

Les limites de la consommation de carbone d'un haut-fourneau

Joseph Martin et Pierre Wauters, professeurs émérites UCL

joseph.martin@uclouvain.be

pierre.wauters@uclouvain.be

1. Données factuelles

La consommation de carbone dans les hauts-fourneaux a connu une décroissance importante au cours de la seconde moitié du vingtième siècle. Au milieu des années cinquante, la consommation de coke était de l'ordre de *1250 kilos par tonne de fonte* avec un objectif de moins de *1000 kilos de coke par tonne de fonte*. Au milieu des années soixante, cet objectif était largement atteint, la consommation étant devenue *750 kilos de coke par tonne de fonte*.

Vers la fin des années soixante, l'injection dans les hauts-fourneaux de fuel résiduel, en provenance des raffineries à une époque de pétrole abondant et bon marché, a conduit à des valeurs encore plus basses atteignant typiquement une combinaison de *600 kilos de coke et 50 kilos de fuel par tonne de fonte*.

Sous la pression de l'instabilité du marché de l'énergie entraînée par les chocs pétroliers des années septante, l'industrie sidérurgique a mis en œuvre diverses mesures visant à diminuer ses consommations énergétiques. A la fin des années septante le haut-fourneau consommait *475 à 500 kilos de coke et 50 à 25 kilos de fuel par tonne de fonte*, la répartition de la source de carbone entre le fuel et le coke se faisant suivant les fluctuations des prix du marché. Au milieu des années quatre-vingt apparaît la substitution du carbone "fuel" par du carbone "gaz" et puis du carbone "charbon". Ce dernier combustible, injecté sous forme pulvérisée au niveau des tuyères, va se substituer progressivement au coke pour devenir la source principale de carbone utilisé à la fois comme réactif et comme source d'énergie nécessaire à la réaction de réduction des oxydes de fer. On atteint, au milieu des années nonante, une consommation de l'ordre de *350 kilos de coke et 150 kilos de charbon par tonne de fonte*.

Au début du vingt et unième siècle, on peut adopter, comme combinaison optimale des réactifs du haut-fourneau, une charge de *230 kilos de coke minéral et 40 kilos de coke végétal* combinée à l'injection de *180 kilos de charbon pulvérisé et 50 kilos de gaz naturel*.¹

En un demi-siècle, la consommation du haut-fourneau est ainsi passée de *1250 kilos de coke par tonne de fonte* à *500 kilos de mélange d'agents réducteurs*. En termes d'énergie, on a réduit la consommation de *41 à 18 GJ /tonne de fonte*. Ces chiffres ne révèlent qu'une partie des progrès réalisés sur le seul plan des consommations d'énergie et de matières premières, le remplacement du coke par le charbon ayant un impact environnemental indiscutable tant au

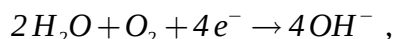
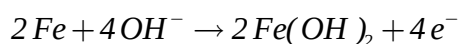
¹ C.P. Manning and R.J. Fruehan, Emerging Technologies for Iron and Steelmaking, JOM, 53(10, 2001), pp.20-23.

plan énergétique qu'au niveau des émissions toxiques imputables aux fours à coke, aussi performants soient ces derniers.

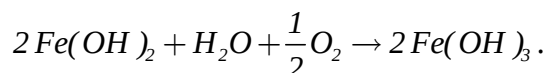
Devant une telle évolution, on peut se demander, hors considérations sur la disponibilité et l'extraction de minerai aussi bien que sur la chaîne des traitements aboutissant à la mise en forme des produits finis, s'il existe encore une marge de progrès. Quels moyens permettraient d'atteindre un minimum de consommation d'énergie dans la sidérurgie de base dont les principes ont permis à l'homme de produire du fer à partir de minerai il y a près de cinq millénaires ? Quelle valeur positive faut-il donner à ce minimum? On peut répondre assez simplement à cette question en considérant la physicochimie des éléments mis en jeu.

2. Le bilan d'enthalpie de la production de fer par réduction de l'oxyde ferrique

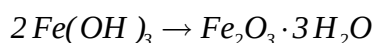
Comme le disait mon professeur de métallurgie, "sur notre planète, l'état naturel du fer, c'est la rouille". Mais encore, qu'est-ce que cela veut dire ? Simplement le fait que l'oxygène (de l'air) et l'eau (minérale ou de pluie, de rivière ou encore des océans) réagissent de façon irréversible avec le fer pour le transformer en un complexe d'oxyde hydraté, conformément au mécanisme électrochimique lent :



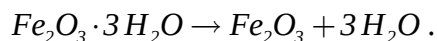
suivi de la réaction rapide :



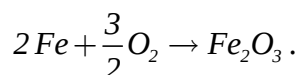
Ces réactions aboutissent à la formation d'oxyde ferrique hydraté :



qui donne de l'oxyde ferrique par déshydratation :



En éliminant les composés intermédiaires pour ne considérer que les réactifs de départ et le produit final, on peut écrire l'équation de bilan global :

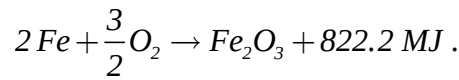


On notera que l'oxyde ferrique résultant de cette réaction lente de corrosion peut aussi être obtenu directement lorsque du fer en fusion est mis en présence d'oxygène, comme dans le procédé d'oxycoupage utilisé couramment en atelier.

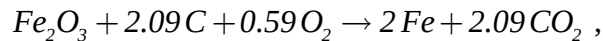
Compte tenu de la valeur de l'enthalpie standard de l'oxyde ferrique :

$$\mathcal{H}_{273}^0(Fe_2O_3) = -822.2 \text{ MJ / kmole } Fe_2O_3,$$

la réaction d'oxydation du fer en oxyde ferrique est exothermique :



Si on considère la réaction inverse dans l'optique d'un simple bilan d'énergie, la production de *116 kilos de fer* par réduction de *164 kilos d'oxyde ferrique* consommerait *822.2 MJ*. La production d'une tonne de fer par réduction directe (hypothétique) de son oxyde ferrique impliquerait donc au minimum une consommation énergétique de *7.09 GJ*, ce qui se traduirait par une consommation de *215 kilos de carbone par tonne de fer*. La réaction de réduction de l'oxyde ferrique au moyen de carbone avec apport d'oxygène pour assurer l'autosuffisance énergétique correspondrait à l'équation de bilan suivante :

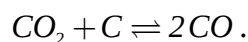


dans laquelle on peut vérifier que l'enthalpie standard des réactifs a bien la même valeur que celle de l'enthalpie standard des produits de la réaction, puisque l'enthalpie standard du dioxyde de carbone a pour valeur :

$$\mathcal{H}_{273}^0(CO_2) = -393.5 \text{ MJ / kmole } CO_2.$$

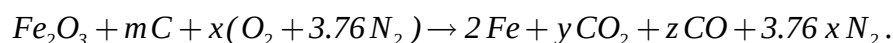
3. La formation de l'atmosphère réductrice nécessaire à l'obtention du fer

Les lois d'équilibre chimique régies par le second principe de la thermodynamique rendent impossible la réaction considérée ci-avant, car la réduction de l'oxyde ferrique implique qu'il soit au contact d'une atmosphère réductrice. Une telle atmosphère ne peut exister que si le dioxyde de carbone reste en contact avec du carbone, ce qui implique la formation de monoxyde de carbone conformément à l'équilibre de Boudouard :



Il faut donc doser judicieusement les apports respectifs d'oxygène et de carbone pour maintenir le caractère réducteur de la zone de réaction.

Le problème peut être abordé simplement en considérant l'équation de stoechiométrie comme suit :



A cette équation correspondent les bilans de matière suivants :

$$\text{- pour le carbone : } z + y = m; \quad (1)$$

$$\text{- pour l'oxygène : } z + 2y - 2x = 3. \quad (2)$$

Par ailleurs, compte tenu de l'enthalpie standard du monoxyde de carbone qui vaut :

$$\mathcal{H}_{273}^0(CO) = -111.1 \text{ MJ / kmole } CO,$$

de l'enthalpie de la fonte en fusion à une température d'environ 1250 °C :

$$h_{1250}(Fe_{liq}) \approx 35 \text{ MJ / kmole } Fe \approx 70 \text{ MJ / kmole } Fe_2O_3$$

et de l'enthalpie sensible des gaz quittant la zone de réduction à la température t :

$$\begin{aligned} h_t(gaz) &\approx (z c_{pCO} \Big|_0^t + y c_{pCO_2} \Big|_0^t + 3.76 x c_{pN_2} \Big|_0^t) t \text{ MJ / kmole } Fe_2O_3 \\ &\approx z h_{CO} + y h_{CO_2} + 3.76 x h_{N_2} \text{ MJ / kmole } Fe_2O_3, \end{aligned} \quad (3)$$

le bilan d'énergie impose d'écrire la relation :

$$(h_{CO} - 111.1)z + (h_{CO_2} - 362)y + 3.76 h_{N_2} x = -892.2. \quad (4)$$

Les équations (1), (2) et (4) peuvent être considérées comme un système linéaire aux inconnues x , y et z . Pour résoudre ce système d'équations, il faut utiliser le paramètre m de l'équation (1), qui n'est autre que la transcription en un coefficient molaire de la consommation M_C de carbone (en *kilos de carbone par tonne de fer*), conformément à la relation suivante dans laquelle apparaissent les masses molaires 58 du fer et 12 du carbone:

$$m = \frac{M_C}{1000} \frac{2 \cdot 58}{12}. \quad (5)$$

Aux valeurs de x , y et z solutions du système d'équations {(1) (2) (4)} correspondent les fractions molaires des composants du gaz constituant l'atmosphère réductrice recherchée :

$$[CO] = \frac{z}{z + y + 3.76x} \quad ; \quad [CO_2] = \frac{y}{z + y + 3.76x} \quad ; \quad [N_2] = \frac{3.76x}{z + y + 3.76x}. \quad (6)$$

On peut en déduire la valeur du rapport :

$$K = \frac{[CO]^2}{[CO_2]} = \frac{z^2}{y(z + y + 3.76x)} \quad (7)$$

qui n'est autre que la constante d'équilibre de la réaction de Boudouard. Le calcul de cette grandeur permet de déterminer pour une pression donnée les conditions de température qui prévalent au sein de la zone de réduction du haut-fourneau.

A la pression atmosphérique, on peut exprimer la constante d'équilibre en fonction de la température comme suit :

$$K = \exp\left(21.109 - \frac{20747}{t + 273.15}\right). \quad (8)$$

A ce stade du calcul, une boucle d'itération sur la température peut être introduite pour modifier dans le sens adéquat les valeurs des enthalpies sensibles (3) et les coefficients numériques qui en découlent dans l'équation (4), afin d'obtenir la valeur de la température donnée par la relation (8). Ce calcul a été fait pour des valeurs typiques de la consommation Les limites de la consommation de carbone d'un haut-fourneau. J. Martin et P. Wauters Octobre 2012

de carbone au cours de la seconde moitié du vingtième siècle. Le résultat en est résumé au tableau 1.

<i>Année</i>	<i>1955</i>	<i>1960</i>	<i>1965</i>	<i>1970</i>	<i>1980-2000</i>
<i>Carbone kg C / tonne Fe</i>	<i>1250</i>	<i>1000</i>	<i>750</i>	<i>600</i>	<i>500</i>
<i>Air m_N^3 / tonne Fe</i>	<i>4735</i>	<i>3815</i>	<i>2835</i>	<i>2240</i>	<i>1890</i>
<i>Gaz m_N^3 / tonne Fe</i>	<i>6075</i>	<i>4885</i>	<i>3640</i>	<i>2890</i>	<i>2425</i>
<i>[CO] -</i>	<i>0.346</i>	<i>0.318</i>	<i>0.283</i>	<i>0.249</i>	<i>0.204</i>
<i>[CO₂] -</i>	<i>0.039</i>	<i>0.065</i>	<i>0.101</i>	<i>0.139</i>	<i>0.181</i>
<i>PCI_{gaz} MJ / m_N^3</i>	<i>4356</i>	<i>4004</i>	<i>3571</i>	<i>3138</i>	<i>2564</i>
<i>température ° C</i>	<i>765</i>	<i>730</i>	<i>700</i>	<i>675</i>	<i>645</i>
<i>Energie brute GJ/tonne Fe</i>	<i>41</i>	<i>32.8</i>	<i>24.6</i>	<i>19.7</i>	<i>16.4</i>
<i>Energie nette GJ/tonne Fe</i>	<i>14.5</i>	<i>13.2</i>	<i>11.6</i>	<i>10.6</i>	<i>10.2</i>

Tableau 1

On constate que les évolutions de la consommation de carbone et de la quantité d'énergie brute nécessaire à la production de fonte ont été spectaculaires dans les années cinquante à septante, mais se sont ensuite tassées pour ne pratiquement plus varier depuis les années quatre-vingt. Le progrès majeur de la fin du vingtième siècle réside surtout dans la substitution du coke par le charbon, dont le bénéfice énergétique n'est pas pris en compte dans cette étude.

Si on se réfère à l'énergie nette consommée, obtenue en déduisant de la consommation de carbone la valorisation énergétique du gaz, le tassement de l'efficacité énergétique est encore plus marqué. On observe par ailleurs que la diminution de la consommation de carbone va de pair avec la diminution de la quantité de gaz à valoriser et de son pouvoir calorifique inférieur.

Enfin, on ne peut manquer d'être interpellé par la tendance asymptotique que présente l'évolution de la quantité d'énergie nette utilisée qui est passée du double de la valeur minimale absolue à pratiquement moins d'une fois et demi ce seuil. Cette consommation ne pourra guère plus diminuer du fait des lois physicochimiques intégrant le second principe de la thermodynamique aux contraintes. Cette constatation constitue à l'évidence la réponse à la question posée sur la marge résiduelle de progrès.