
Comment interpréter une analyse des fumées de combustion?

Le présent article traite de l'interprétation d'une analyse chimique des fumées. Par "fumées" on entend ici les gaz produits par la combustion d'un combustible, par exemple le gaz naturel, avec un comburant (le plus souvent l'air).

Les fumées se composent :

- principalement :
 - de gaz carbonique : CO_2 ;
 - de vapeur d'eau : H_2O ;
 - d'azote : N_2 ;
 - d'oxygène : O_2 ;
- marginalement :
 - de monoxyde de carbone : CO ;
 - de carbone suie : C ;
 - d'oxydes d'azote : NO et NO_2 (les "NOx");
 - de dioxyde de soufre et de sulfure d'hydrogène : SO_2 et H_2S (si le combustible contient du soufre).

L'analyse de la composition chimique des fumées est réalisée au moyen d'un analyseur de gaz portable ou a poste fixe. Le plus souvent, les mesures sont réalisées par aspiration d'un échantillon de fumées et après condensation de la vapeur d'eau. On parle alors d'une "analyse sur gaz secs". La teneur en H_2O peut ensuite être calculée en fonction de la composition chimique du combustible (rapport C/H). Le plus souvent, l'analyse est combinée à une mesure de température des fumées, ce qui permet aussi le calcul du rendement de combustion de l'installation, à condition que les mesures soient réalisées par prélèvement de fumées dans la cheminée et qu'il n'y ait pas d'entrée d'air parasite entre le foyer et le point de prélèvement. Les mesures (volumiques) sont généralement données en % pour les composants principaux CO_2 , H_2O , N_2 et O_2 tandis qu'elles sont données en ppm (parts par million) pour les composants marginaux CO , NO_x , SO_2 et H_2S . La présence de carbone suie se mesure par un procédé de filtration des fumées et donne la mesure de l'indice de Bacharach.

Le CO_2 et la vapeur d'eau H_2O sont à proprement parlé les produits de la combustion (l'oxydation) du carbone et de l'hydrogène du combustible par l'oxygène de l'air comburant. L'azote provient directement de l'air comburant puisque l'air est composé (principalement) d'azote (79%) et d'oxygène (21%). Cet azote ne fait que traverser la chambre de combustion ou le four considéré. L'oxygène des fumées provient de l'air en excès par rapport à ce qu'il faudrait mettre pour que tout le carbone et l'hydrogène s'oxyde complètement, ni plus ni moins. S'il n'y a ni excès ni défaut d'air, on parle de "combustion stœchiométrique" et il n'y a théoriquement pas d'oxygène résiduel dans les fumées.

Comme la vapeur d'eau est condensée avant la mesure et que, outre les petites quantités de C , CO , NO_x , SO_2 et H_2S , la somme des concentrations doit être égale à 100%, on voit que l'on a ([X] désignant une concentration volumique en %) :

$$[\text{N}_2] = 100\% - [\text{CO}_2] - [\text{O}_2].$$

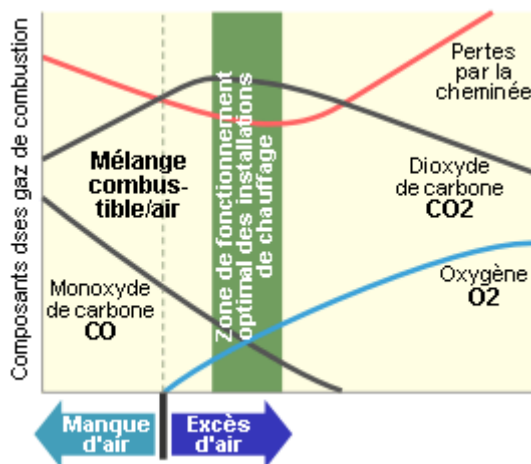
Nous ne parlons pas ici des NOx dont la présence est liée principalement au choix du brûleur, à la température de l'air comburant mais beaucoup moins au réglage de la combustion proprement dit.¹

De même, le SO₂ et l'H₂S, dont la présence est surtout liée à la teneur en soufre du combustible (le charbon et le fuel typiquement) ne sont pas abordés ici.

Ce qui nous occupe donc c'est l'interprétation d'une analyse de fumées (sèches) qui nous donne les concentrations suivantes :

- [CO₂];
- [O₂];
- [CO].

Le graphique qualitatif suivant, extrait du site "Energie-Plus", illustre notre propos :



En abscisse, on a l'excès d'air qui vaut 0 à la stœchiométrie, est positif lorsqu'il y a excès d'air (à droite) et négatif lorsqu'il y a défaut d'air ou "manque d'air" (à gauche). En ordonnée, on a les concentrations en CO₂, O₂ et CO (sur 3 échelles différentes, non représentées ici).

On voit :

- que lorsqu'il y a un excès d'air, il y a de l'oxygène résiduel dans les fumées et que la concentration en CO₂ diminue avec l'excès d'air (dilution par l'air en excès);
- que lorsqu'il y a un manque d'air, il n'y a plus d'oxygène dans les fumées (tout l'oxygène à servi à l'oxydation du combustible) mais que la teneur en CO augmente avec le manque d'air.

La présence de CO signifie qu'une partie du carbone du combustible n'a pas eu l'occasion de s'oxyder complètement pour donner du CO₂. On voit qu'en réalité la présence de CO apparaît déjà lorsque, en réduisant l'excès d'air, on s'approche de la stœchiométrie. Ceci résulte de la difficulté qu'a le CO à s'oxyder en CO₂ s'il n'y a pas un petit surplus d'oxygène en présence dans la flamme. C'est pourquoi, en pratique, on maintient toujours un petit excès d'air (la bande verte du graphique). A droite de cette zone, on dilue inutilement les fumées par de l'air en excès ce qui réduit le rendement de combustion (plus de pertes à la cheminées). On parle dans ce cas de "combustion complète avec

¹ Voir à ce sujet l'article « La réduction des émissions de Nox est-elle compatible avec des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique ? »



Wallonie

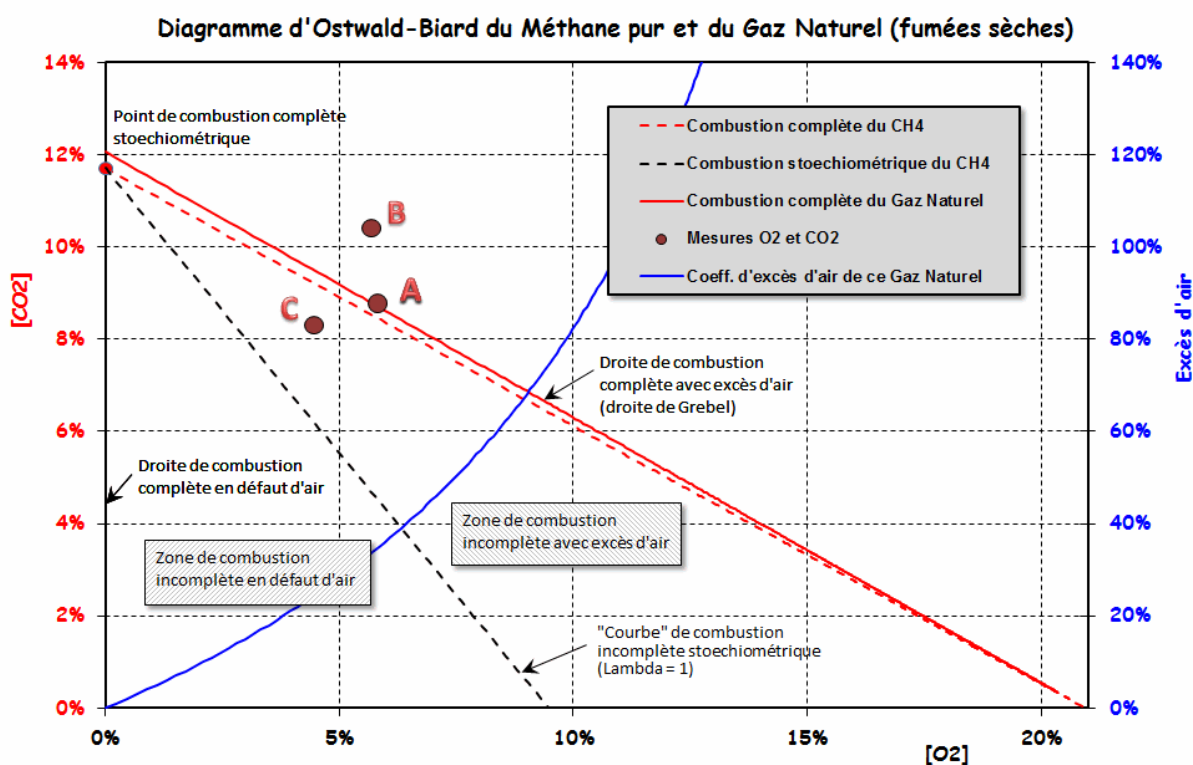


Utilisation Rationnelle de l'Energie
Processus industriel



excès d'air". A gauche de cette zone, une partie du carbone n'est pas complètement brûlé (présence de CO et de carbone suie) ce qui revient à gaspiller une partie du combustible et émettre un gaz (le CO) et des particules dangereux pour la santé. On parle alors de "combustion incomplète".

La chimie de la combustion impose qu'il y ait une relation mathématique entre la teneur en O_2 et celle en CO_2 dans les fumées d'un combustible donné. Plus il y a d'oxygène dans les fumées moins il y aura de CO_2 puisque l' O_2 provient de l'excès d'air et que l'excès d'air revient à une dilution simple des fumées par l'air. Dans un diagramme $CO_2 - O_2$, cette relation mathématique est celle d'une droite dénommée "droite de Grebel". Le diagramme suivant illustre (en rouge) cette droite dans le cas du méthane pur (CH_4) et d'un gaz naturel courant :



Ce diagramme donne aussi la relation (en bleu) entre la teneur en oxygène (abscisse) et l'excès d'air (ordonnée de droite). On voit par exemple que le point de mesure "A" est caractérisé par $[CO_2] = 8.8\%$ et $[O_2] = 5.8\%$ et par un excès d'air de 34% (point situé sur la courbe bleue, à la verticale du point "A"). En principe tous les points d'analyse des fumées doivent se trouver sur la droite de Grebel du combustible concerné. Les points qui ne s'y trouvent pas sont soit significatifs d'une erreur de mesures, soit significatifs d'une combustion incomplète.

Par exemple le point de mesures "B", situé au-dessus de la droite de Grebel, indique qu'il y a une erreur de mesure : il est impossible chimiquement d'avoir autant de CO_2 si l'on a autant d' O_2 .

Le point de mesures "C", situé en-dessous de la droite de Grebel, peut être interprété de deux manières :

- soit il y a une erreur de mesures (comme pour le point "B", mais inverse);
- soit la combustion est incomplète avec excès d'air.

Dans le cas de ce point "C", il faut avant tout s'assurer que l'analyseur est en parfait état et a fait l'objet d'un étalonnage récent. Si c'est le cas, on devrait mesurer simultanément une concentration en CO non négligeable.

Le petit point rouge situé à 0% d'O₂ et 11.7% de CO₂ correspond à la combustion complète stœchiométrique du méthane pur. Son homologue, pour le gaz naturel considéré ici, est situé juste au-dessus.

Enfin, la "courbe" pointillée noire délimite (approximativement) les zones de combustion incomplète avec et sans excès d'air. Ici cette "courbe" est une droite purement illustrative car, en réalité, cette courbe doit être déterminée précisément en fonction de la température des fumées car l'équilibre CO - CO₂ évolue avec cette température.

Terminons en précisant quelques notions concernant la relation entre les %, les ppm et les mg/Nm³. Prenons l'exemple du monoxyde de carbone (CO) :

- 1 ppm = 0.0001 % = 0.000001 volume de CO par volume de fumée (quel que soit d'ailleurs le gaz en question);
- comme la masse molaire du CO est de 12 + 16 = 28 g/mole, on peut déterminer qu'aux conditions normales (1 atm. et 0°C), la masse volumique du CO est de 1249 g/Nm³;
- par conséquent, puisque 1 ppm de CO correspond à 0.000001 volume de CO par volume de fumée, ce même ppm de CO correspond à 1249 g x 0.000001 = 1.249 mg de CO/Nm³ de fumée.

En pratique, on raisonne le plus souvent en % volumique pour le CO₂ et l'O₂, en ppm pour le CO mais aussi en mg/Nm³ pour les NO_x et le carbone suie. L'habitude de raisonner en mg/Nm³ provient des mesures (par pesée) des concentrations en poussières alors que le % de ppm volumique est une habitude de chimiste.

Jacques Michotte
Mars 2013

Pour contacter le service du facilitateur URE Process, formez gratuitement le **0800/97.333**
ou envoyez un mail à facilitateur.ure.process@3j-consult.com