

A dark, silhouetted image of an industrial facility, likely a refinery or chemical plant, against a bright, cloudy sky. The plant features several tall structures, including a prominent vertical tower on the left and various pipes and chimneys emitting plumes of smoke or steam.

Be sure. **testo**



# Guide pratique Analyse de combustion industrielle

Directive pour les mesures d'émissions et de processus  
3<sup>e</sup> édition révisée

## **Droits d'auteur, garantie et responsabilité**

Les informations contenues dans ce guide pratique sont protégées par les droits d'auteur. Tous les droits reviennent exclusivement à Testo SE & Co. KGaA. Les contenus et images ne peuvent être reproduits à des fins commerciales, modifiés ou utilisés / exploités à d'autres fins que celles décrites sans l'accord préalable par écrit de Testo SE & Co. KGaA.

Les informations du présent guide pratique ont été rédigées avec le plus grand soin. Cependant, les informations sont fournies sans engagement et la Testo SE & Co. KGaA se réserve le droit de procéder à d'éventuels modifications ou addendas. La Testo SE & Co. KGaA n'assume donc aucune garantie ou responsabilité quant à l'exactitude et à l'exhaustivité des informations fournies. Toute responsabilité est exclue pour les dommages résultant directement ou indirectement de l'utilisation de ce guide, et ce, dans la mesure où ceux-ci ne résultent pas d'un cas de préméditation ou de négligence grossière.

## Préface

Chers lecteurs,

La détermination des concentrations de gaz de combustion permet la surveillance des valeurs limites des émissions exigées par la législation aux fins de protection de l'environnement. En revanche, les concentrations de gaz qui apparaissent au cours de processus, ou matrices de gaz, sont souvent une très bonne indication de la qualité du processus existant, ce qui, en fin de compte, a une influence considérable sur la qualité des produits.

Le guide pratique explique les bases des processus de combustion courants dans le contexte spécifique de leur utilisation dans les applications

industrielles. Par ailleurs, il décrit les méthodes de mesure existantes, les particularités des tâches de mesure, les grandeurs de mesure et concentrations de gaz habituelles ainsi que leur signification pour les processus. Il se veut être un recueil utile pour l'utilisation d'analyseurs de combustion portatifs dans l'industrie, basé sur les expériences des utilisateurs globaux des appareils de mesure de Testo.

Vos suggestions complémentaires et propositions d'amélioration sont toujours bienvenues chez nous.

Nous vous souhaitons beaucoup de plaisir lors de sa lecture !



Prof. Burkart Knospe,  
Président du directoire

# Sommaire

<b>Préface</b>	<b>1</b>
<b>1 Le processus de combustion</b>	<b>5</b>
1.1 Energie et combustion	5
1.2 Installations de combustion	8
1.3 Combustibles	10
1.4 Air de combustion, coefficient d'air, dilution, valeur de référence	11
1.4.1 Combustion idéale, coefficient d'air, bilan matière	11
1.4.2 Détermination du coefficient d'air	14
1.4.3 Besoin en air de combustion	16
1.4.4 Volume de gaz, effet de dilution, valeur de référence	16
1.5 Gaz de fumée	19
1.6 Pouvoir calorifique supérieur et inférieur, rendement	23
1.7 Point de rosée, condensat	26
<b>2 Analyse des gaz de combustion industriels</b>	<b>29</b>
2.1 Optimisation de la combustion	31
2.2 Contrôle de processus	34
2.2.1 Installations de combustion pour les processus	34
2.2.2 Installations de combustion industrielles	35
2.2.3 Traitement thermique de surface	36
2.2.4 Mesures de sécurité	37
2.3 Contrôle des émissions	38
2.3.1 Bases juridiques en Allemagne	39
2.3.2 Règlements en Allemagne (BlmSchV et TA Luft)	41
2.3.3 Situation aux Etats-Unis	48
2.3.4 Procédés d'épuration des gaz de fumée	50
<b>3 Technique d'analyse de gaz</b>	<b>54</b>
3.1 Termes de la technique d'analyse de gaz	54
3.1.1 Concentration, conditions normales	54
3.1.2 Préparation des échantillons, condensat, chauffage	60
3.1.3 Sensibilité croisée	62
3.1.4 Etalonnage	64
3.2 Analyseurs de gaz	65
3.2.1 Termes et utilisation	65
3.2.2 Principes de mesure	70

<b>4 Applications de l'analyse de gaz industriels</b>	<b>79</b>
4.1 Production d'énergie	80
4.1.1 Installations de combustion aux combustibles solides	80
4.1.2 Installations de combustion au gaz	82
4.1.3 Turbines à gaz	84
4.1.4 Installations de combustion au fioul	86
4.1.5 Centrales à charbon	88
4.1.6 Centrales de cogénération	91
4.1.7 Centrales CCG	93
4.2 Elimination des déchets	94
4.2.1 Incinération des déchets	94
4.2.2 Pyrolyse des déchets	96
4.2.3 Postcombustion thermique	98
4.3 Industrie des produits minéraux non métalliques	100
4.3.1 Fabrication de ciment	100
4.3.2 Fabrication de céramique/porcelaine	102
4.3.3 Briqueteries	104
4.3.4 Fabrication de verre	106
4.3.5 Fabrication de chaux	109
4.4 Industrie métallurgique / minière	111
4.4.1 Installations d'agglomération	111
4.4.2 Production de fer	113
4.4.3 Production d'acier	115
4.4.4 Cokeries	117
4.4.5 Production d'aluminium	119
4.4.6 Traitement thermique de surface	121
4.5 Industrie chimique	123
4.5.1 Installations de combustion pour les processus	123
4.5.2 Raffineries	124
4.5.3 Mesures sur torchères	126
4.5.4 Incinération de résidus	127
4.6 Autres installations	
129	
4.6.1 Installations de crémation	129
4.6.2 Bancs d'essai pour moteurs	130
<b>5 Aperçu des analyseurs de combustion industriels de Testo</b>	<b>131</b>
5.1 L'entreprise	131
5.2 Caractéristiques typiques des appareils	133
5.3 Aperçu des analyseurs de gaz	135
5.4 Aperçu des accessoires	139
Adresses	143
Index	144

## **1 Le processus de combustion**

# 1 Le processus de combustion

## 1.1 Energie et combustion

### Energie

(du grec) signifie « force en action » et est définie comme la capacité d'une matière, d'un corps ou d'un système à produire du travail. On distingue différentes formes d'énergie, en fonction du type d'apparition.

De manière schématique, on peut évoquer six catégories :

- Energie mécanique (eau courante, voiture en mouvement, ressort hélicoïdal)
- Energie thermique (eau en ébullition, flamme de gaz)
- Energie chimique (réactions chimiques, combustion, explosion)
- Energie électrique (batterie automobile, courant électrique)
- Energie électromagnétique (lumière, rayonnement thermique)
- Energie nucléaire (fission nucléaire)

Les différentes formes d'énergie peuvent se transformer l'une dans une autre, la somme de toutes les énergies restant la même dans un système fermé idéal (loi de la conser-

vation de l'énergie). Ce principe est vrai par référence à l'univers comme système. En pratique cependant, la transformation d'énergie produit plus ou moins de pertes qui influencent le rendement du processus de transformation. Les sources d'énergie qui existent dans la nature (charbon, gaz naturel, pétrole, rayonnement solaire, force hydraulique etc.) sont désignées comme énergie primaire, les formes produites par transformation de cette dernière (électricité, chaleur etc.) sont désignées comme énergie secondaire. Les sources d'énergie indiquées ne se distinguent pas seulement selon leur forme mais aussi quant à leur valeur énergétique. C'est pourquoi, en règle générale, on indique la quantité d'énergie qui pourrait être libérée en cas de combustion complète d'une quantité déterminée de la source d'énergie afin de disposer d'une valeur de comparaison. Le tableau 1 contient quelques exemples à ce sujet.

L'unité pour mesurer l'énergie est le joule (J).

## 1 Le processus de combustion

Source d'énergie	Energie contenue [MJ]
1 kg de lignite	9,0
1 kg de bois	14,7
1 kg de houille	29,3
1 m <sup>3</sup> de gaz naturel	31,7
1 kg de pétrole brut	42,6
1 kg de fioul léger	42,7
1 kg d'essence	43,5
Par comparaison 1 kWh	3,6

Tab. 1 : Energie contenue dans différents combustibles

### Conversion d'unités d'énergie :

1 erg	10 <sup>-7</sup> J
1 cal	4,184 J
1 Btu	1055,06 J
Btu :	British thermal unit

### Combustion

La combustion est la transformation de l'énergie chimique primaire liée dans les combustibles, tels que le charbon, le fioul, le bois, en énergie thermique secondaire par le processus d'oxydation. La combustion est donc un terme de la technique énergétique pour désigner la réaction de l'oxygène avec les composants inflammables des combustibles, lors de laquelle de l'énergie est dégagée.

Les combustions se déroulent à des températures élevées (même supérieures à 1000 °C) et produisent un dégagement de chaleur. L'oxygène nécessaire est contenu dans l'air de combustion (ou air comburant) amené. En même temps, un volume considérable de gaz de combustion (fumées) ainsi qu'une certaine quantité de matières résiduelles (cendres, scories) se forment en fonction du type de combustible.

### Oxydation

Désigne toutes les réactions chimiques où une substance se combine avec de l'oxygène. Les oxydations produisent un dégagement d'énergie et ont une grande importance, entre autres en technique (combustion) et en biologie (respiration).

### Effet de serre

En principe, l'effet de serre est un phénomène naturel et la condition qui permet la vie sur Terre. Car sans cet effet, la température moyenne globale près du sol serait aujourd'hui de -18 °C au lieu de +15 °C ; la Terre serait invivable ! La teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère près du sol est la cause principale de ce phénomène naturel : elle laisse passer le rayonnement solaire mais le rayonnement thermique ainsi produit près du sol et dont les ondes sont plus longues, est empêché de s'échapper ; il est réfléchi vers la surface de la Terre. Ce principe est aussi la base du bilan thermique des serres. Cependant, la combustion excessive de combustibles fossiles (émission de dioxyde de carbone) et le dégagement de substances chimiques et agricoles (CFC, méthane et autres) renforcent considérablement cet effet naturel ce qui provoque une lente augmentation de la température terrestre qui influence les conditions climatiques.

Vous trouverez plus de détails au sujet de la combustion au chapitre 1.4.

## 1.2 Installations de combustion

Les installations de combustion sont des installations productrices de chaleur par la combustion de combustibles solides, liquides ou gazeux. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines, par exemple

- aux fins de chauffage (centrales de chauffage et chauffage des bâtiments),
- pour la production d'énergie électrique,
- pour la production de vapeur ou d'eau chaude (utilisation p.ex. dans des installations techniques),
- pour la production de certains matériaux (utilisation p.ex. dans l'industrie du ciment, du verre ou de la céramique),
- aux fins de traitement thermique de surface de pièces métalliques,
- pour la combustion des déchets et matériaux usagés (déchets, pneus usagés et autres).

Cf. les exemples d'application détaillés au chapitre 4.

La combustion a lieu dans un foyer ; les autres composants de l'installation servent à l'alimentation et à la répartition du combustible, à l'alimentation en air comburant, au transfert de chaleur et à l'évacuation des gaz et résidus de combustion (cendres et scories).

Les combustibles solides sont brûlés soit dans un lit fixe, un lit fluidisé ou dans un nuage pulvérisé. Les combustibles liquides sont injectés dans le foyer sous forme de brouillard en commun avec l'air comburant via un brûleur ; les combustibles gazeux sont mélangés à l'air comburant dans le brûleur.

Les gaz de combustion (également appelés "gaz de fumée") des installations de combustion contiennent les produits des réactions entre le combustible et l'air de combustion ainsi que des matières résiduelles, c'est-à-dire - essentiellement - des poussières, des oxydes de soufre et d'azote et du monoxyde de carbone. En cas de combustion de charbon, les gaz de combustion peuvent aussi contenir des HCl et HF, en cas de combustion de déchets aussi les composants de ces derniers (également des HCl et HF mais aussi différents hydrocarbures, des métaux lourds etc.).

Dans le cadre de la protection de l'environnement, les gaz de combustion des installations de combustion sont sujets à des règlements sévères concernant les valeurs limites admissibles de substances nocives telles que les poussières, les oxydes de soufre et d'azote et le monoxyde de carbone présents dans le gaz épuisé (lors du rejet dans l'atmosphère).

Pour pouvoir respecter ces limites, les installations de combustion sont équipées de dispositifs complexes d'épuisement des fumées tels que des filtres à poussière et différents systèmes de dépollution des fumées (appelés aussi laveurs de fumées). En Allemagne, les exigences sont définies en détail dans le 13<sup>e</sup> et dans le 17<sup>e</sup> décret allemand relatif à la protection contre les immissons (BImSchV) ainsi que dans la « TA Luft » (instructions techniques pour le contrôle de qualité de l'air). D'autres informations à ce sujet figurent au chapitre 2.3.

### 1.3 Combustibles

Les combustibles peuvent se présenter sous différentes formes et compositions :

- Les combustibles solides (charbon, tourbe, bois, paille) contiennent essentiellement du carbone (C), de l'hydrogène (H<sub>2</sub>), de l'oxygène (O<sub>2</sub>) et, en faible quantité, du soufre (S), de l'azote (N<sub>2</sub>) et de l'eau (H<sub>2</sub>O).
- Les combustibles liquides sont des dérivés du pétrole, une différence étant faite entre les fiouls extra-légers (EL), légers (L), moyennement visqueux (M) et visqueux (S).
- Les combustibles gazeux sont un mélange de gaz inflammables (CO, H<sub>2</sub> et hydrocarbures) et non inflammables. Aujourd'hui, on utilise très souvent du gaz naturel dont le principal composant est le méthane (CH<sub>4</sub>), un hydrocarbure gazeux.

La connaissance de la composition du combustible est la condition indispensable à une gestion optimale et donc économique de la combustion. Un taux croissant de substances non inflammables (inertes) réduit le pouvoir calorifique supérieur ou inférieur et augmente l'encrassement des surfaces de chauffe. Une teneur en eau croissante augmente le point de rosée de la vapeur d'eau et consomme de l'énergie du combustible pour l'évaporation d'eau dans le gaz de fumée. La combustion du soufre contenu dans le combustible produit du SO<sub>2</sub> et du SO<sub>3</sub>, ce qui peut provoquer la formation d'acide sulfureux agressif ou d'acide sulfurique après le refroidissement au-dessous du point de rosée. Cf. chapitre 1.7.

Le tableau suivant montre la composition de quelques combustibles solides.

Combustible	Teneur (fraction massique en %)			
	Carbone dans la matière sèche	Soufre	Cendre	Eau
Houille	80-90	1	5	3-10
Ortholignite	60-70	2	5	30-60
Métalignite	70-80			10-30
Bois (séché à l'air)	50	1	1	15
Tourbe	50-60	1	5	15-30

Tab. 2 : Composition des combustibles

Le chapitre 1.6 contient des explications au sujet du pouvoir calorifique des combustibles.

## 1.4 Air de combustion, coefficient d'air

L'air de combustion ou air comburant fournit l'oxygène nécessaire à la combustion. Il est composé d'azote ( $N_2$ ), d'oxygène ( $O_2$ ), d'une faible part de gaz rares et d'un taux variable de vapeur d'eau (tab. 3). Dans certains cas, on utilise aussi de l'oxygène pur ou un mélange d'oxygène et d'air pour la combustion.

Les composants essentiels de l'air comburant se retrouvent ensuite dans le gaz de combustion (à l'exception de l'oxygène consommé lors de la combustion).

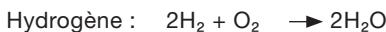
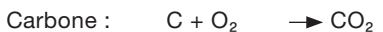
Composant	Teneur volumique [%]
Azote	78,07
Oxygène	20,95
Dioxyde de carbone	0,03
Hydrogène	0,01
Argon	0,93
Néon	0,0018

Tab. 3 : Composition d'air pur et sec au niveau de la surface de la Terre

### 1.4.1 Combustion idéale, coefficient d'air, bilan matière

Le besoin minimum en oxygène pour une combustion complète (idéale) des composants combustibles dépend de la composition du combustible : 1 kg de carbone p.ex. a besoin de 2,67 kg d'oxygène pour sa combustion, en revanche, 1 kg d'hydrogène a besoin de 8 kg alors que 1 kg de soufre ne requiert qu'1 kg d'oxygène. Dans le cas du rapport précis des quantités, on parle de combustion idéale ou de combustion dans des conditions stœchiométriques.

Les équations chimiques sont les suivantes :



La combustion idéale peut être modélisée comme dans la figure 1 : l'oxygène amené suffit juste pour la combustion complète du combustible existant ; il ne reste ni oxygène ni combustible.

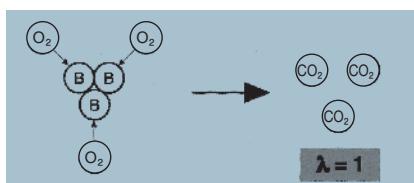


Figure 1 : Modèle d'une combustion idéale

Dans la pratique cependant, cette quantité d'oxygène idéale (minimale) ne suffit pas pour une combustion complète, entre autre en raison du mélange incomplet du combustible et de l'oxygène ; il faut donc une quantité plus grande d'oxygène et donc d'air comburant pour alimenter le système que le rapport stœchiométrique ne l'exige. Cette quantité d'air supplémentaire est appelée « excès d'air » et le rapport entre la quantité d'air réelle et celle nécessaire selon le rapport stœchiométrique est appelé coefficient d'air ( $\lambda$ ). La fig. 2 montre une modélisation de cette situation ; avec  $\lambda > 1$  en raison de l'excès d'air.

Le rendement maximal de la combustion est donc constaté avec un faible excès d'air/d'oxygène, donc à  $\lambda > 1$  (atmosphère oxydante). La connaissance du coefficient d'air est très importante pour la combustion idéale et la rentabilité d'exploitation de l'installation :

- Un excès d'air plus élevé que nécessaire réduit la température de combustion et augmente l'énergie non utilisée, dissipée dans la quantité plus importante de fumées.
  - Un excès d'air trop faible ne provoque pas seulement un mauvais rendement du combustible mais de plus une pollution plus importante en raison des résidus imbrûlés dans les fumées.

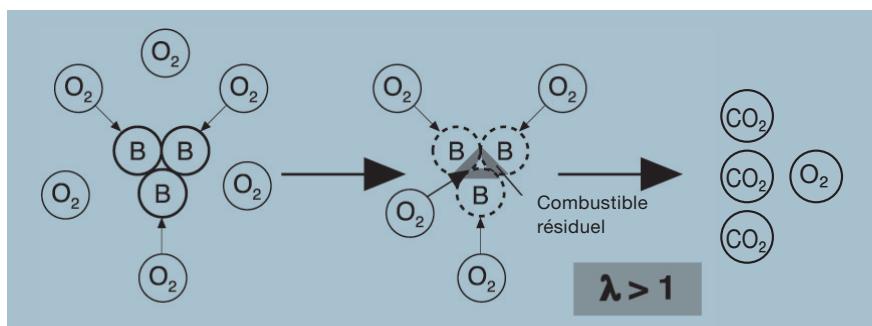


Figure 2 : Modèle d'une combustion avec excès d'air

Le tableau 4 indique les plages typiques du coefficient d'air en fonction du type d'installation de combustion. Règle générale : moins la surface réactive du combustible est grande par rapport à l'unité de masse (combustible à gros grain), plus l'excès d'air doit être élevé pour obtenir une combustion complète. Ceci s'applique aussi à contrario et c'est pourquoi les combustibles solides sont finement broyés et les combustibles liquides sont pulvérisés. Cependant, des procédés spéciaux tels que le traitement thermique de surface, sont exploités en toute conscience avec un défaut d'air, donc  $\lambda < 1$ , car c'est nécessaire pour le processus d'affinage visé.

Installation de combustion	Plage de $\lambda$
Moteurs à combustion	0,8-1,2
Brûleur à gaz à air soufflé	1,1-1,3
Brûleur au fioul	1,2-1,5
Brûleur à charbon pulvérisé	1,1-1,3
Grille pour lignite	1,3-1,7
Néon	0,001

Tab. 4 : Plages typiques du coefficient d'air  $\lambda$

### Atmosphère oxydante

Il y a plus d'oxygène que nécessaire pour l'oxydation des substances oxydables du combustible. L'oxydation (combustion) peut donc se dérouler complètement.

Description simplifiée : oxydation = addition d'oxygène (oxydation du CO en CO<sub>2</sub>).

### Atmosphère réductrice

Il n'y a pas assez d'oxygène pour l'oxydation de toutes les substances oxydables. Le contraire de l'oxydation se produit, soit une réduction.

Description simplifiée : réduction = soustraction d'oxygène (réduction du SO<sub>2</sub> en S).

### 1.4.2 Détermination du coefficient d'air

Le coefficient d'air peut être déterminé d'après les concentrations en CO, en CO<sub>2</sub> et en O<sub>2</sub> dans les gaz de combustion, le diagramme dit de combustion montre les rapports, fig. 3. Dans le cas du mélange idéal du combustible et de l'air, une teneur en CO<sub>2</sub> déterminée est associée à une teneur en CO déterminée (dans la plage  $\lambda < 1$ ) ou à une teneur en O<sub>2</sub> déterminée (dans la plage  $\lambda > 1$ ). La valeur de CO<sub>2</sub> à lui seul n'est pas pertinente en raison de la courbe qui passe par un maximum, de sorte qu'il faut vérifier aussi si en plus du CO<sub>2</sub>, le gaz contient soit du CO, soit de l'O<sub>2</sub>. La détermination claire de la teneur en O<sub>2</sub> est généralement privilégiée actuellement en cas de fonctionnement par excès d'air (donc le cas normal). Les courbes dépendent du combustible, c'est-à-dire qu'il y a un diagramme propre à chaque combustible et notamment une valeur propre de CO<sub>2 max</sub>, voir tableau 7.

Les rapports de cette multitude de diagrammes sont souvent résumés sous forme de nomogramme facile à manier dans la pratique (« triangle de combustion », non représentée ici). Il s'applique à tout type de combustible.

Les deux formules suivantes servent au calcul approximatif du coefficient d'air à partir des valeurs de mesure du CO<sub>2</sub> ou de l'O<sub>2</sub> :

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_2} \quad \lambda = 1 + \frac{\text{O}_2}{21 - \text{O}_2}$$

où

CO<sub>2 max</sub> : valeur de CO<sub>2</sub> maximale spécifique en fonction du combustible (voir tab. 7). Sur demande, cette valeur peut être déterminée par Testo en tant que prestation de service.

CO<sub>2</sub>

et O<sub>2</sub> : valeurs mesurées (ou calculées) dans les gaz de combustion

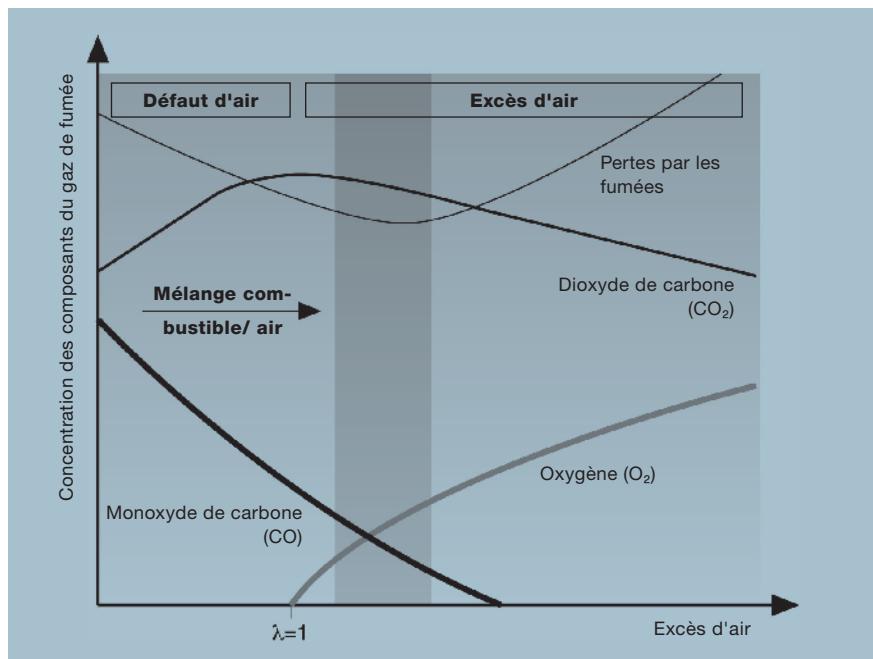


Figure 3 : Diagramme de combustion

Le chapitre 2.1 (Optimisation de la combustion) contient des explications plus détaillées sur les rapports dans le diagramme de combustion.

### 1.4.3 Besoin en air de combustion

Le besoin en air réel est calculé à partir

- du besoin en oxygène minimum nécessaire à la combustion idéale (qui dépend du combustible),
- de l'excès d'oxygène souhaité et
- de la teneur en oxygène relative de l'air. Elle est de 20,95 % pour l'air sec à pression atmosphérique. Mais en pratique, l'air ambiant qui sert d'air comburant n'est jamais entièrement sec de sorte que pour une conduite précise du processus, il faut tenir compte de l'humidité de l'air pour la détermination du volume d'air.

### 1.4.4 Volume de gaz, effet de dilution, valeur de référence

L'air comburant et l'humidité (vapeur d'eau) augmentent le volume de gaz absolu.

La fig. 4 montre ce rapport pour la combustion d'1 kg de combustible. Dans des conditions stœchiométriques, c'est-à-dire sans excès d'air, cette combustion produit env. 10 m<sup>3</sup> de gaz de combustion à l'état sec ou 11,2 m<sup>3</sup> à l'état humide, alors que la combustion de la même quantité de combustible avec un excès d'air de 25 % produit un volume de gaz de combustion de 13,9 m<sup>3</sup>. Cela équivaut à une dilution, réduisant la teneur relative en composants de gaz de combustion ! Ainsi, la teneur relative en SO<sub>2</sub> diminue de 0,2 (stœchiométrique, sec) à 0,18 (stœchiométrique, humide), ou à 0,14 (25 % d'excès d'air, humide), et l'oxygène diminue de 4,4 à 4, alors que les valeurs absolues restent identiques. Cf. tableau 5.

	Azote	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Eau	Oxygène
Stœch./sec	82,6	16	0,20	0	0
Stœch./humide	74,7	14,4	0,18	10,7	0
25 % d'EA/sec	82,8	12,7	0,16	0	4,4
25 % d'EA/humide	75,6	11,6	0,14	8,7	4

Tab. 5 : Composition relative des gaz de combustion en % dans différentes conditions  
(EA = excès d'air)

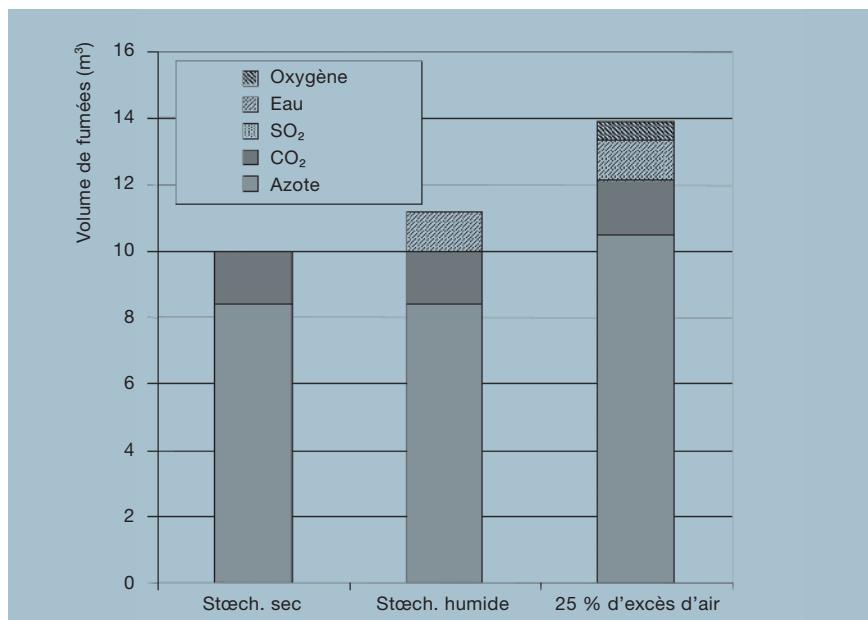


Figure 4 : Effet de dilution par le taux d'humidité et l'excès d'air

### Valeurs de référence

Les contextes décrits montrent que les analyses des concentrations ne pourront se faire généralement que par rapport aux valeurs de référence. Ce n'est que de cette manière que les valeurs de mesure sont pertinentes et comparables à d'autres résultats de mesure et notamment aux exigences légales ! En pratique, on utilise :

- la référence à une dilution déterminée par l'excès d'air ; la teneur en oxygène sert ici de référence qui s'exprime p.ex. par une « valeur de référence de 8 % d'oxygène ».

Cette référence à la valeur d'oxygène constitue la règle dans les instructions de la « TA Luft », mais elle est aussi utilisée en dehors de la « TA Luft » : on définit le point de référence d'une installation à proximité de la teneur en oxygène constatée à l'état rodé de l'installation.

- la référence à une dilution déterminée par le taux d'humidité du gaz ; la température du gaz sert ici de référence qui s'exprime p.ex. par l'indication « par rapport au gaz de combustion sec » ou « à un point de rosée de 4 °C ».
- la référence à l'état normal d'un gaz. Cela concerne la dépendance du volume de gaz des valeurs de pression et de température actuelles, voir chapitre 3.1.1.

## 1.5 Le gaz de combustion (gaz de fumée) et sa composition

Le gaz de combustion produit par un processus de combustion est aussi appelé gaz de fumée ou simplement les « fumées ». Sa composition dépend du combustible et des conditions de combustion, p.ex. du coefficient d'air. Beaucoup de composants des fumées font partie des polluants atmosphériques et doivent donc être éliminés des fumées par des procédés d'épuration en partie très compliqués avant leur rejet dans l'atmosphère en raison des dispositions légales (voir chap. 2.3). Le gaz de fumée est aussi désigné comme gaz brut dans sa composition originale après la combustion et comme gaz épuré après le passage par les étapes d'épuration.

Les composants les plus importants du gaz de fumée sont expliqués ci-dessous.

### Azote ( $N_2$ )

L'azote est le constituant principal de l'air à concurrence de 79 % en volume. Ce gaz incolore, inodore et insipide est acheminé avec l'air comburant mais ne participe pas directement à la combustion ; il est présent comme substance inerte et porteur de chaleur dissipé et est rejeté dans

l'atmosphère. Cependant, une partie de l'azote contribue à la formation des oxydes d'azote dangereux (voir ci-dessous) en commun avec l'azote du combustible.

### Dioxyde de carbone ( $CO_2$ )

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore et inodore d'un goût légèrement acide qui se forme lors de tous les processus de combustion et lors de la respiration. En raison de sa propriété de filtrage du rayonnement thermique, il contribue essentiellement à l'effet de serre. L'air naturel n'en contient que 0,03 % ; la valeur MAK (concentration maximale sur les lieux de travail) est de 0,5 % ; une concentration de plus de 15 % dans l'air respiré provoque une perte de conscience chez l'homme.

### Vapeur d'eau (humidité)

L'hydrogène contenu dans le combustible se combine à l'oxygène pour former de l'eau ( $H_2O$ ). Associée à l'eau contenue dans le combustible et dans l'air de combustion, celle-ci prend alors la forme d'humidité dans le gaz de combustion (TF élevée) ou de condensation (TF basse), en fonction de la température du gaz de fumée (TF).

### Oxygène ( $O_2$ )

L'oxygène n'étant pas consommé lors de la combustion en cas d'excès d'air apparaît sous forme gazeuse dans le gaz de fumée et permet de mesurer le rendement de la combustion. Il est utilisé pour la détermination des paramètres de combustion et comme grandeur de référence.

### Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et toxique. Il se forme surtout en cas de combustion incomplète de combustibles fossiles (brûleurs) et de carburants (véhicules) et d'autres matières contenant du carbone. Dans un grand espace, le CO n'est pas très dangereux pour l'homme car il se combine vite à l'oxygène de l'air pour former du  $CO_2$ . Mais localement, le CO est très dangereux car une concentration de seulement 700 ppm dans l'air de respiration provoque la mort de l'homme en quelques heures. La valeur MAK s'élève à 50 ppm.

### Oxydes d'azote (NO et $NO_2$ , formule brute : NOX)

Pendant les processus de combustion, une certaine partie de l'azote provenant du combustible, et, en cas de température élevée, aussi de l'air comburant, se combine avec l'oxygène de

l'air comburant et forme d'abord du monoxyde d'azote NO (NO d'origine combustible et NO d'origine thermique), qui, en présence d'oxygène, peut encore être oxydé en dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) dangereux dans une étape supplémentaire dans le canal de combustion ainsi que plus tard dans l'atmosphère. Les deux oxydes sont toxiques ; notamment le  $NO_2$  est une substance très toxique pour les poumons et, associé au rayonnement solaire, il contribue aussi à la formation d'ozone. On utilise des technologies onéreuses pour l'élimination des  $NO_x$  dans les fumées, p.ex. le procédé RCS (SCR en anglais). La réduction des oxydes d'azote pendant la combustion déjà est obtenue par des mesures techniques de combustion particulières telles que l'étagement de l'air.

### Dioxyde de soufre ( $SO_2$ )

Le dioxyde de soufre est un gaz toxique incolore présentant une odeur âcre. Il se forme par l'oxydation du soufre contenu dans le combustible en plus ou moins grande quantité. La valeur MAK s'élève à 5 ppm. La combinaison avec de l'eau ou du condensat donne de l'acide sulfureux ( $H_2SO_3$ ) et de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), tous deux provoquant de nombreux dommages environnementaux sur la végétation et sur les matériaux

de construction. Les installations de désulfuration des fumées servent à réduire les oxydes de soufre.

### **Sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S)**

Le sulfure d'hydrogène ou hydrogène sulfuré est un gaz toxique de très mauvaise odeur même à une concentration minime (env. 2,5 µg/m<sup>3</sup>). Il est un constituant naturel du gaz naturel et du pétrole et est donc présent dans les raffineries et les installations de traitement de gaz naturel, mais aussi p.ex. dans les tanneries, les exploitations agricoles et notamment en cas de combustion incomplète dans les pots catalytiques automobiles. L'élimination du H<sub>2</sub>S dans les fumées se fait entre autres par la combustion qui génère du SO<sub>2</sub>, par certains procédés d'absorption ou, en cas de taux important, par la transformation en soufre élémentaire par le procédé Claus.

### **Hydrocarbures**

#### **(HC ou C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)**

Les hydrocarbures forment un vaste groupe de composés chimiques constitués exclusivement de carbone et d'hydrogène. Les HC sont les substances les plus importantes de la chimie organique, ils sont naturellement présents dans le pétrole, le gaz naturel ou le charbon. Les émissions de HC se produisent aussi bien pen-

dant la fabrication de produits à base de HC (p.ex. dans les raffineries) que lors de leur utilisation et élimination (solvants, matières synthétiques, peintures et laques, carburants, déchets etc.). Sources d'émission de HC principales : combustions incomplètes, incendies de forêt et de steppe ainsi que p.ex. cigarettes. Les HC contribuent à l'effet de serre.

Font partie des HC, entre autres : le méthane (CH<sub>4</sub>), le butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) et le benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) mais aussi le benzo[a]pyrène cancérogène. Le potentiel total de composés organiques volatiles d'un gaz de fumée est souvent désigné comme C total. Ce total est généralement déterminé dans le gaz de fumée.

### **Cyanure d'hydrogène (HCN)**

Le cyanure d'hydrogène (aussi connu sous le nom d'acide prussique) est un liquide très毒ique avec un point d'ébullition de 25,6 °C ; s'il est présent dans les fumées, il l'est sous forme gazeuse. Le HCN peut apparaître dans les incinérateurs de déchets.

### **Ammoniac ( $\text{NH}_3$ )**

L'ammoniac joue un rôle dans les gaz de fumée en combinaison avec le procédé RCS pour la dénitrification des gaz de fumée. Il est ajouté au gaz de fumée en quantité bien dosée dans les réacteurs de dénitrification et provoque la transformation des oxydes d'azote en azote et en eau. Le résidu non consommé (glissement de  $\text{NH}_3$ ) est fortement réduit par des étages d'épuration en aval et est généralement de l'ordre de ou inférieur à 2 mg/m<sup>3</sup> dans le gaz épuré.

### **Matières solides (poussières, suie)**

Les polluants solides des fumées proviennent des composants non inflammables des combustibles liquides et solides. Il s'agit p.ex. d'oxydes de silicium, d'aluminium, de calcium et d'autres dans le cas du charbon et de sulfates de différentes matières dans le cas du fioul lourd. L'effet nocif des poussières sur l'homme résulte surtout de la fixation de substances toxiques et cancérogènes aux particules de poussière.

### **Halogénures d'hydrogène (HCl, HF)**

Les halogénures d'hydrogène HCl et HF peuvent se former lors de la combustion de charbon et/ou l'incinération de déchets ; combinés à l'humidité, ils forment des acides agressifs. Les installations d'épuration des fumées (laveurs) provoquent la lixiviation de ces substances des fumées en grande partie.

## 1.6 Pouvoir calorifique supérieur et inférieur, rendement, pertes par les fumées

### Pouvoir calorifique supérieur et inférieur

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est une valeur caractéristique d'un combustible et désigne la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible. En revanche, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) désigne la quantité d'énergie dégagée par la combustion d'une unité de combustible après déduction de la chaleur dissipée dans la vapeur d'eau à 25 °C qui se forme par la combustion.

Le pouvoir calorifique inférieur est toujours inférieur au pouvoir calorifique supérieur.

### Chaudières à condensation

Les chaudières à condensation sont des chaudières qui utilisent, en plus de la chaleur de combustion, aussi la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de fumée en condensant ces vapeurs par refroidissement. Ces chaudières peuvent atteindre un rendement de combustion de 107 par rapport au pouvoir

calorifique inférieur. Cependant, l'eau condensée ainsi formée, qui est chargée en polluants, doit être éliminée de manière écologique.

### Rendement d'une combustion

Le rendement est une grandeur déterminée à l'état de fonctionnement stationnaire d'une installation à partir de ses valeurs de performance. Le rendement (qui est toujours inférieur à 100 %) est le rapport entre l'énergie totale fournie au foyer et l'énergie nécessaire ou utilisée pour la réalisation du processus (chauffage, mise en fusion, frittage etc.). Le rendement se compose de plusieurs éléments :

- Le rendement de combustion décrit la part de puissance totale fournie (énergie par unité de temps) qui est disponible et utilisable dans le foyer après la combustion. Il est donc une grandeur importante pour la qualité de la combustion.
- Le rendement du four, essentiellement dû à sa construction, décrit la qualité du four ou d'exploitation par le rapport entre l'énergie apportée et l'énergie disponible dans le four.
- Le rendement total résulte de la multiplication du rendement de combustion et du rendement du four.

## Bilan énergétique d'une installation de combustion

A l'état d'exploitation stationnaire, le total de toutes les énergies fournies à l'installation doit être égal au total de toutes les énergies émises par l'installation, voir tableau 6.

Energies apportées	Energies fournies
Pouvoir calorifique inférieur et énergie sensible du combustible	Chaleur sensible et énergie liée chimiquement des gaz de fumée (pertes par les fumées)
Chaleur sensible de l'air de combustion	Chaleur sensible et pouvoir calorifique inférieur des résidus de combustible dans les cendres et scories
Equivalent de la chaleur de l'énergie mécanique transformée dans l'installation	Pertes superficielles par conduction thermique
Chaleur apportée par la matière	Chaleur émise par la matière
	Pertes de convection dues à une mauvaise étanchéité du four

Tab. 6 : Contributions au bilan énergétique

Les pertes par les fumées constituent la part de pertes la plus importante. Elles dépendent de la différence entre la température du gaz de fumée et la température de l'air comburant, de la concentration en O<sub>2</sub> ou en CO<sub>2</sub> dans le gaz de fumée ainsi que des facteurs spécifiques au combustible (tableau 7). Dans les chaudières à condensation, ces pertes par les fumées sont réduites à deux égards par l'utilisation de la chaleur de condensation et la température ainsi réduite du gaz de fumée. Les pertes par les fumées peuvent être calculées selon les formules suivantes :

$$Pf = \left[ (TF - TA) \times \left[ \frac{A2}{(21-O_2) + B} \right] \right] - KK$$

- TF : Température des fumées  
 TA : Température de l'air de combustion  
 A2, B : Facteurs spécifiques au combustible (cf. tableau)  
 21 : Teneur en oxygène de l'air  
 O<sub>2</sub> : Concentration en O<sub>2</sub> mesurée  
 KK : Coefficient indiquant la grandeur Pf comme valeur négative lorsque la température est inférieure au point de rosée. Requis pour les mesures sur les chaudières à condensation.

Pour les combustibles solides, les facteurs A2 et B sont égaux à zéro. La formule est alors simplifiée par l'utilisation du facteur f, ce qui donne la formule dite de Siegert.

$$Pf = f \times \frac{TF - TA}{CO_2}$$

Les facteurs spécifiques aux combustibles utilisés dans ces formules sont regroupés ci-dessous.

Combustible	A2	B	f	CO <sub>2</sub> max
Fioul	0,68	0,007	-	15,4
Gaz naturel	0,65	0,009	-	11,9
Gaz liquide	0,63	0,008	-	13,9
Coke, bois	0	0	0,74	20,0
Briquettes	0	0	0,75	19,3
Lignite	0	0	0,90	19,2
Houille	0	0	0,60	18,5
Gaz de cokerie	0,60	0,011	-	-
Gaz de ville	0,63	0,011	-	11,6
Gaz étalon	0	0	-	13,0
Tourbe	50-60	1	5	15-30

Tab. 7 : Facteurs spécifiques aux combustibles

### Remarque :

Le facteur CO<sub>2</sub> max, qui dépend du combustible, peut être déterminé par Testo sur demande en tant que prestation de service.

### 1.7 Point de rosée, condensat

#### Point de rosée

Le point de rosée ou la température du point de rosée d'un gaz désigne la température à laquelle l'humidité contenue dans le gaz passe de l'état gazeux à l'état liquide, voir fig. 5. Ce passage est appelé condensation, le liquide ainsi produit est appelé condensat ou eau de condensation. Au-dessous du point de rosée, l'humidité est présente sous forme liquide, au-dessus du point de rosée, elle est à l'état gazeux ; la formation et la dissolution de brouillard ou de rosée en fonction de la température est un exemple de ce phénomène. Le taux d'humidité détermine la température du point de rosée : le point de rosée d'air avec un taux d'humidité de 30 %

est d'environ 70 °C, en revanche, celui d'air plus sec avec un taux d'humidité de seulement 5 % est de l'ordre de 35 °C.

#### Remarque :

Si les mesures sont effectuées au moyen d'un appareil sans système de préparation des gaz, la température du point de rosée du gaz correspond approximativement à la température ambiante, soit 25 °C, p.ex. Si ces valeurs de mesure sont comparées aux valeurs mesurées au moyen d'un appareil doté d'un système de préparation des gaz, soit à une température du point de rosée de 5 °C, p.ex., les différents taux d'humidité occasionnent des différences de mesure d'env. 3 % !

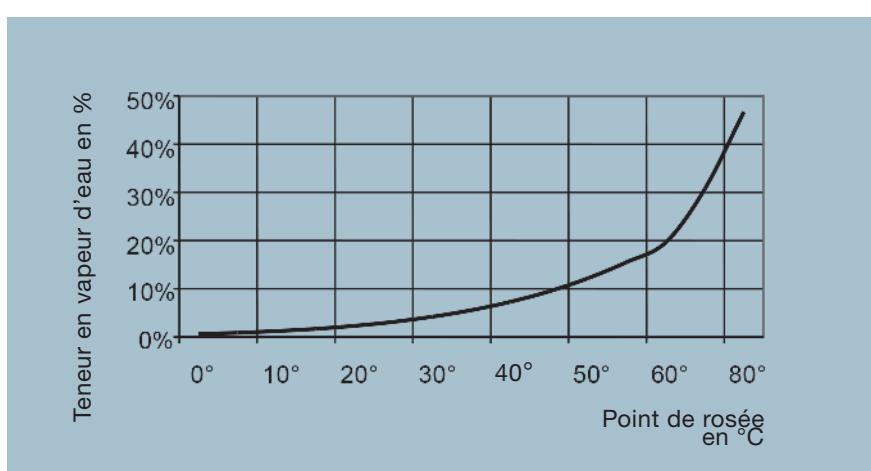


Figure 5 : Teneur en vapeur d'eau en fonction du point de rosée (pression atmosphérique : 1013 mbars)

## Conduites chauffées, refroidisseur de gaz

Les gaz de fumée présentant un taux d'humidité de 8 % par exemple ont un point de rosée d'environ 40 °C, de sorte que de l'eau de condensation se forme au-dessous de cette température. Cela a deux conséquences importantes pour toute l'installation et aussi la technique de mesure :

- Si le gaz de fumée contient des oxydes de soufre, ils formeront de l'acide sulfureux ( $H_2SO_3$ ) ou de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à des températures inférieures à 40 °C (p.ex. dans des conduites non chauffées) en combinaison avec la vapeur d'eau condensée ; ces deux acides sont extrêmement corrosifs et peuvent causer des dommages considérables aux éléments de l'installation avec lesquels ils sont en contact. Pour cette raison, la température des gaz de fumée de l'installation est maintenue au-dessus du point de rosée (donc au-dessus de 40 °C dans l'exemple ci-dessus) jusqu'au laveur de fumées.

Il en est de même pour les parties des appareils de mesure parcourus par les gaz de fumée, notamment pour tous les éléments d'échantillon-

nage, tels que la sonde et les tuyaux. Pour cette raison, on utilise des sondes et des tuyaux de prélèvement de gaz chauffés, dont la température est maintenue au-dessus du point de rosée du gaz. Le non-respect de cette mesure provoque un endommagement des appareils de mesure et des erreurs de mesure !

- Une autre alternative pour éviter la condensation est proposée par Testo avec la nouvelle méthode brevetée que la société a mise au point : on utilise l'effet combiné d'une vitesse d'écoulement particulièrement élevée du gaz et d'une garniture spéciale de la surface des tuyaux de prélèvement de gaz. Cela permet de renoncer aux tuyaux chauffés ce qui est très important pour les appareils portatifs en raison de la réduction de la consommation d'énergie. Dans le gaz de fumée refroidi, il manque plus ou moins de vapeur d'eau, en fonction de la température de refroidissement, de sorte que le taux relatif des autres composants du gaz, p.ex. de CO, dont la quantité absolue est inchangée, augmente proportionnellement dans le gaz de fumée, les valeurs de mesure respectives sont alors plus élevées dans le gaz de fumée humide ! Le gaz prélevé pour la mesure doit donc présenter

à chaque fois la même température et ainsi le même taux d'humidité afin de pouvoir comparer les valeurs de mesure.

Par conséquent, on utilise un refroidisseur de gaz (on pourrait aussi l'appeler sécheur de gaz) en amont de l'analyseur de gaz afin d'amener le gaz à une température définie et donc à un degré de séchage défini et de maintenir cet état.

### Remarque :

- Refroidir le gaz signifie sécher le gaz.
- Dans le gaz sec, les valeurs de mesure des composants du gaz sont proportionnellement plus élevées que dans le gaz humide.

Les appareils de Testo utilisent un refroidisseur appelé « module Peltier » dont le fonctionnement est basé sur le fait que la jonction entre deux métaux de différente nature se réchauffe ou se refroidit lorsque l'élément est parcouru par le courant électrique, ce en fonction du sens du courant. Dans le testo 350, ce refroidisseur est capable de refroidir le gaz prélevé à +3 °C et de maintenir cette température.

Les sécheurs à perméation, également courants sur le marché, présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir maintenir de point de rosée défini ; par ailleurs, ils sont sensibles au colmatage par des particules de poussière ce qui provoque un besoin accru en pièces de rechange.

Voulez-vous lire  
les autres chapitres aussi?

Puis cliquez ici.

