire présenté figure 35 et sur les courbes de réduction des minerais figure 20.

On peut, à partir des indications de températures d'Ebelmen, tenter de tracer le profil de température du haut-fourneau (Figure 17). On observe bien une inflexion de la courbe de température aux environs de 800°C qui reflète l'existence de réactions endothermiques (ici, il s'agit de la décomposition des carbonates et de l'émission des matières volatiles). La réaction de Boudouard associée à la réduction des oxydes de fer (réduction directe) est ici de second ordre (quantité de réduction directe $y=0,063$ atO/at Fe). La zone chimiquement active du haut fourneau a une hauteur très limitée (de l'ordre de 2m). Le haut fourneau à charbon de bois de cette époque fonctionne comme un four à cuve de pré-réduction d'aujourd'hui ; la quasi-totalité de la réduction des oxydes de fer est réalisée de manière indirecte par le gaz sans réduction directe par le carbone.

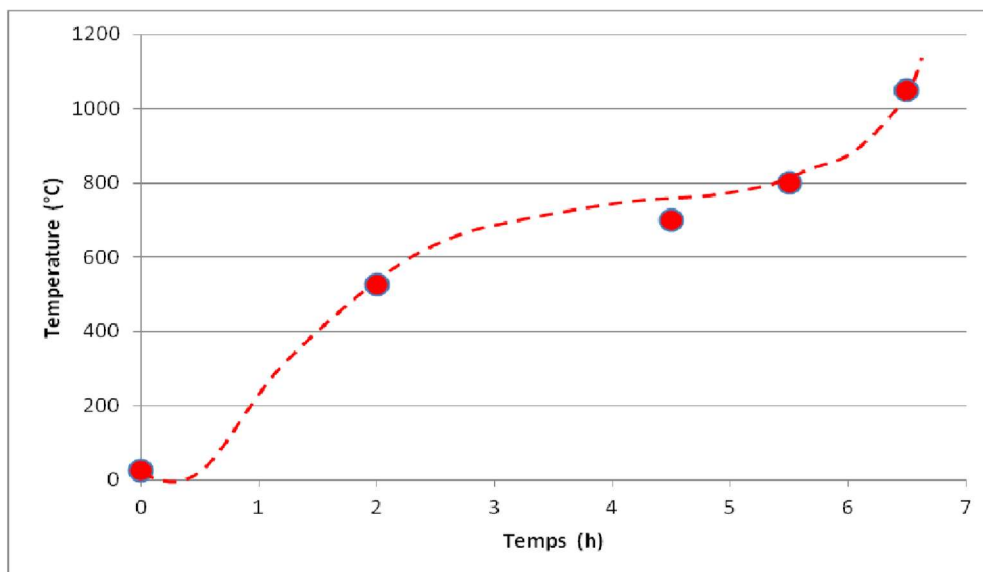


Figure 17. Profil de température dans le haut-fourneau de Clerval

Le profil de température (approximatif) établi à partir de la couleur des boîtes extraites du haut fourneau (Figure 17), met en évidence un fort ralentissement des échauffements aux environs de 800°C; il faut y voir la conséquence des importantes réactions endothermiques de décomposition de la castine et des carbonates contenus dans les minerais ainsi que de l'évolution des matières volatiles contenues dans le charbon de bois. Par ailleurs, il est vraisemblable que l'échauffement des matières au voisinage du gueulard est très lente en raison du séchage des matières humides enfournées.

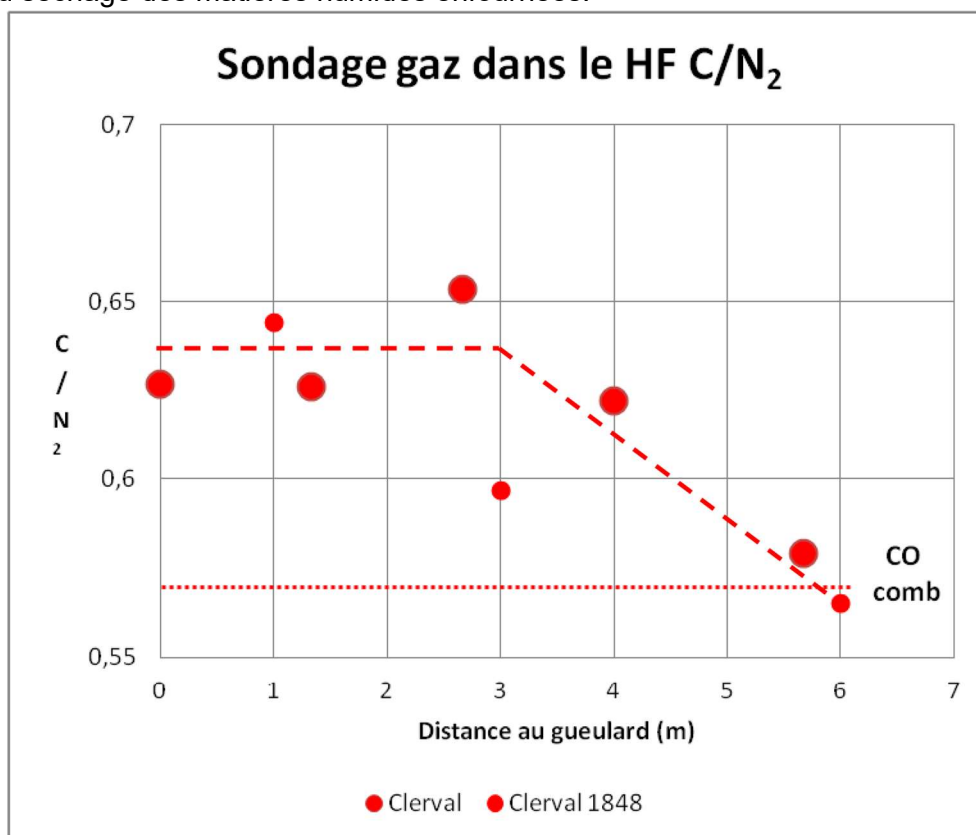


Figure 18. Analyse de gaz à diverses profondeurs dans la cuve rapport C/N₂

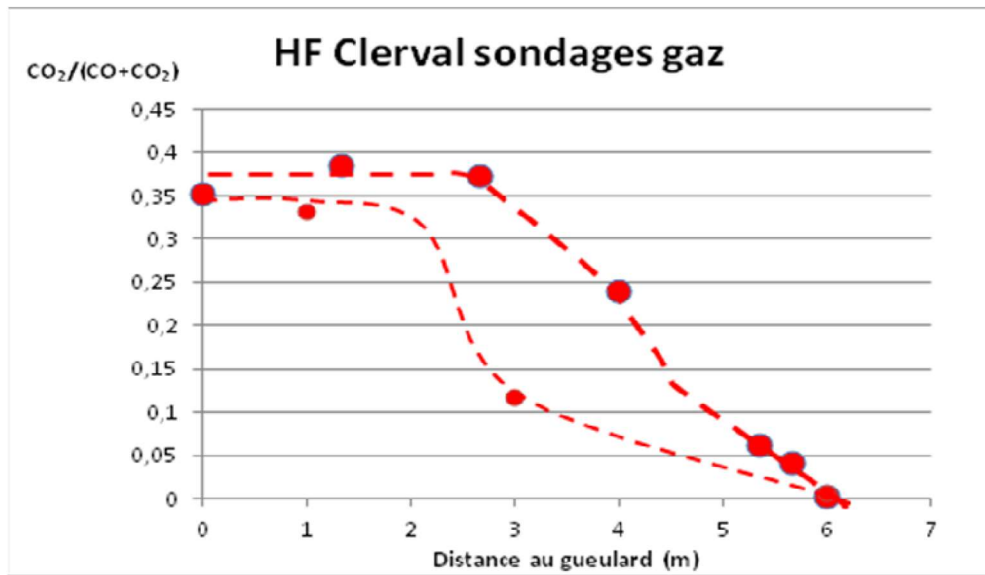


Figure 19. Analyse de gaz à diverses profondeurs degré d'oxydation

En 1848, l'échauffement et la transformation des matières sont plus rapides et on observe une translation des réactions vers le gueulard d'une hauteur de 1,5 à 2m (Figures 18 et 19).

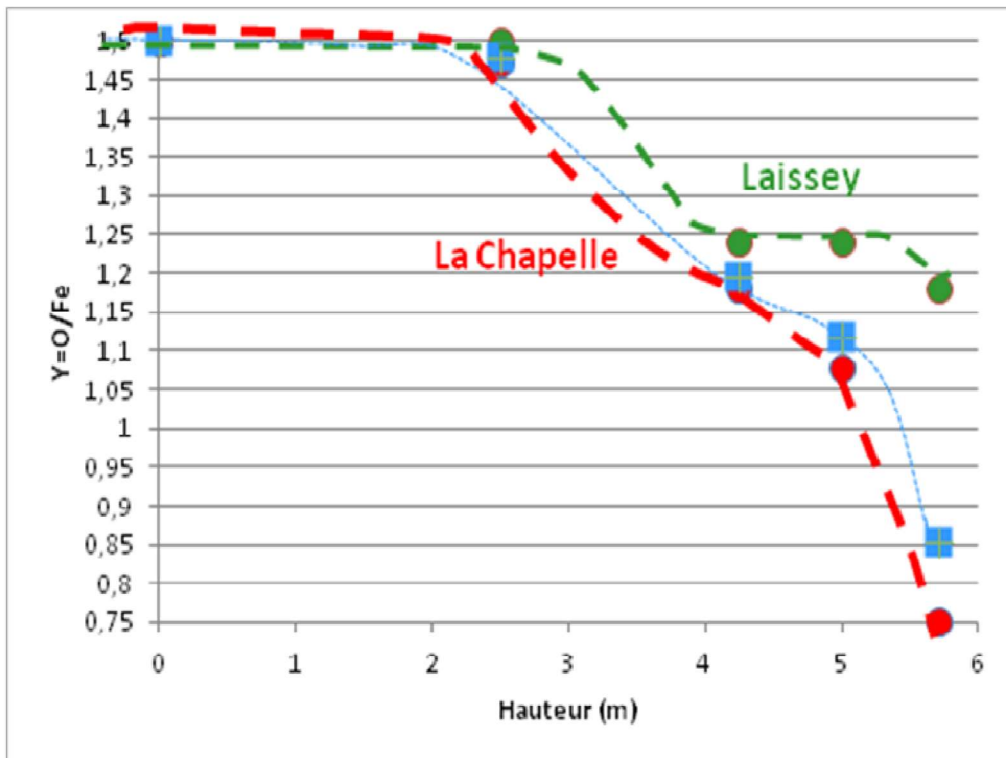


Figure 20: Réduction des minerais de La Chapelle et Laissey

Les courbes de réduction des oxydes de fer en fonction de la hauteur dans le haut-fourneau montrent un comportement fort différent des deux minerais (Figure 20). La réduction se déroule sur une hauteur de 4m.

La cinétique de réduction du minerai acide de la Chapelle présente une inflexion aux alentours de $Y=1,05$ atO/atFe; la proximité des équilibres de réduction wüstite-fer contribue à diminuer la force motrice de la réaction sans toutefois l'annuler. Il est probable que la décomposition des carbonates conduise à un écart à l'équilibre important (Figure 35).

La cinétique de réduction du minerai basique de Laissey présente un palier au voisinage de $Y=1,2$ at O/at Fe. La présence de quantités importantes de chaux dans ce minerai contribue à la formation de ferrites de chaux dont $Fe_2O_3 \cdot 3FeO \cdot CaO$ de degré d'oxydation 1,2 atO/atFe. L'ensemble du fer est alors converti en ferrite de chaux dont les équilibres de réduction sont beaucoup moins favorables que ceux des oxydes de fer pur. On observe donc une zone de composition constante du minerai de Laissey (tant que le degré d'oxydation du gaz est supérieur à celui correspondant à la réduction de $Fe_2O_3 \cdot 3FeO \cdot CaO$ en wüstite saturée en chaux).

Cette observation constitue la première (et probablement la seule) observation de la réduction de charges mixtes dans le haut-fourneau, les réactions de réduction procédant différemment selon les minerais en fonction de leur composition et de leur réactivité.

5. Les bilans du haut-fourneau

5.1. Bilans Laitier et Fer

1. Calcul du poids de laitier

Entrées		Kg/tf
Eau	12,50%	477
CaCO ₃	21,00%	880
Fe oxydes	39,20%	1497
MnO	0,70%	27
SiO ₂	20,00%	789
Al ₂ O ₃	6,60%	269
Fe	27,20%	1039

Figure 21 Analyse élémentaire et flux des enfournements minéraux

Analyse du laitier

SiO ₂	49,66%
Al ₂ O ₃	16,66%
CaO	32,58%

Figure 22. Analyse du laitier du Haut-Fourneau de Clerval (calculée)

La mise au mille laitier, calculée à partir des enfournements de minerais enfournés et de charbon de bois (en supposant que les cendres du charbon sont composées de 60% SiO_2 et 40% CaO) et en diminuant de la silice réduite en silicium de la fonte, est de 1510 kg/tf.

La présence de MgO n'est pas signalée dans les enfournements. La fonte produite étant une fonte grise, on suppose qu'il n'y a pas de FeO dans le laitier.

La composition calculée du laitier est voisine de celles rapportée pour d'autres hauts fourneaux de la même période (voir annexe 1).

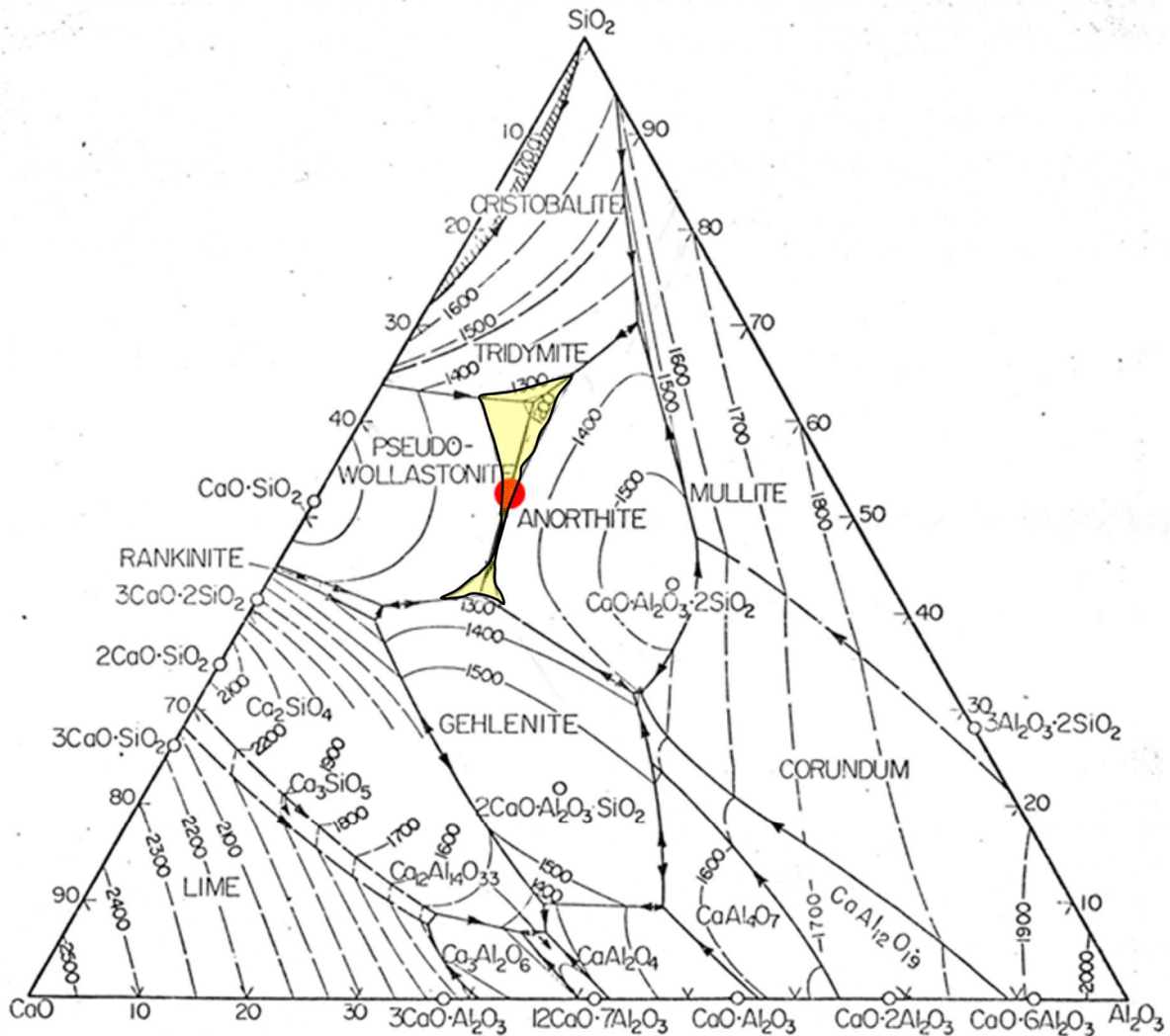


Figure 23. Diagramme ternaire et position du laitier du Haut-Fourneau de Clerval

Le point représentatif de la composition du laitier de ce haut fourneau est voisin d'une vallée très basse du diagramme de phases $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ avec une température de liquidus voisine de 1350°C . Avec ces laitiers, le coefficient de partage du soufre (S_L/S_f) semble se situer aux environs de 80 (Karsten).

2. Bilan Fer

Fe minerais	27,20%	1039
Fe fonte		945,1

Figure 24. Bilan fer du Haut-Fourneau de Clerval

Le bilan fer est loin de boucler. Il manque près de 100kg de fer. Trois causes sont possibles:

- Des envois dans les poussières; ici on ne connaît pas les quantités de poussières émises lors du chargement, mais cette hypothèse semble la plus vraisemblable.
- La présence de billes de fer dans le laitier
- La présence de fer oxydé non analysé ici dans le laitier. Comme la fonte produite ici est une fonte grise, il est peu probable que le laitier contienne des quantités importantes de FeO comme on l'observe lors de la production de fontes blanches (voir annexe 1).

5.2 Bilans Carbone, Oxygène et Hydrogène à partir de l'analyse du gaz de gueulard

5.2.1 Bilan Carbone et calcul du volume de gaz de gueulard sec (et humide)

	ENTREES (kg/tf)		SORTIES (kg/tf)
Charbon	1187	Fonte	35
Carbonates	106	Gaz	1258
	1293		

Figure 25. Bilan carbone du haut-fourneau

Débit gaz de gueulard humide 7 178,1 m³N/tf

Débit de gaz de gueulard sec 6244,9 m³N/tf

5.2.2 Bilan Azote Calcul du volume de vent et du carbone brûlé aux tuyères

Analyse du gaz de gueulard

CO	20,41%	1465,1 m ³ N
CO ₂	11,50%	825,2 m ³ N
CH ₄	0,76%	54,7 m ³ N
H ₂	3,72%	266,7 m ³ N
N ₂	51,95%	3740,8 m ³ N
H ₂ O	11,5%	825,2 m ³ N

Figure 26. Analyse et débit du gaz de gueulard

Débit vent sec: 4733,9 m³N/tf

	Sec	Sec	Sec	Sec	Moy sec	Moy humide
CO	24,36	23,49	23,44	22,79	23,52	20,82
CO ₂	12,01	12,85	12,89	13,33	12,77	11,3
H ₂	5,71	6,01	5,75	5,82	5,823	5,153
N ₂	57,92	57,65	57,92	58,06	57,89	51,23
H ₂ O	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,5

Figure 27. Analyses de gaz de gueulard par Ebelmen (1841)

Pour l'analyse du gaz de gueulard, j'ai pris la moyenne des 4 analyses faites par Ebelmen en supposant en outre que la teneur en CH₄ du gaz de gueulard était de 0,75% (comme observé en 1848 sur ce même haut-fourneau). En outre la valeur de l'humidité de 11,5% correspond à la moyenne des analyses faites sur le gaz de gueulard.

L'examen de la littérature permet de comparer les résultats de marche du haut fourneau de Clerval à ceux de la même époque, donnés dans la littérature par Macher, Karsten et Hassenfratz et d'établir la cohérence des résultats.

LIEUX DES FOURNEAUX.	Proportion de charbon par 100 parties de fonte.	Quintaux de fonte par 24 heures	Livres de charbon.	Pieds cub. d'air atmosphé- rique.	Livres d'oxygène consommés	Oxygène par 100 part. de charbon.	Hauteur des four- neaux.
1. CARINTHIE. De la famille de Rauscher.....	138	51	7038	576000	11503	163	18
2. <i>Idem</i>	136	51	7072	720000	14379	203	18
3. <i>Idem</i>	128	56	7168	720000	14379	200	18
4. <i>Idem</i>	117	63	7371	864000	17254	234	20
9. <i>Idem</i>	130	86	11180	936000	18692	167	29
10. Saint-Jéonard.....	260	31	8060	792000	15816	196	20
14. Sainte-Geztrude.....	183	48	8784	864000	17254	185	23
20. <i>Idem</i>	156	57	8892	1008000	20130	226	.....
21. Huttenberg.....	184	61	11224	1008000	20130	179	22
22. Mossitz.....	150	79	11850	1008000	20130	170	27
25. Feystritz.....	99	80	7920	2160000	43136	544	28
26. STYRIE. Neuberg.....	221	32	7072	576000	11503	203	16
30. Gollrath.....	214	34	7276	792000	15816	217	21
34. Vordernberg.....	148	50	7400	648000	12941	175	17
36. <i>Idem</i>	133	60	7980	1008000	20130	252	19
37. <i>Idem</i>	117	70	8190	936000	18692	228	19
38. Eisenertz.....	183	80	14640	1224000	24444	167	19
40. Turach.....	269	26	6994	806400	16123	230	.....
41. Lichtenstein.....	160	30	4800	1152000	23006	479	24
43. BOHÈME. Horowitz.....	188	40	7520	1296000	25882	344	32
55. HESSE. Schmalkalden.....	168	35	5880	648000	12941	220	20
56. SIBIRIE. Petrosowadskoi.....	339	27	9153	720000	14379	157	17
57. Tomskoi.....	370	33	12210	1440000	28757	235	21
58. Kamenskoi.....	167	89	14863	2160000	43136	290	26
60. Kuschwinski.....	321	61	19902	2736000	54639	274	23
65. Petrokamenskoi.....	160	215	18400	1944000	38813	206	35
68. Newiamskoi.....	115	404	46480	2448000	48818	105	41
FOURNEAUX A DEUX TUYÈRES.							
69. CARINTHIE. Treybach.....	123	112	13776	2592000	51764	375	35
70. <i>Idem</i>	117	125	14625	2880000	57515	393	.....
71. <i>Idem</i>	104	136	14144	3600000	71894	508	.....
72. STYRIE. Vordernberg.....	133	95	12635	1440000	28757	227	20
73. <i>Idem</i>	107	80	8560	1152000	23006	269	20
74. Eisen-ertz.....	182	110	20020	1440000	28757	143	30
77. BASSÉ-HONGRIE. MitterWaldc- STUCK-OFFEN.	202	64	12928	1728000	34509	266	30
78. CARINTHIE. Dans le Loeling.....	212	18	3996	345600	69018	173	12
79. STYRIE. Eisen-ertz.....	200	32	6400	345600	69018	108	12
80. CARINTHIE. Feistritz.....	182	16	2912	288000	57515	198	.....
81. Près Althammer.....	188	16	3008	288000	57515	191	.....
85. Kropp.....	156	22	3432	345600	69018	202	.....
87. CROATIE. Segoeurie de Brod.....	325	11	3575	504000	10065	281	12
89. BASSÉ-HONGRIE. Teisholz.....	287	6	1122	576000	11503	668	12
90. HESSE. Schmalkalden.....	461	13	6993	324000	64705	108	16

Figure 28. Conditions de marche des hauts-fourneaux au charbon de bois d'après Hassenfratz (2)

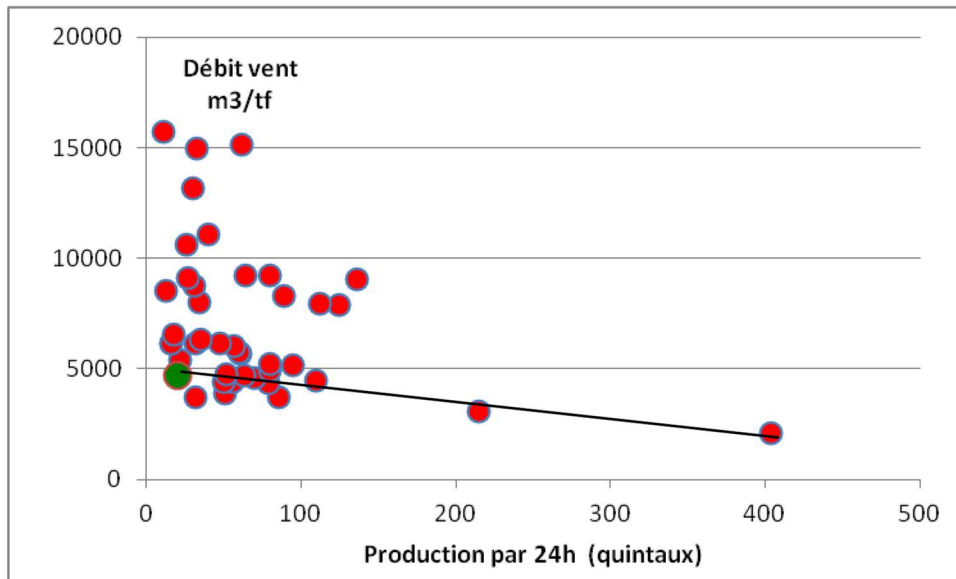


Figure 29. Calcul du débit de vent spécifique pour divers hauts-fourneaux au charbon de bois

Ce graphique de la relation débit vent production du haut fourneau montre une dispersion considérable des résultats de marche des hauts fourneaux recensés par Marcher et rapportés par Hassenfratz (2); il est certes le fruit d'erreurs de mesure probablement, de rendements de récupération du fer bien inférieurs à 1, mais on peut aussi penser qu'il y avait des fuites de vent importantes. (En vert le point figurant le HF de Clerval).

5.2.3 Bilan Hydrogène

Bilan H ₂			
Humidité air	4,2	Gaz	97,5
Charbon	51,7	CH ₄	9,6
H ₂ O minerais	53,0		
	108,9		107,1

Figure 30. Bilan hydrogène du Haut-Fourneau de Clerval

On ne connaît pas la part d'humidité et la part d'eau de constitution des minerais. Par analogie avec les minerais lorrains, on supposera que l'eau de constitution est de 8% Donc: eau de constitution = 305,5kg/tf humidité: 172,5 kg/tf (lit de fusion) + 118kg/tf (charbon de bois) = 290,5 kg/tf

5.2.4 Bilan Oxygène

Bilan oxygène	Kg/tf		Kg/tf
Air	1406	Gaz	2813
Charbon	88		
Carbonates	282		
Oxydes de fer	450		
Humidité air (8g/m ³)	34		
Silicium	23		
Hydrates + humidité	529		
	2811		

Figure 31 . Bilan Oxygène du Haut-Fourneau de Clerval

5.3 Bilan thermique global

Apports thermiques:

Chaleur sensible du vent humide 4770,3 m³/tf T vent 182°C 1377,4 MJ

N₂ 3740,8 m³N O₂ 982,4 m³N H₂O 47,2 m³N

Formation du CO et CO₂ du gaz de gueulard 18389,8 MJ

CO 1465,1 m³N 6986,3 MJ CO₂ 825,2 m³N-197m³N (décarbonatation)= 627,2 m³N

Formation H₂O dans le haut fourneau 605 MJ

432,3 m³N H₂ (H₂ charbon)-266,7m³ N (H₂ gueulard)-2*54,8 (CH₄ gueulard) 56 m³N

Formation des silicates 545,5 MJ

1043 kg gangue minerais

TOTAL Apports 20917,7 MJ

Apport total charbon de bois 38632,5

MJ Chaleur latente du gaz gueulard 23

649,5 MJ

Besoins thermiques:

Chaleur sensible du gaz humide température ~50°C 271,2 MJ

Vaporisation de l'humidité des charges 289,6 kg H₂O 707,5 MJ

Cracking des matières volatiles du charbon	1MJ/kg (8%O2)	1667,5
MJ		
Déshydratation des minerais	305,5 kg H ₂ O	756,2
MJ		
Décarbonatation de la castine et des minerais	880kg castine	1595,2 MJ
Désoxygénation des oxydes de fer	1497 kg Fe ₂ O ₃	7738,0
MJ		
Régénération du CO (réduction directe)		207,3
MJ Désoxygénation du silicium de la fonte	12 kg Si ou 26 kg SiO ₂	427,2
MJ		
Enthalpie de la fonte	1096 kg 1,37MJ/kg 1450°C	1556,1
MJ		
Éléments dissous dans la fonte C+Si		392,3
MJ Enthalpie du laitier	1512kg 1400°C	2756,4
MJ TOTAL besoins		18075,1
MJ		
Pertes & omissions		2842,6
MJ		

Figure 32. Bilan thermique du Haut-Fourneau de Clerval

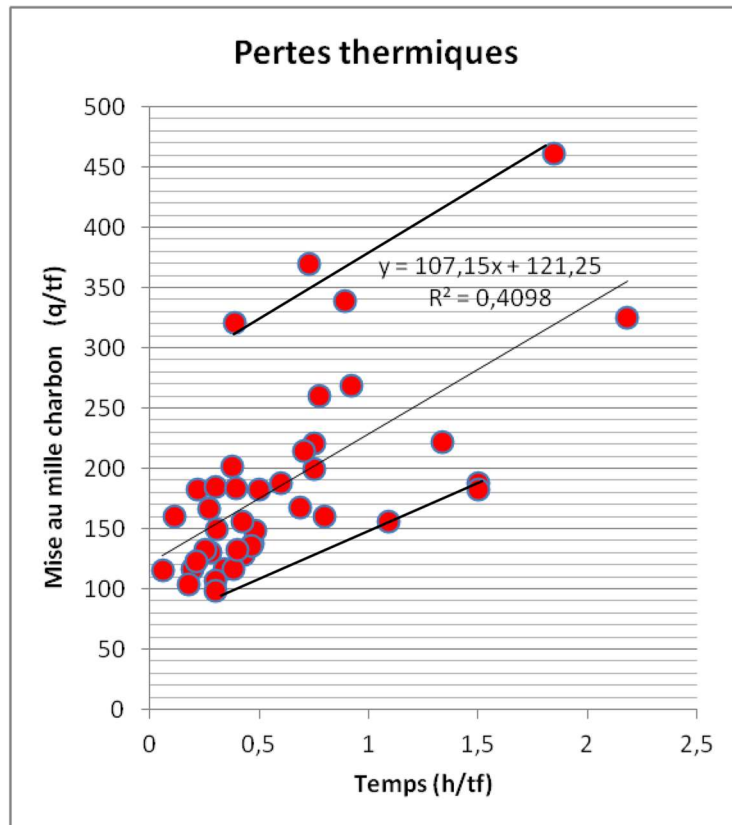


Figure 33. Calcul des pertes thermiques des hauts-fourneaux au charbon de bois

Si l'on reprend les résultats des hauts fourneaux à charbon de bois rapportés par Karsten et Marcher, la consommation horaire de charbon s'écrit: $CF = P_h + MF$

Avec

F production de fonte par heure

C mise au mille charbon

M mise au mille charbon hors pertes thermiques

P_h Pertes thermiques horaires en équivalent charbon

d'où: $C = P_h / F + M$

On trouve alors: $M = 1212,5$ charbon /tf et P_h équivaut $107,15 \text{ kg/h}$ charbon brûlé en CO aux tuyères soit $(4,935 - 1) \text{ MJ}$ par $\text{m}^3 \text{CO}$ formé ; les pertes estimées sont donc de 2810 MJ/tf , résultat du même ordre de grandeur que celui donné par le bilan thermique du haut fourneau de Clerval (3343 MJ/tf).

5.4 Calcul de la température de flamme: 1602°C

On suppose que le charbon ($1077,1 \text{ kg C}$) est échauffé à 1400°C ; un bilan enthalpique de la combustion en CO du charbon de bois aux tuyères permet de calculer la température de flamme.

Composition du gaz tuyères $5799,7 \text{ m}^3 \text{N/tf}$:

2011,9 m³N CO 34,7% 47,2 m³N H₂ 0,8% 3740,8 m³N N₂ 64,5 %

en accord avec l'analyse d'Ebelmen rapportée par de Vathaire CO % 35,7 H₂ 0,14%

N₂ 64,5%

Il y a bon accord entre les calculs et les analyses réalisées in-situ dans le HF de Clerval par Ebelmen.

Analyses de gaz in-situ par Ebelmen (niveau des étalages -5,67m par rapport au gueulard)

CO	35,51 %	34,82 %	34,89 %	34,81 %	35,01 %
CO ₂	0,00 %	2,00 %	1,98 %	2,12 %	1,53 %
H ₂	1,58 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,40 %
N ₂	62,90 %	63,17 %	63,12 %	63,06 %	63,07 %
CO ₂ /(CO+CO ₂)					0,041 7
H ₂ O/(H ₂ +H ₂ O)					0,993 7
(CO ₂ +H ₂ O)/(100-N ₂)					1,749 1
H ₂ /N ₂					1,006 3
C/N ₂					0,579 2

Figure 34. Analyses de gaz dans les étalages par Ebelmen (1841)

5.5. 5.5 Bilans étagés

Bilan oxygène étagé (diagramme de Rist)

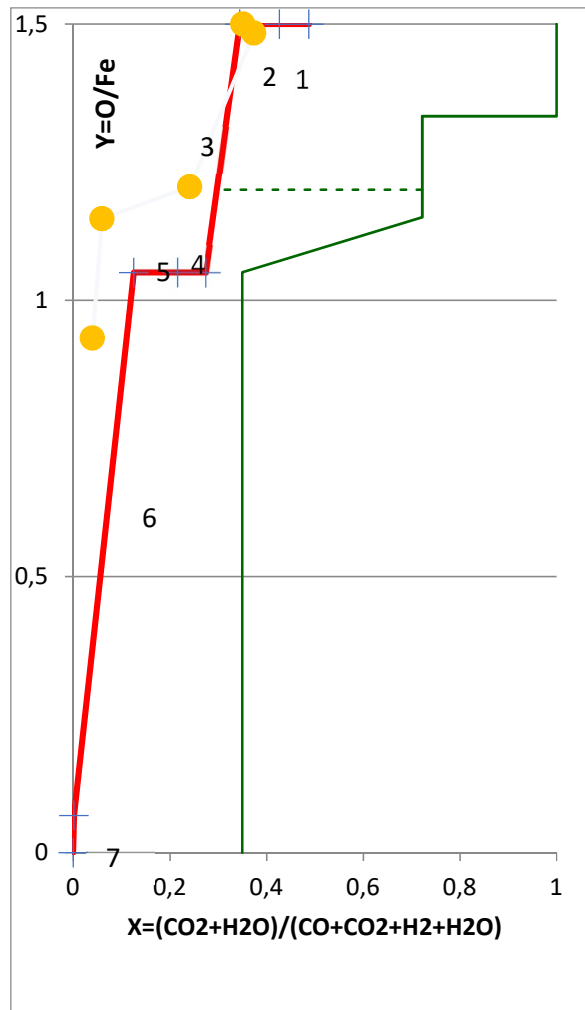


Figure 35. Chemin de réduction du Haut-Fourneau de Clerval (1841)

Sur la base de cette description du haut-fourneau à charbon de bois, on peut tracer le chemin de réduction, relation entre le degré d'oxydation des solides et du gaz dans un réacteur gaz solides à contre-courant. On reconnaît la courbe verte, tracée à partir du diagramme de Chaudron, correspondant aux équilibres de réduction (ici à 800°C) et limitant le domaine interdit et le chemin de réduction tracé en rouge. Les points rouges matérialisent le chemin de réduction des matières dans le haut-fourneau (relation degré d'oxydation du gaz / degré d'oxydation des solides) en accord avec la théorie (13).

Ce chemin peut être morcelé en plusieurs étapes:

1. Le séchage des matières à 100°C
2. La déshydratation des matières à 300°C
3. La réduction en Wustite à 750°C
- 4-5. L'émission des matières volatiles et la décarbonatation à 800°C
6. La fin de la réduction indirecte des oxydes de fer entre 800 et 1000°C
7. La réduction directe limitée des oxydes de fer $y_d=0,063$ at O/at Fe.

La décomposition des matières volatiles et des carbonates à une température voisine de 800°C empêche l'approche de l'équilibre de réduction wüstite-fer et se traduit par une augmentation de la pente de la droite opératoire, donc de la mise au mille du haut-fourneau.

On reconnaît enfin, en pointillés verts, le profil correspondant à F3WC (Fe_2O_3 3FeO CaO) qui constitue très probablement le minerai calcaire dans la zone du haut-fourneau voisine de 800°C. La présence de ce composé se traduit aussi par un profil d'équilibre moins favorable (ligne pointillée), par une pente plus élevée de la droite opératoire et donc par une mise au mille plus élevée.

Bilan thermique étagé (diagramme de Reichardt)

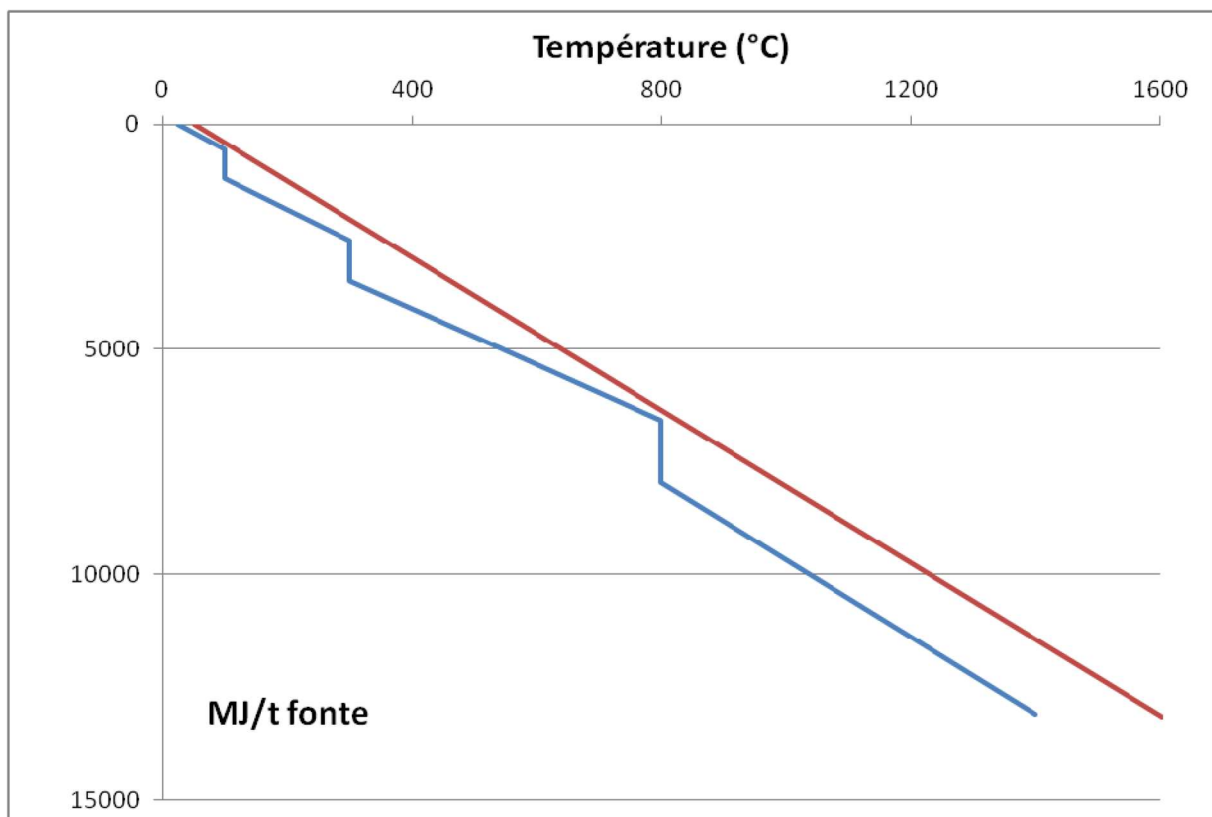


Figure 36. Diagramme de Reichardt du Haut-Fourneau de Clerval

Le diagramme de Reichardt est la courbe reliant la température du gaz et des solides à leur variation d'enthalpie. On suppose que la capacité calorifique du gaz est, en première approximation, constante. La variation d'enthalpie du gaz est donc décrite par la courbe rouge une droite dont la pente est égale au produit du débit spécifique de gaz (par tonne de fonte) par la capacité calorifique de celui-ci (en MJ/°C). La variation d'enthalpie des solides est décrite par la courbe bleue où les segments verticaux représentent les besoins endothermiques successivement des réactions de séchage, déshydratation et réduction des minerais de fer, les segments pentus représentent les besoins d'échauffement de la charge (minerais, charbon de bois, fondants) produits des débits de matières par leurs capacités

calorifiques. La courbe des solides se rapproche à certains endroits de celle du gaz, en particulier au voisinage de 800°C, ce qui correspond à un pincement thermique ; au point de pincement, l'écart de température entre gaz et solides, voisin de zéro entraîne un ralentissement des échanges de chaleur et donc une stabilisation de la courbe de température des solides et du gaz. On observe trois pincements thermiques: l'un au voisinage de 100° C correspondant à l'évaporation de l'eau, l'autre au voisinage de 300°C correspondant à la décomposition des hydrates, le dernier 800°C correspondant essentiellement à la décomposition des carbonates. Ceci permet d'expliquer le ralentissement des échauffements de la charge au voisinage de 800°C (figure 17). Une situation déjà soulignée par J.Michard (14) lors de l'élaboration directe des minerais lorrains

6. Conclusions

La marche des hauts-fourneaux au charbon de bois au XIX^{ème} siècle a pu être caractérisée à partir des travaux publiés de plusieurs auteurs: Dumas, Karsten, Hassenfratz et surtout Ebelmen dont les sondages et analyses de gaz dans plusieurs hauts-fourneaux dont celui de Clerval dans le département du Doubs apportent tous les éléments pour caractériser la marche de ce haut-fourneaux par ses bilans matières, énergie et à l'aide des outils usuels aujourd'hui, de synthèse de la marche du haut-fourneau (diagramme de Reichardt et diagramme de Rist).

Ces dépouillements confirment les points suivants:

1. Le bilan fer du haut-fourneau boucle à 90% environ suggérant des pertes de fer plus probablement sous forme de poussières au gueulard mais aussi peut-être par entraînement dans le laitier sous forme de billes ou peut être aussi sous forme d'oxyde (non analysé ici); toutefois, la fonte produite étant une fonte grise, il est peu probable que le laitier contienne des quantités importantes de FeO comme on l'observe dans les laitiers de production de fontes blanches
2. L'utilisation de minerais pauvres se traduit par un poids de laitier de l'ordre de 1500kg/tf. Ce laitier se situe dans un domaine de composition dont la température de liquidus est inférieure à 1300°C. Il est probable que la composition de la charge ait été réglée soit par l'expérience, soit à l'aide des essais de réduction fusion en boîtes étanches dans un four à réverbère telles que relatées par Hassenfratz.
3. La faible température de vent conduit à des mises au mille vent très élevées (4700m³/tf); le haut fourneau se comporte donc comme un four à cuve de réduction directe (où la réduction est réalisée quasi complètement par le gaz). Taux de métallisation final d'environ 96%
4. La mise au mille élevée est aussi la conséquence de la mise au mille élevée du laitier (1,5t/tf) et de l'importance des réactions de séchage, de décarbonatation, de déshydratation et de dé-volatilisation qui se déroulent dans le haut-fourneau. La réaction de décarbonatation se traduit par une inflexion des échauffements et l'amorce d'une zone de réserve thermique au voisinage de 800°C.
5. Le bilan thermique permet de déterminer les pertes thermiques (élevées) de ces petits hauts-fourneaux, voisines de 3000MJ/tf. Cette valeur semble cohérente avec les valeurs estimées des pertes thermiques sur d'autres hauts-fourneaux de même type opérant aux XVIII et XIX^{ème} siècles dans plusieurs pays.

6. Enfin, les sondages matières et gaz à l'intérieur du haut-fourneau permettent de compléter l'image de ce haut-fourneau et en particulier des phénomènes de réduction qui s'y déroulent

Bibliographie

1. R.Nicolle Some steps in the early development of coke manufacture & use in France & Belgium Revue de Métallurgie 109, 55–72 (2012) -Der Kokshochofen Entstehung, Entwicklung und Erfolg von 1709 bis in die Gegenwart ISBN: 978-3-8375-0725-6 2014
2. JH.Hassenfratz La sidérotechnie ou l'art de traiter les minerais de fer pour en obtenir de la fonte, du fer et de l'acier 1812
3. CJB.Karsten La métallurgie du fer traduit par FJ.Cullmann seconde édition TII Metz 1830 Thiel editeur
4. JB.Dumas Traité de Chimie appliqué aux arts Tome 1 Tome 4 Atlas Paris 1828
5. Walter de Saint Ange Métallurgie Pratique du fer Paris Mathias 1835-1838
6. M.Salvetat Recueil des travaux scientifiques d'Ebelmen Tome 2 Paris 1855 Mallet-Bachelier
7. RF.Tylecote The charcoal blast furnace and the finery in the prehistory of Metallurgy in the British Isles 213-222 Institute of Metals London 1986
8. E.Flachat A.Barrault J.Petiet Traité de la fabrication du fer et de la fonte 1842 1846
9. Pawlow (M.-A.) – Métallurgie des Roheisens, Moscou (1949) ; VEB Verlag Technik, Berlin (1953).
10. A. de Vathaire Etudes sur le Haut-Fourneau et la métallurgie du fer Paris Libraire Polytechnique J.Baudry 1866
11. S.Jordan Cours et Album du Cours de Métallurgie professé à l'Ecole Centrale des Arts & Manufactures Paris 1874 Baudry
12. R. Nicolle Simultaneous competitive gas-solid kinetics investigation. Journées annuelles SF2M 2011
13. A.Rist JB.Guillot R.Nicolle Chemins de réduction dans le haut fourneau Congrès PCS 78 Versailles vol 3 pp 12-22
14. J.Michard Etude du haut-fourneau cahiers du cessed II 1959

Annexe 1. Laitiers de Hauts Fourneaux anciens

	NOMS des AUTEURS.	SILICE.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	ALUMINE.	OXIDULE de fer.	OXIDULE de manganèse.	PERTE.
	MM.							
a	Berthier.	53,0	15,0	8,0	1,0	11,5	9,3	2,2
b	<i>id.</i>	71,0	7,2	3,2	2,5	4,7	8,0	3,4
c	Bouesnel.	49,6	30,0	>	15,0	3,0	>	2,6
d	<i>id.</i>	39,5	35,6	>	18,0	3,0	>	3,9
e	<i>id.</i>	56,0	22	0,5	11,0	3	4,0	3,5
f	<i>id.</i>	43,0	26,5	trace	21,5	3	5	1
g	Berthier.	52,8	5,6	9,0	3,4	1,4	26,2	1,6
h	<i>id.</i>	40,4	38,4	5,2	11,5	3,8	>	1
i	<i>id.</i>	37,0	38,4	4,2	13,2	1,2	2,6	2
k	Karsten.	70,12	19,71	0,70	6,25	1,45	1,40	0,37
l	<i>id.</i>	49,57	>	15,15	9,00	0,04	25,84	0,32
m	<i>id.</i>	47,39	>	10,22	6,66	0,06	33,96	0,63
n	<i>id.</i>	37,80	>	8,60	2,10	21,50	29,20	0,78
o	Oengren.	61,06	19,81	7,12	5,38	3,29	2,63	0,71
p	Rinmann.	52,520	16,980	19,402	3,516	2,964	5,956	0,662

d'après Karsten (1830) (3)

TABLEAU XLIV. — ANALYSES DE LAITIERS (M. BERTHIER).

	GROSSOUVRÉ.	BIENVILLE.	FRAMONT.	HAMM.	HAMM.	DUDLEY.	DOWLAIS.	HAYANGÉ.
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Silice.....	41,40	15,10	60,00	49,60	48,40	40,60	43,20	33,50
Chaux.....	28,40	27,40	20,60	"	"	32,20	35,20	43,00
Magnésie.....	1,60	2,10	7,20	15,20	16,20	"	4,00	1,00
Alumine.....	17,00	18,20	7,10	9,00	6,60	16,80	12,00	19,60
Protoxyde de fer.....	4,40	1,50	3,90	0,10	0,10	10,40	4,20	1,00
<i>Idem</i> de manganèse.	2,00	"	3,60	25,80	31,00	"	"	1,60
Soufre.....	"	"	"	0,10	0,10	"	"	1,00
TOTAL.....	97,80	97,90	101,80	100,10	99,40	100,00	98,60	99,50

d'après Flachat (1842) (8)

	1 ^o à 17 p. 100 de castine ; dose ordinaire.	2 ^o à 26 p. 100 de castine.	3 ^o à 38 p. 100 de castine.
	Laitier vitreux.	Laitier vitreux.	Laitier litholde.
Silice.	54,1	45,8	41,3
Alumine.	6,7	4,0	6,2
Chaux.	26,9	42,0	44,5
Protoxide de manganèse.	11,6	7,2	7,5
Protoxide de fer.	0,2	0,1	0,1
Soufre et perte.	0,5	0,9	0,4
	<u>100,0</u>	<u>100,0</u>	<u>100,0</u>
	Fonte grise.	Fonte grise.	Fonte grise.
Silicium.	2,26	1,30	1,30
Carbone libre.	3,33	3,62	3,62

d'après Karsten cité par Dumas (1830) (4)

Le tableau suivant présente la composition des scories de quelques forges catalanes, d'après M. Berthier.

	1	2	3	4	5	6
Silice.	0,290	0,270	0,416	0,238	0,333	0,496
Chaux.	0,088	0,134	0,010	0,030	0,000	0,018
Magnésie.	0,015	0,018	0,034	0,016	0,024	0,020
Alumine.	0,032	0,010	0,020	0,074	0,030	. . .
Protox. de manganèse.	0,176	0,192	0,078	0,032	0,033	0,040
Protoxide de fer.	0,377	0,362	0,442	0,300	0,567	0,430
Fer métallique. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,310	. . . . .	. . . . .
	<u>0,976</u>	<u>0,986</u>	<u>1,000</u>	<u>1,000</u>	<u>0,979</u>	<u>1,004</u>

d'après Dumas(1830) (4)

	<i>Dowlais.</i>		<i>Dudley.</i>	<i>St.-Etienne.</i>	
	De bonne fonte.	De mauvaise fonte.		De fonte grise.	De fonte blanche.
Silice.	40,4	37,0	41,6	36,6	38,8
Chaux.	38,4	38,4	37,2	36,4	37,0
Manganèse.	5,2	4,2	"	4,8	3,2
Alumine.	11,2	13,2	15,4	18,4	15,2
Protox. de mangan.	"	2,6	2,0	"	"
Id. de fer.	3,8	1,2	3,4	"	4,4
Sulfure de calcium.	"	2,0	"	3,4	1,6
	<u>99,0</u>	<u>98,6</u>	<u>99,6</u>	<u>99,6</u>	<u>100,2</u>

Laitiers de HF au coke d'après Dumas (1830) (4)

Table 106 Composition of charcoal blast furnace slags

Ref.	14 Panningridge, Sussex	38 Angidy Valley, Gwent	18 Coed Ithel, Gwent	39 Michael's Wood, Glos.	11 Pippingford, Sussex	13 Allensford, Northumb.	40 Shifnal, Salop.
%	16th cent.	18th cent.	17th cent.		16th cent.	17th cent.	
FeO	nil	2.17	4.75	1.49	7.30	9.71	5.0
Fe ₂ O ₃	0.05	0.33	—	—	—	0.71	0.4
SiO ₂	45.5	48.90	(62.8)	58.83	52.7	48.25	51.8
Al ₂ O ₃	19.2	8.31	7.3	8.67	13.4	20.33	18.2
MnO	4.85	0.46	0.4	0.46	3.4	1.38	2.3
CaO	20.6	30.69	15.9	17.66	16.8	6.81	13.5
MgO	9.6	4.97	8.4	9.14	2.6	2.65	5.0
P ₂ O ₅	tr.	—	0.13	—	0.1	—	0.1
S	0.12	0.10	0.01	—	0.14	—	—
TiO ₂	—	0.40	0.30	—	1.10	0.77	0.77
K ₂ O	—	2.50	—	3.61	2.20	3.09	—
C	—	0.10	—	—	—	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	1.79	—
Total	99.95	98.93	100.0	99.86	99.74	99.11	97.00

() = by difference; — = not determined; tr. = trace

Table 106—*continued*

Ref.	41 Cannock, Staffs.	43 Rievaulx, Yorks.	44 Sharpley Pool, Worcs.	45 Rockley Yorks.	46 Charlcot, Salop.	43 Melbourne, Derbys.	47 Duddon, Cumbria
%	16–17th cent.	16–18th cent.	17th cent.	17–18th cent.	18th cent.	18th cent.	18–19th cent.
FeO	4.37	—	2.70	—	—	—	2.60
Fe ₂ O ₃	—	—	nil	—	—	2.57	—
SiO ₂	49.66	45.3	49.30	45.9	52.5	41.6	56.4
Al ₂ O ₃	23.16	22.48	11.4	19.07	20.17	22.73	12.4
MnO	3.29	1.17	0.84	2.95	1.86	3.01	9.8
CaO	11.92	22.8	22.8	18.4	17.0	14.12	14.6
MgO	7.16	3.69	12.0	9.19	4.57	14.19	3.6
P ₂ O ₅	0.07	0.055	tr.	0.50	—	0.023	—
S	0.1	0.22	tr.	0.16	0.01	0.227	—
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—
K ₂ O	—	—	2.0	—	—	—	—
C	—	—	—	—	—	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—
Total	99.73	95.72	101.04	96.17	96.11	98.47	99.40

The charcoal blast furnace and the finery in the prehistory of Metallurgy in the British Isles 213-
222 RF.Tylecote Institute of Metals London 1986 (7)