

Facilitateur URE - Article de Fond

Ir. Jacques Michotte - 3j-Consult s.a.

L'excès d'air dans la combustion peut nuire à la santé ... de votre porte-monnaie !

Dans la première partie de cet article, nous avons expliqué les notions importantes pour comprendre en quoi l'air comburant joue un rôle déterminant sur la consommation des procédés thermiques industriels tels que les fours et séchoirs. Nous allons examiner maintenant comment on peut agir sur le rendement de combustion.

Seconde partie : La maîtrise du rapport air/gaz, l'air parasite, le préchauffage de l'air et la suroxygénation. Leur maîtrise permet de gagner beaucoup d'argent !

4. Maîtrise du rapport air/gaz

La maîtrise de la valeur de consigne du rapport air/gaz suppose en tout premier lieu de connaître le pouvoir calorifique du gaz naturel dont on dispose. En effet, on notera tout d'abord que le rapport air/gaz stœchiométrique des gaz naturels distribués en Belgique est quasiment proportionnel au pouvoir calorifique de ceux-ci. Ainsi, lorsque le pouvoir calorifique du gaz varie de 2 ou 3% (ce qui est relativement courant), la consigne de rapport air/gaz devrait être adaptée dans la même proportion. Malheureusement, l'utilisateur ne connaît généralement pas, en temps réel, la valeur précise du pouvoir calorifique du gaz qu'il brûle. Le distributeur met à disposition du consommateur le suivi de l'analyse chimique et du pouvoir calorifique du gaz typiquement jour par jour et de manière différée (via son site ou par courrier). Cette information différée n'aide pas vraiment le consommateur qui doit régler son four en temps réel. Les gros consommateurs ont alors recours à un appareil de mesure de type Wobbemètre ou "comburimètre" qui, en liaison avec la régulation, permet d'adapter, en temps réel, la valeur de la consigne de rapport air/gaz. Alternativement, la mesure de l'oxygène résiduel dans les fumées permet théoriquement d'adapter le rapport air/gaz. Ceci est surtout vrai pour une chaudière par exemple mais est difficilement applicable aux grosses installations thermiques industrielles. En effet, si une chaudière peut être maintenue presque totalement étanche, ce n'est pas le cas d'un gros four de sidérurgie. Dans ce dernier cas, la mesure de la teneur en oxygène n'est pas seulement représentative de l'excès d'air aux brûleurs mais aussi des entrées d'air parasite dans la chambre du four. C'est pourquoi, les tentatives de réglage de l'excès d'air, en temps réel, au moyen d'une sonde à oxygène se sont souvent soldées par un échec.

A titre indicatif, considérons par exemple un four au gaz naturel fonctionnant avec un excès d'air (20°C, sec) de 5% et dont les fumées sortent à 900°C. Admettons que le pouvoir calorifique du gaz chute de 3% sans que le gestionnaire du four n'en soit averti. Cette diminution de 3% du pouvoir calorifique du gaz revient à fonctionner avec un "excès d'excès d'air" de $5 + 3 = 8\%$. On peut alors calculer que le rendement de combustion chute de 58.4% à 57.4% soit une consommation supplémentaire de $100 \times (58.4/57.4 - 1) = 1.7\%$, soit près de 2% de consommation supplémentaire ce qui n'est vraiment pas négligeable.

Concernant la qualité des mesures de débits d'air et de gaz pour la régulation du rapport air/gaz, considérons que les mesures ont dérivé toutes deux de 3% mais par défaut pour l'air et par excès pour le gaz. Cela revient à dire que la mesure d'air est sous-estimée de 3% tandis que celle du gaz est surestimée de 3% et donc à appliquer un rapport air/gaz surestimé de $(103/97 - 1) \times 100 = 6.2\%$ et à augmenter l'excès d'air au brûleur de sa valeur visée de 5% (comme ci-avant) à une valeur réelle 11.5%. Cette augmentation involontaire du rapport air/gaz induit une diminution du rendement de combustion de 58.4% à 56.2% soit une augmentation de la consommation de gaz de $100 \times (58.4/56.2 - 1)$ ce qui fait près de 4%. Quand on pense que les diaphragmes de mesures couramment mis en œuvre dans l'industrie sont dimensionnés pour les débits nominaux des brûleurs et que l'erreur de mesure annoncée est de l'ordre de 2% du fond d'échelle, on imagine les erreurs que l'on peut avoir lorsqu'un four fonctionne à bas régime et que cette erreur de 2% se rapporte à un débit qui vaut $1/5^{\text{ième}}$ du débit nominal. Voilà pourquoi le soin apporté au choix des moyens de mesures (diaphragme, Venturi, tuyère), à leur bon dimensionnement, à leur bonne installation (respect des longueurs droites en amont et en aval) et à leur bon entretien est capital pour maîtriser correctement l'air comburant. En pratique, des mesures de concentration en oxygène dans la chambre du four permettent de recouper les mesures de débits mais seulement si la chambre est suffisamment étanche que pour éviter des entrées d'air parasite. Malheureusement, le régime d'un four ayant généralement une nette influence sur la tenue en pression de la chambre et donc les entrées d'air, les mesures d'oxygène sont souvent peu représentatives du réglage du rapport air/gaz. Reste alors la possibilité de recourir aux mesures de pressions d'air et de gaz à l'entrée des brûleurs et à les comparer avec celles recommandées par le fabricant, à différents régimes.

Enfin, au sujet de la connaissance de l'état réel de l'air comburant, voyons par exemple la conséquence du fait que l'on fasse l'hypothèse que l'air est toute l'année à 20°C et est sec (hypothèse couramment faite d'ailleurs). Si l'on considère que notre four relâche toujours ses fumées à 900°C et reste réglé à 5% d'excès d'air, le rendement de combustion théorique est toujours de 58.4% comme ci-dessus. En été, les jours où l'air est en réalité à 30°C et 80% d'humidité relative, le fait de ne pas adapter le rapport air/gaz à l'état réel de l'air a pour conséquence d'augmenter la concentration des fumées en vapeur d'eau (de 17.7% à 20.8%) et de diminuer la concentration en oxygène des fumées (de 1.1% à 0.3% sur fumées sèches). On constate alors que :

- tout ce passe comme si, la vapeur d'eau prenant une partie de la place de l'oxygène dans l'air, l'excès d'air passait de 1.05 à 1.01;
- le rendement de combustion diminue de 58.4% à 58.1% ce qui implique une augmentation de la consommation de 0.4%. C'est léger mais pas vraiment négligeable;
- il y a un accroissement du risque de passage en atmosphère réductrice, surtout si, simultanément, le pouvoir calorifique augmente légèrement sans qu'on le sache.

5. Maîtrise de l'air parasite

La chambre d'un four industriel comporte toujours des ouvertures telles que :

- la périphérie des portes d'enfournement et de défournement des produits;
- les passages des fusées de rouleaux éventuels;
- les raccordements entre longerons fixes et mobiles (bacs à eau);
- les orifices de pénétrations des quilles de chenets mobiles (bacs à eau);
- les intervalles entre jupes d'étanchéité plongées dans les bacs à eau ou à sable;
- les fissures dans les réfractaires de voûte;
- les orifices de pénétrations de cannes pyrométriques;
- etc.

Les constructeurs de fours débordent d'imagination pour tenter de résoudre tous ces problèmes d'étanchéité. Malheureusement, toutes les solutions mises en œuvre sont toujours le résultat d'un compromis entre efficacité et coût de réalisation et de maintenance. L'étanchéité de la chambre n'est donc jamais parfaite et, pour éviter les entrées d'air parasite, l'on équipe le plus souvent le four d'une régulation de pression qui positionne le registre de fumée de manière à maintenir une légère surpression dans la chambre. Ainsi, on est théoriquement à même de maintenir un léger flux de fumées sortantes par les ouvertures plutôt que des entrées d'air. Les fumées sortantes n'auront pas nécessairement été bien "épuisées" dans la chambre c'est-à-dire qu'elles pourront éventuellement quitter la chambre à une température supérieure à celle des fumées qui vont à la cheminée. Cette différence de température constitue bien évidemment une perte de rendement de combustion puisque cela revient à considérer que la température moyenne des fumées sortantes de la chambre est supérieure à celles des fumées allant à la cheminée. Néanmoins, il vaut généralement mieux perdre un peu de fumée que d'admettre des entrées d'air. En effet, les entrées d'air parasite ont pour effet direct :

- d'augmenter l'excès d'air global du four;
- de créer des zones froides dans la chambre (hétérogénéité de température);
- d'augmenter l'oxydation des produits, le cas échéant (cas de l'acier par exemple).

Quant aux sorties de fumées, elles ont pour conséquence :

- de créer un point chaud dans la structure du four, là où elles s'échappent;
- de réduire légèrement le rendement de combustion.

C'est pourquoi, le choix d'une valeur de consigne pour le réglage de la pression dans la chambre d'un four est lui-même le compromis entre les sorties de fumées et les entrées d'air :

- trop de pression implique de risquer de brûler certains composants du four tels que les portes ou les jupes d'étanchéité. On risque parfois même de mettre en péril des éléments de la structure du four;

- trop peu de pression engendre rapidement des entrées d'air importantes avec les conséquences mentionnées ci-dessus.

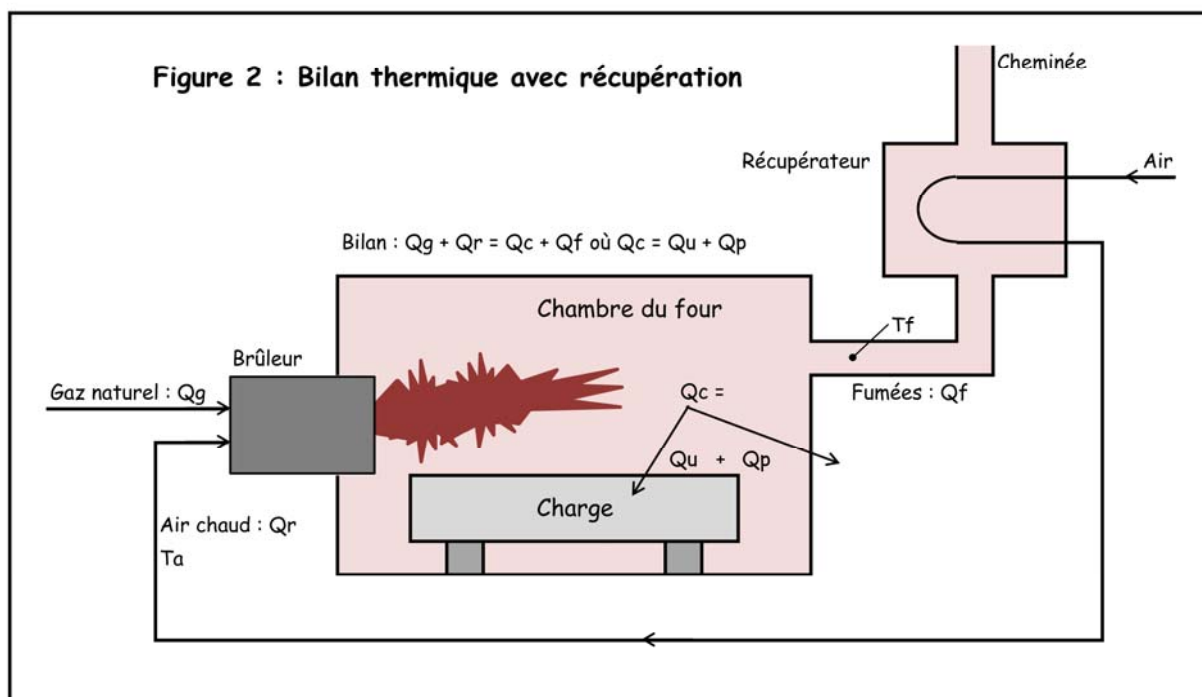
On notera au passage que, vu les températures respectives des fumées sortantes (la t° du four) et celle de l'air parasite (la t° ambiante), la masse volumique (ou la densité) des fumées est beaucoup plus faible que celle de l'air ambiant. On retiendra par exemple que la masse volumique de fumées à 900°C est inférieure à 0.3 kg/m^3 alors que celle de l'air sec à 20°C est d'environ 1.2 kg/m^3 . Ainsi, pour une différence de pression Δp donnée en valeur absolue soit par exemple 10 Pa , s'il s'agit d'une surpression, un orifice d'un dm^2 permettra la fuite de 88 kg de fumées par heure alors que s'il s'agit d'une dépression, le même orifice donnera lieu à une entrée d'air parasite de 176 kg d'air froid par heure. Comme la régulation de température du four réagira pour ramener cet air à la température de la chambre, on voit que la dépression engendrera une surconsommation sensiblement plus élevée que la surpression. C'est pourquoi, on cherche généralement à maintenir tous les points de la chambre en légère surpression.

Voyons enfin ce que peut coûter une entrée d'air. Imaginons un four à 900°C fonctionnant avec un excès d'air de 5% et développant une puissance thermique de 10 MW (environ $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de gaz naturel). Pour un gaz naturel typique, le rapport air/gaz est alors d'environ 10.3 , ce qui correspond à un débit d'air comburant de $10.3 \times 1000 = 10300 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Si le bas de la porte d'enfournement présente une fente de 4 mètres de large sur 5 cm de haut et qu'il s'y trouve une dépression de 5 Pa seulement (0.5 mmCE , moins qu'un léger courant d'air), le débit d'air parasite qui s'y engouffrera est d'environ $2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ soit plus de 19% du débit d'air comburant. Tout se passe alors comme si le rapport air/gaz n'était pas de 10.3 mais bien de $10.3 \times 1.19 = 12.3$. Ceci implique que notre rendement de combustion chute de 58.4 à 51.8 ce qui correspond à une augmentation de la consommation de gaz de $100 \times (58.4/51.8 - 1)$ soit environ 13% .

6. Préchauffage de l'air

Le préchauffage de l'air comburant par récupération de la chaleur des fumées constitue un moyen radical pour augmenter le rendement de combustion.

Dans ce cas la définition du rendement de combustion peut être adaptée en examinant la figure ci-dessous :



3j_TBX_GazNaturel_PROFUREN_T_20110906_JMi.xls

06/09/2011 Figure_2

Cette fois, le bilan de la chambre doit tenir compte de la puissance thermique Qr apportée par l'air comburant préchauffé dans le récupérateur :

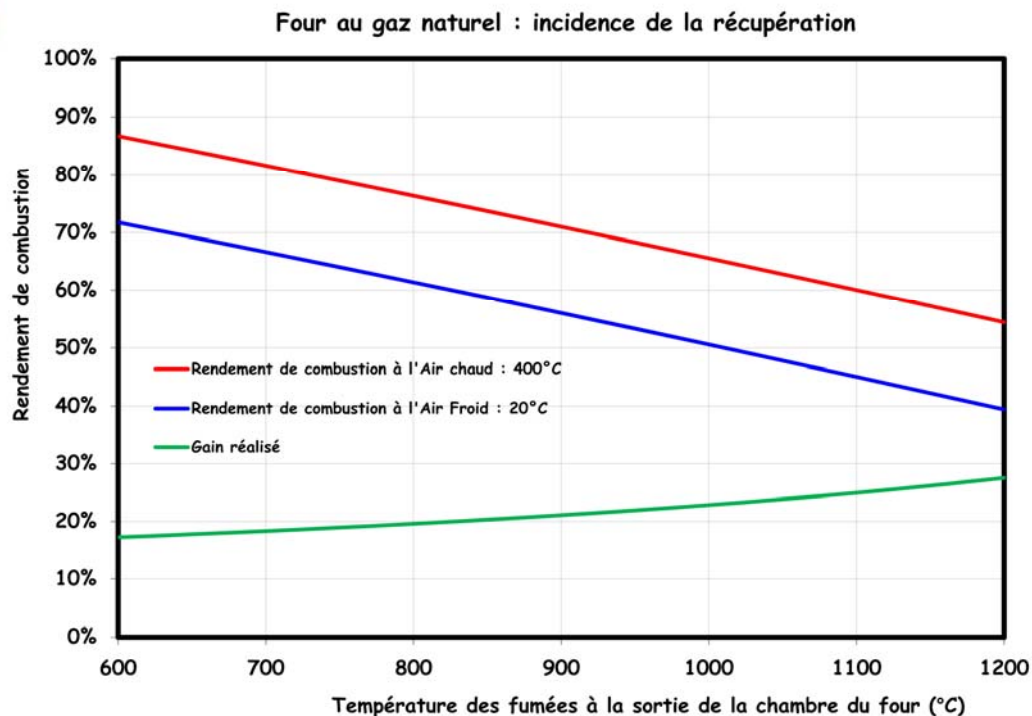
$$Qg + Qr = Qc + Qf$$

et le rendement de combustion devient :

$$\text{Rendement de combustion} = 1 - \frac{(Qf - Qr)}{Qg}$$

ce qui revient à "corriger" la perte à la cheminée Qf en la diminuant de la puissance thermique récupérée Qr via le préchauffage de l'air comburant.

Voyons par exemple quel peut être le gain réalisable au moyen d'un récupérateur centralisé qui préchauffe l'air comburant à une température de l'ordre de 400°C (aux brûleurs). Le graphique ci-dessous illustre une évolution typique des rendements de combustion en fonction de la t° à laquelle les fumées quittent la chambre du four et ce, sans (en bleu) et avec (en rouge) récupération. La courbe verte donne les gains de consommation correspondants :



3j_TBX_GazNaturel_PROFUREN_T_20111108_JMi.xls

08/11/2011 G_Gain_AC

On voit que, dans ces conditions particulières (air humide et excès d'air de 10% ici), un four dont les fumées sortent par exemple à 900°C, a un rendement de combustion de 56% à l'air froid et de près de 71% à l'air chaud (400°C). Le gain sur la consommation s'élève alors à $100 \times (1 - 56/71)$ soit plus de 21%.

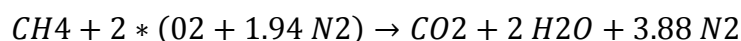
Le recours à des brûleurs régénératifs sur un four de forge à 1300°C permet le préchauffage de l'air à 1000 ... 1100°C ce qui correspond à un rendement de combustion de l'ordre de 75% ... 80% contre 34% à l'air froid. Dans ce cas, le gain de consommation lié à l'installation de brûleurs régénératifs est d'environ $100 \times (1 - 34/77) = 56\%$.

7. Suroxygénation

La suroxygénation de l'air comburant est un autre moyen efficace d'augmenter le rendement de combustion d'un four. En effet, en enrichissant l'air atmosphérique avec de l'oxygène pur, on réduit la proportion d'azote que l'on doit amener à la température de la chambre du four.

Par exemple, en ajoutant 20% d'oxygène à 100% d'air (21% d'O₂ et 79% de N₂) on obtient un comburant contenant environ 34% d'oxygène et 66% d'azote. Le ratio N₂/O₂ passe donc de $79/21 = 3.76$ (voir plus haut) à seulement $66/34 = 1.94$.

L'équation chimique de la combustion stœchiométrique devient alors :



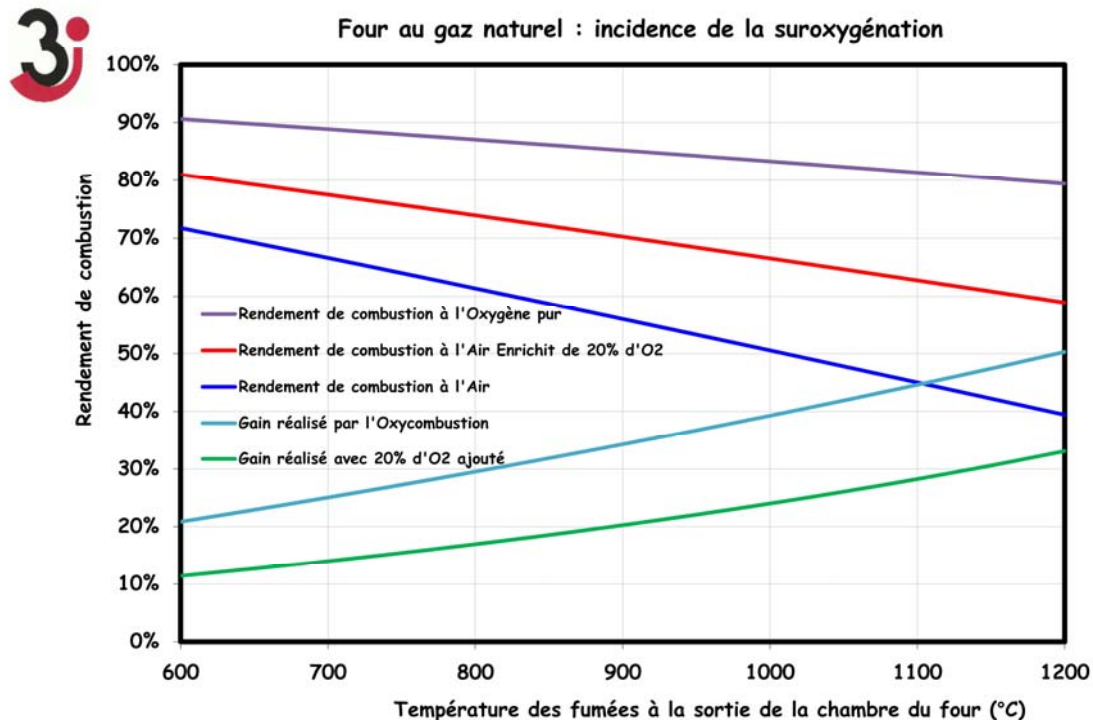
ce qui réduit considérablement le volume d'azote à chauffer. On voit aussi que le rapport comburant/gaz est maintenant de $2 \times (1 + 1.94)$ volumes de comburant pour 1 volume de méthane pur soit 5.88 au lieu de 9.52 à l'air non enrichi.

Le graphique ci-dessous illustre l'évolution du rendement de combustion et du gain réalisable sur un four fonctionnant à l'air enrichi de 20% d'oxygène. On y a aussi tracé les courbes correspondantes pour un four fonctionnant à l'oxygène pur ("oxycombustion") :

3j-Consult s.a.

B-1300 Wavre

jmi@3j-consult.com



3j_TBX_GazNaturel_PROFUREN_T_20111108_JMi.xls

08/11/2011 G_Gain_O2

Pour notre exemple du four dont les fumées sortent par exemple à 900°C, ayant un rendement de combustion de 56% à l'air froid, celui-ci dépasse 70% à l'air enrichi de 20% d'oxygène. Le gain sur la consommation s'élève encore une fois à $100 \times (1 - 56/70)$ soit près de 20%. Dans le cas de l'oxycombustion, le gain, s'élèverait donc à 34% par rapport à l'air froid.

Malheureusement, le coût de l'oxygène par liquéfaction de l'air réduit considérablement l'intérêt économique de ces solutions. Par contre, il faut noter que l'enrichissement de l'air permet d'augmenter significativement le rendement de la chambre du four en augmentant le rayonnement thermique (infra-rouge) des gaz comburés. En effet, à peu de chose près, dans les gaz de combustion ("fumées"), seules les molécules triatomiques telles que CO₂ et H₂O rayonnent dans l'infra-rouge. Les molécules diatomiques d'O₂ et de N₂ ne jouent par contre quasi aucun rôle dans les échanges thermiques, elles font office de "ballast". Ainsi, l'enrichissement de l'air est un moyen d'augmenter la capacité de production d'un four sans l'agrandir pour autant. Il arrive que cette solution soit une alternative économique lorsqu'on ne dispose pas de la place nécessaire pour allonger un four existant.

8. Conclusions

Nous avons examiné, cas par cas, l'incidence de la maîtrise de l'air comburant sur la consommation d'un four. Nous avons montré principalement :

- que le rendement de combustion dépend uniquement de la t° et du volume des fumées produites;
- que pour minimiser le volume des fumées, il faut être attentif au rapport air/gaz appliqué à la régulation : connaissance du pouvoir calorifique du gaz (variable), qualité des mesures de débits d'air et de gaz, connaissance des conditions atmosphériques;
- que la maîtrise des entrées d'air est capitale et qu'elle passe par une bonne conception du four, par la maintenance des éléments d'étanchéité de celui-ci et par la maîtrise de la régulation de pression;
- que le préchauffage de l'air comburant par récupération de la chaleur des fumées permet des économies substantielles (couramment 20%);
- que la suroxygénation de l'air comburant, si elle n'est pas souvent rentable en tant que telle, permet d'augmenter la capacité de production d'un four sans l'agrandir.

Wavre, le 8 novembre 2011.

Ir. Jacques Michotte, facilitateur URE process