

# Gestion des équipements thermiques dans l'industrie

par la commission des utilisations de l'ATG

Ce dernier article clôt la série consacrée à ce sujet préparée par la commission des utilisations de l'ATG. Après les précédents qui étaient consacrés à la classification et au choix des brûleurs industriels gaz, puis au bilan thermique et à son optimisation, ce dernier aborde la régulation, le contrôle de la combustion et la sécurité.

## La régulation de la combustion

### La régulation de combustion

On entend par « régulation de combustion » l'ensemble des dispositions et dispositifs assurant le développement de la combustion dans des conditions de réglage nominales, quelles que soient les actions perturbatrices.

De façon générale, le terme de « régulation » énoncé seul désigne la régulation propre du procédé : régulation de température d'un four ou régulation de pression de vapeur sur une chaudière.

La recherche systématique de la performance amène maintenant à faire évoluer les domaines d'action des systèmes de régulation. C'est en particulier le cas en matière de combustion, où les enjeux sont :

- la maîtrise de la consommation énergétique et des émissions de polluants,
- l'augmentation de la qualité des produits,
- l'automatisation accrue des procédés.

Cette partie exposera la nature des problèmes posés et présentera l'éventail des solutions disponibles pour les différents types de procédés thermiques dans l'industrie.

### La régulation de combustion des foyers étanches

On entend par foyer étanche un foyer d'où s'échappent les produits de combustion composés exclusivement et totalement des fluides admis au brûleur, à l'exclusion de toute admission d'air parasite ou de tout départ par des ouvertures autres que les carneaux d'évacuation, ainsi que de tout dégagement gazeux issu de la charge.

Dans une telle configuration, l'analyse des produits de combustion à la cheminée permet de conduire une régulation de combustion par action en boucle fermée sur les systèmes d'alimentation air-gaz.

#### *Le cas des chaudières*

Ce type de foyer à parois froides se caractérise par des produits de combustion à la cheminée à température faible, voire très faible sur les équipements récents les plus performants. Dans ces conditions, la recherche d'un bon rendement thermique nécessite de s'approcher des conditions stœchiométriques, sans risquer à un moment quel-

conque d'obtenir un réglage en défaut d'air.

La figure 1 fait apparaître l'effet d'un défaut d'air sur le rendement : celui-ci est autant affecté par un défaut d'air de 5 % que par un excès d'air de 100 % pour des fumées à 200°C.

L'adoption d'une régulation de combustion permet en général d'améliorer le rendement de plusieurs points.

#### *La régulation d'oxygène des chaudières*

La régulation de combustion par mesure de l'oxygène implique d'adopter une consigne fonction des caractéristiques de l'installation et de son taux de charge. Cette consigne variable résulte du fait que l'excès d'air minimal nécessaire avant qu'apparaissent des imbrûlés augmente lorsque la puissance diminue, en raison d'une plus grande difficulté de mélange air-gaz à basse vitesse d'écoulement. La figure 2 donne un exemple de la consigne d'oxygène en fonction de la charge que la régulation de combustion doit respecter.

#### *La régulation de combustion des chaudières par détection du CO*

Au contraire de la régulation d'oxygène, la régulation par détection du monoxyde de carbone ne nécessite pas de consigne variable. On adopte une consigne fixe, située en général à quelques dizaines ou

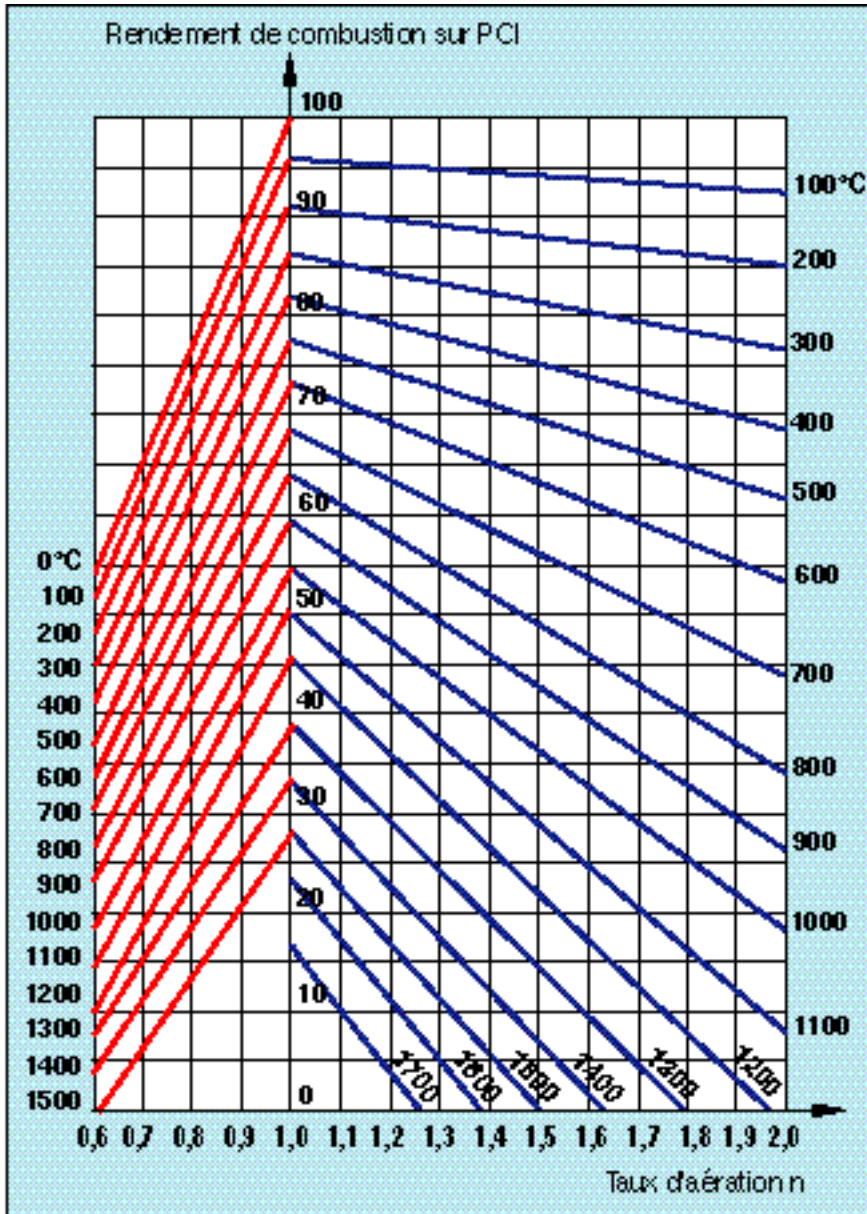


Fig. 1 : Rendement de combustion du gaz naturel en fonction du taux d'aération en air froid pour différentes températures des produits de combustion

quelques centaines de ppm de CO suivant la qualité et l'importance de l'installation. Le choix est très souvent lié à des problèmes de stabilité de flamme.

### Le cas des fours haute température

Ce type de foyer se caractérise par un départ des produits de combustion, hors de la zone de chauffe utile, à une température au moins égale à la température de consigne. Dans ces conditions, l'incidence de l'excès ou du défaut d'air sur la perte de rendement de combustion est bien plus forte que dans le cas des chaudières ou des procédés à plus basse température (< 400°C), comme il ressort des courbes de la figure 1.

D'autre part, à haute température, l'évolution de la température de flamme en fonction du taux d'aération (voir figure 3) est susceptible de grandement affecter le transfert de chaleur.

Le respect d'une consigne de réglage de combustion aura donc une incidence :

- sur le rendement de chauffage, d'autant plus marqué que la température est élevée,
- sur la capacité de production, ce qui est une conséquence des variations de rendement,
- sur la qualité des produits chauffés, si ceux-ci peuvent réagir du point de vue physico-chimique avec des produits de combustion : oxydation, gazage, décarburation, coloration, etc.,
- sur les émissions de polluants, notamment le CO, les imbrûlés et les NOx,
- sur la longévité du matériel.

Il appartient donc à chacun d'analyser ses contraintes propres pour pouvoir chiffrer l'intérêt technico-économique d'une régulation de combustion. On peut néanmoins affirmer que le temps de retour d'une installation de régulation de com-

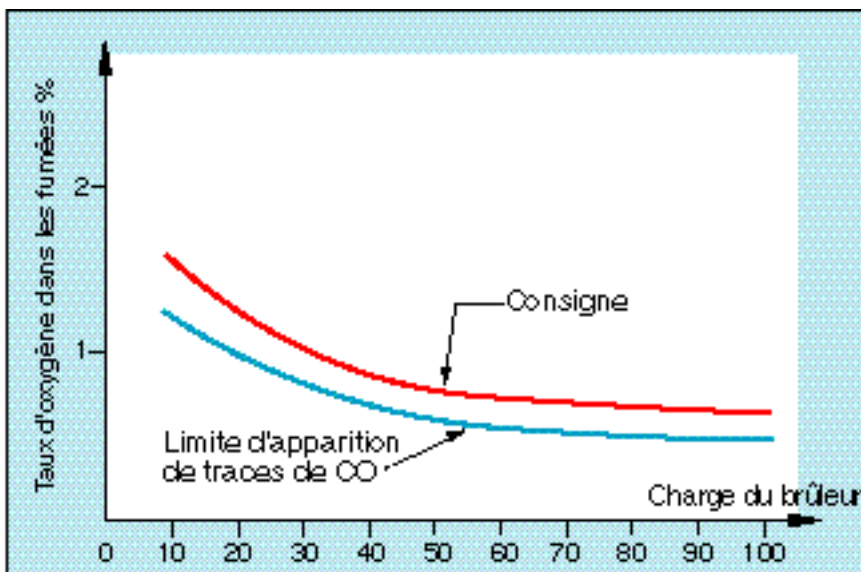
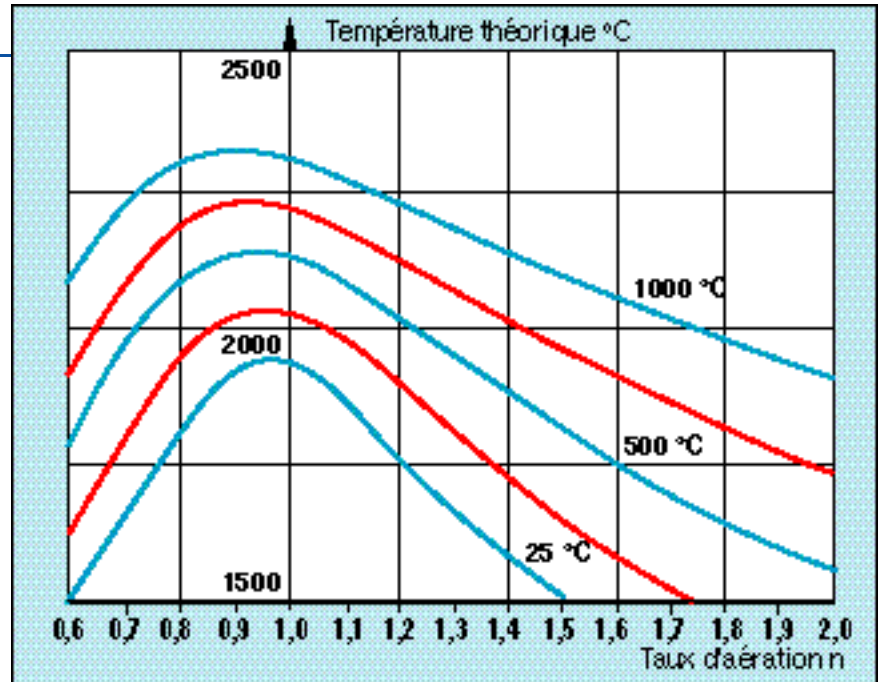


Fig. 2 : Exemple de consigne d'oxygène en fonction de la charge au brûleur

Fig. 3 : Température théorique de combustion en fonction du préchauffage de l'air



bustion de 1 000 kW et plus, est aujourd'hui presque toujours inférieur à l'année.

Les installations concernées sont trop diverses pour qu'il soit possible ici d'indiquer des solutions type. On retiendra pourtant que la majorité des cas relève de la mise en place d'une régulation d'oxygène avec sonde de zircon, y compris lorsqu'un léger défaut d'air est recherché.

## La régulation de combustion des foyers non étanches

Les contraintes de procédé, notamment liées aux opérations de chargement-déchargement des enceintes

de chauffe, ne permettent pas toujours de réaliser un foyer étanche vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

Dans de telles conditions, les produits de combustion à la cheminée sont dilués par des quantités va-

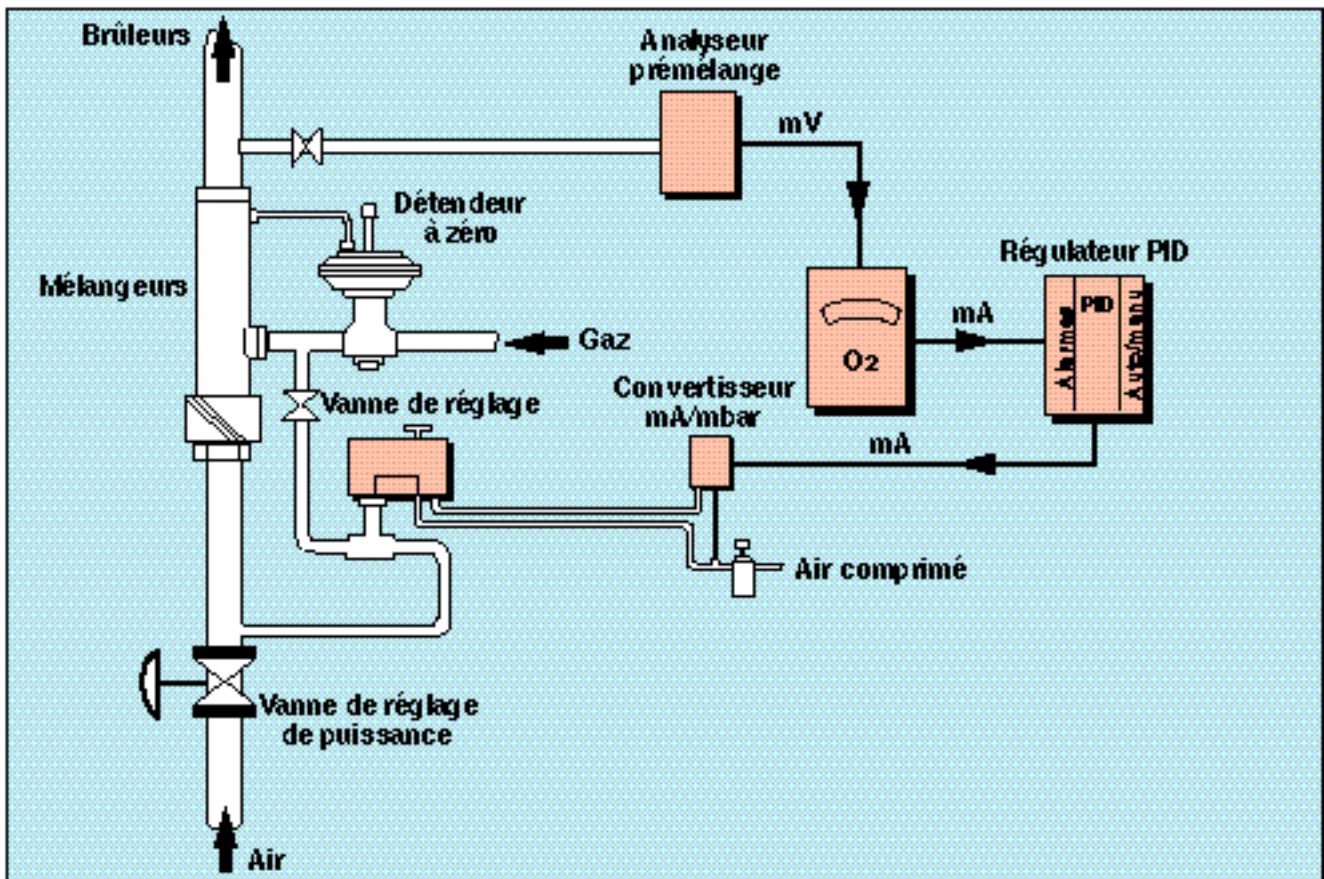


Fig. 4 : Régulation de combustion pour brûleurs à prémélange. Exemple de régulation pour mélangeurs à gaz détendu

riables d'air et leur composition n'est pas représentative des réglages des brûleurs. C'est en particulier le cas des fours à passage en continu, des fours à enfournement fréquent ou lorsque la charge émet des dégagements gazeux (fusion du verre, calcination).

Si, de ce fait, la mise en place d'une régulation de combustion en boucle fermée, par analyse des gaz à la cheminée n'est pas possible, il est alors nécessaire de faire appel à des schémas de régulation différents. Notons cependant, que la limitation des entrées d'air par la mise en place d'une régulation de pression du four conduit à une augmentation sensible du rendement.

### La régulation de combustion des brûleurs à prémélange

L'utilisation de brûleurs alimentés en prémélange total d'air et de gaz permet de contrôler et de réguler le rapport air-gaz des brûleurs, quelle que soit l'enceinte de combustion sur laquelle ils sont installés.

Le capteur utilisé est un analyseur de prémélange qui réalise en continu la combustion catalytique d'un échantillon du prémélange puis l'analyse du taux d'oxygène résiduel de cette combustion. Un exemple de régulation de combustion d'un ensemble de brûleurs à prémélange est donné sur la figure 4.

On notera qu'une telle association brûleur à prémélange-régulation de combustion sur le prémélange est le seul moyen d'alimenter un ensemble de brûleurs au même réglage par une commande commune de puissance. Même dans les foyers étanches pouvant être équipés d'une régulation de combustion par analyse en cheminée, l'utilisation de plusieurs brûleurs alimentés séparément en air et en gaz par l'intermédiaire d'un organe commun conduit à une dispersion des réglages individuels, sous l'effet des dissymétries des nourrices d'alimentation. Dans certains cas, il est conseillé de procéder à un équilibrage à la mise en service de l'installation.

### Les systèmes de régulation avec simulateurs de combustion

De nombreuses utilisations du gaz ne permettent pas d'effectuer une analyse des produits de combustion représentative des réglages aux brûleurs. C'est le cas notamment :

- des fours non étanches vis-à-vis de l'ambiance pour des raisons de procédé,
- des opérations de chauffage à l'air libre (travail à la flamme, soudobrasage, etc.),
- des fours soumis à des dégagements gazeux (décarbonation de terres, combustion de matières organiques, etc.),
- des fours émettant des fumées corrosives (composés chlorés ou fluorés dans l'industrie de l'aluminium).

Dans ces applications il est nécessaire de mettre en œuvre des simulateurs de combustion tel que le comburimètre pour reproduire à petite échelle les phénomènes de combustion que l'on ne peut contrô-

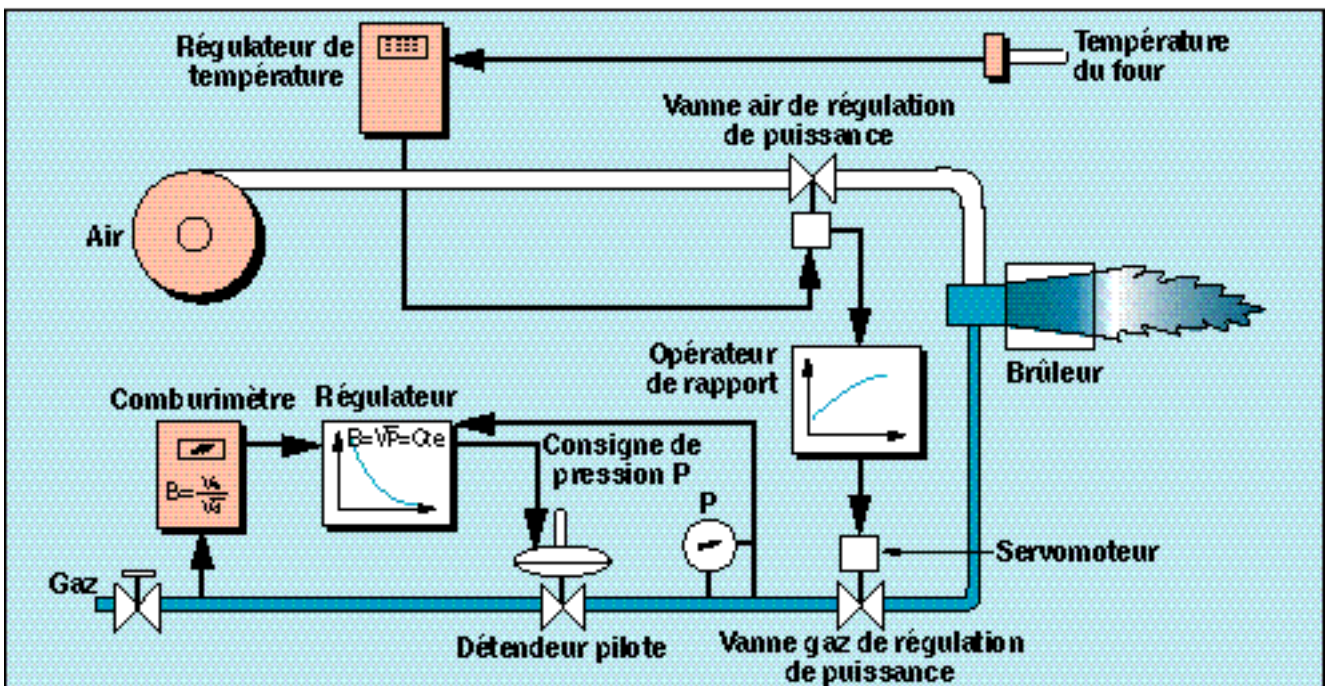


Fig. 5 : Exemple de combustion pour brûleurs à prémélange. Exemple de régulation pour mélanges à gaz détendu

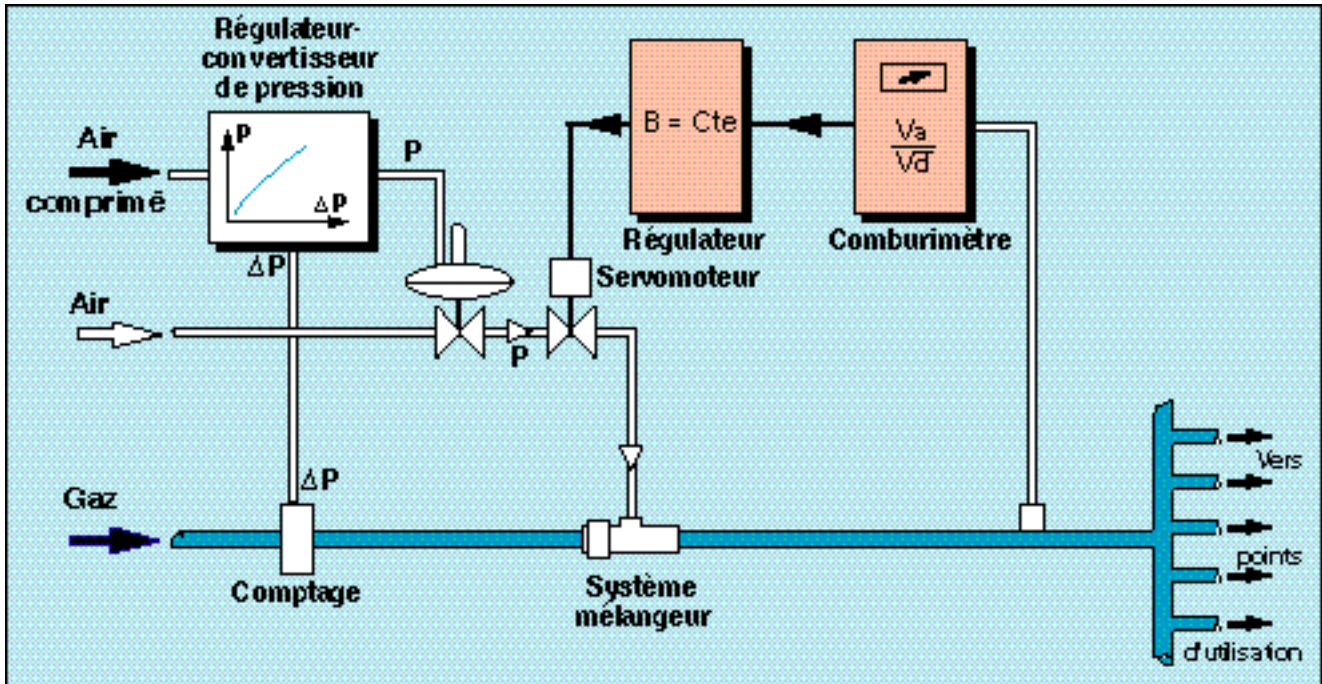


Fig. 6 : Exemple d'installation de conditionnement du gaz à indice de comburité constant par injection d'air

ler directement, puis commander en boucle ouverte une action de correction.

C'est en particulier le cas lorsque les variations du combustible utilisé sont gênantes : sensibilité du procédé à la qualité de l'atmosphère, nécessité d'un apport calorifique constant sur un procédé à forte inertie.

La figure 5 donne un exemple de régulation de pression du gaz en boucle ouverte par un comburimètre. Le régulateur compare l'indice de comburité ( $B$ ) à une consigne et délivre une pression ( $P$ ) de commande modulée à un détendeur pilotable de sorte que soit maintenu en aval de celui-ci un débit calorifique constant. On dé-

montre que cela revient à maintenir le produit  $B \cdot \sqrt{P}$  constant.

Le choix du conditionnement du gaz par de l'air pour maintenir un indice de comburité constant, s'envisage lorsque les variations de caractéristiques du gaz utilisé sont susceptibles de provoquer des désordres sur un ensemble d'équipements d'un même établissement industriel, et lorsque ces équipements ne peuvent être munis de régulations de combustion en boucle fermée.

Le schéma de principe en est donné sur la figure 6.

La consigne d'indice de comburité choisie correspond au gaz le plus pauvre possible, de sorte que par injection d'air, il soit possible de maintenir constant l'in-

dice de comburité lorsque le gaz s'enrichit en amont.

## Conclusion

Les systèmes de régulation de combustion bénéficient aujourd'hui des progrès importants de ces dernières années, notamment en matière de capteurs dont il sera question dans la partie suivante. Les matériels sont maintenant plus fiables et sont générateurs de qualité dans le procédé de fabrication. Longtemps réputés chers, leur intérêt économique ne se discute plus, à l'issue d'une analyse sérieuse des enjeux de qualité et d'économie de consommation.

## Les moyens de contrôle de la combustion

On a pu mesurer précédemment les enjeux d'une bonne maîtrise de la combustion que ce soit en

termes d'économie d'énergie, de productivité, d'environnement, de qualité des produits traités ou en

core de la durée de vie des équipements.

Or cette maîtrise de la combustion, que ce soit à travers la réalisation d'un bilan thermique ou par le biais d'une régulation de combustion, passe nécessairement par le bon choix et le bon usage des capteurs et actionneurs mis en œuvre.

## Les capteurs de température

### Fonction

Le capteur de température permet la saisie d'un signal représentant la température au point de mesure. Ce signal peut être exploité à des fins de contrôle, de régulation ou d'alarme (sécurité).

### Principe

Dans l'industrie, les principaux capteurs sont :

- ceux utilisant les effets électriques et notamment les thermocouples et sondes à résistance,
- ceux utilisant l'énergie rayonnée (pyromètre optique).

Pour leur choix on se référera aux critères résumés dans le tableau I.

tent simplement de visualiser, des capteurs-transmetteurs qui délivrent un signal normalisé (4-20 mA, 0-10 V, etc.) correspondant à la grandeur mesurée.

### Principes

Les principaux instruments de mesure de la pression rencontrés sur les lignes air-gaz et dans les applications industrielles gaz sont :

- les manomètres à colonne de liquide (tube en « u » et tube incliné) ;
- les manomètres à déformation de solide (Bourdon, soufflet, membrane dont jauge de contrainte, transformateur différentiel et effet capacitif),
- les manomètres à effet piézo-électrique.

Pour les critères de choix, on se référera au tableau II.

les débits de gaz et d'air mis en jeu pour la combustion.

Les applications sont diverses :

- le comptage (suivi de la consommation, calcul de rendement, etc.),
- la mesure du débit (visualisation de la puissance instantanée, etc.),
- une régulation de débit en boucle fermée, etc.).

### Principes

Différents principes peuvent être mis en œuvre pour capter un volume ou un débit :

- turbine,
- pression différentielle (ex. : diaphragme + capteur ou transmetteur de pressions différentielles),
- pressions statiques ou dynamiques (ex. : tube de Pitot + capteur ou transmetteur de pressions différentielles),
- flotteur (ex. : à section variable, rotamètre),
- pistons rotatifs,
- membrane,
- fréquence de tourbillon (ex. : vortex),
- mesure massique de fluide (ex. : débitmètre thermique, à coriolis).

Pour les critères de choix on se référera au tableau III.

## Les capteurs de pression

### Fonction

Il est d'usage de distinguer les indicateurs de pression, qui permet-

## Les capteurs de débit et de comptage

### Fonction

Les capteurs et débitmètres permettent de mesurer les volumes ou

Tableau I : Critères de choix des capteurs de température.

	Thermocouple	Sondes à résistance	Pyromètre optique
Fonctionnement	• Mesure FEM apparaissant entre deux jonctions de soudure chaude et froide.	• Variation d'une résistance en fonction de la température.	• Mesure directe ou par comparaison du rayonnement du corps.
Domaine	• Suivant les types : T : - 200 à 350°C J : -200 à 600°C E : - 200 à 600°C K : 0 à 1 000°C S : 0 à 1 500°C R : 0 à 1 550°C B : 0 à 1 650°C	• - 200 à + 800°C.	• - 50 à + 3 000°C (suivant la longueur d'onde).
Avantages	• Peu de perturbation du milieu. • Temps de réponse réduit (dépend de l'enveloppe). • Possibilité de mesure différentielle. • Mesure dans les endroits peu accessibles. • Possibilité d'étalonnage (précision 0,1°C). • Toutes gammes de prix.	• Grande sensibilité, variation de 0,4 Ω/°C. • Simplicité de la chaîne de mesure. • Précision de la chaîne de mesure. • Insensible aux variations de θ le long de ses conducteurs.	• Temps de réponse très rapide. • Bon vieillissement (pas d'usure). • Mesure de précision. • Mesure θ très élevée. • Mesure θ de pièce en mouvement.
Inconvénients	• Nécessité de correction de soudure froide. • Faible niveau de réponse 40 μV/°C. • Vieillessement. • Erreur induite par câble de compensation.	• Temps de réponse plus important que pour un thermocouple. • Auto-échauffement par courant de mesure perturbe le milieu.	• Entretien de l'appareil. • Coûteux. • Nécessité de connaître l'émissivité de la pièce à mesurer.
Prix	• Dépend de l'enveloppe et de la longueur. Ex. : type K, gaine inox, 1 mm ep, longueur 3 m = 500 F.	• 1 000 à 3 000 F.	• 10 000 à 200 000 F.

Remarque : La fibre optique peut être utilisée comme transmetteur de rayonnement. Elle peut être associée à un capteur miniature en extrémité.



Tableau II : Critères de choix des capteurs de pression.

Principe	Type	Sous-type	Critères
Colonne de liquide	manomètre à tube en U		- indicateur - faibles pressions (courbe débit/pression des brûleurs, pressions sur lignes air/gaz...).
	manomètre à tube incliné		- mesure des très faibles pressions (pression de four par exemple) - plus grande précision que le tube en U.
Déformation solide	manomètre à tube de Bourdon		- indicateur à aiguille - peut fonctionner en déprimomètre - peut être équipé de contacts mini et maxi pour une utilisation en pressostat (cas plus rare).
		manomètre à soufflet	- mesure de la pression atmosphérique jusqu'à des pressions de 25 bar avec une bonne précision - peut être associé à un tambour enregistreur.
	manomètre à membrane	capteur à jauge de contrainte	- délivre un signal électrique fonction de la déformation de la jauge sous la pression - traitement d'un signal faible et influence de la température augmentent la complexité et le coût de ce capteur.
		capteur à transformatrice différentiel	- mesure d'une pression différentielle (courant induit par le déplacement de la membrane) - robustes et précision (~ 1 %) - non conseillé pour les variations très rapides de pression (quelques Hz).
	capteur à effet capacitif	- la capacité électrique varie en fonction de la déformation de la membrane - mesure des très faibles pressions - excellent temps de réponse.	
Piézo-électrique	Capteur piézo-électrique		- la pression appliquée au quartz fait varier sa fréquence de résonance - temps de réponse extrêmement rapide - peu sensible (quelques milibars) - coût avantageux pour des pressions > à 100 mbar.

Tableau III

Types	Précision	Dynamique (1)	Plage débits (m <sup>3</sup> /h)	Plage diamètre (mm)	Pression amont admissible	Perte de charge	Prix ~ F pour 1"
Diaphragme	2-5 %	1-4	sans limite	50-100	> 150 bar	50 % Δ P	7 000 à 14 000
Débitmètre à flotteur	2-5 %	1-10	0,1 à 200	4-125	40 b (verre)	Faible	
Turbine	1-3 %	1-10	10-16 000	25-1 200	640 b	Faible	
Piston rotatif	1 %	1-20	2-1 000	10-300	200 b	Moyenne	
Vortex	1 %	1-20	13-16 000	25-200	300 b	Faible	
Thermique	1 %	1-50	3,0-1 000	< 13	400 b	Élevée	
Pitot	2 %	1-4		> 300	140 b	Faible	

(1) Plage du débit de fonctionnement d'un appareil sur laquelle il conserve la précision de mesure annoncée.  
(Ex. : si  $Q_{min} = 1 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow Q_{max} = 4 \text{ m}^3/\text{h}$  (diaphragme))

## Les analyseurs d'oxygène dans les produits de combustion

### Fonction

Ces appareils ont pour fonction la mesure du taux d'oxygène dans les produits de combustion. Les analyseurs à sonde zircone (in-

situ ou semi-in-situ) peuvent être facilement utilisés dans une boucle de régulation d'O<sub>2</sub>.

Les systèmes nécessitant un prélèvement d'échantillon sont plus difficiles à utiliser en boucle de régulation (temps de réponse long, nécessité d'un échantillonnage continu).

### Principes

Trois principes de capteur sont mis en œuvre : la sonde zircone, la

susceptibilité magnétique, les sondes galvaniques.

### Règles d'utilisation

Tous ces analyseurs nécessitent un contrôle régulier de l'étalonnage avec un gaz étalon (azote sur oxygène) ou avec de l'air.

Dans les systèmes à prélèvement de produits de combustion, il faut prévoir l'évacuation des condensats

et prendre garde aux entrées d'air sur le circuit de prélèvement.  
La durée moyenne de vie est de 2 à 3 ans pour les sondes zircones, de 6 mois à 1 an pour les cellules galvaniques et supérieure à trois ans pour la susceptibilité magnétique.  
Pour déterminer le type d'appareil à utiliser on se référera au tableau IV.

## Les simulateurs de combustion ou analyseurs des caractéristiques du gaz

Les tableaux V et VI permettent de comparer les différents appareils

utilisables et les critères qui peuvent guider leur choix.

## Les vannes

La vanne de régulation est l'un des actionneurs essentiels dans un système de contrôle-commande de procédé.

Tableau IV : Critères de choix d'un analyseur d'oxygène.

Paramètres		Étendue de mesure % O <sub>2</sub>	Précision % O <sub>2</sub>	Temps de réponse	Sélectivité	Sensible à la pression	Sensible au débit de l'échantillon	Sensible à la température	Possibilité utilisation en régulation
Type d'appareil									
Analyseurs à sondes zircones	In-Situ	Toutes gammes	< 1 %	1" à 3"	Oui	Non	Peu sensible	Oui θ° < 600°C et correction ou θ° régulée	Oui
	Semi In-Situ			2" à 5"				Oui θ° régulée	Oui
	A prélèvement de fumées			5" à 20"				Oui θ° régulée	Oui avec précautions
Analyseurs magnétiques	A prélèvement de fumées	0-100 %	< 1 %	< 10"	Sensible à certains gaz	Pression constante	Oui	Peu sensible	Non
Analyseurs galvaniques	A prélèvement de fumées	0-100 %	1 %	< 10"	Oui	Non	Peu sensible	Oui (correction ou θ° régulée)	Non

Tableau V : Tableau comparatif des simulateurs ou analyseurs de gaz.

	Mesure	Applications	Étalonnage
Comburimètre	Indice de comburité $R = \frac{Va^*}{\sqrt{d}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capteur utilisé pour compenser les effets de variations des caractéristiques du gaz naturel sur les équipements de chauffe.</li> <li>- Aide au diagnostic lorsque des perturbations de production apparaissent sur les installations utilisant du gaz naturel.</li> <li>- Utilisable en Wobbemètre pour les gaz naturels.</li> <li>- Utilisable en calorimétrie (comburimètre volumétrique).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gaz étalon oxygène (1 à 4 % O<sub>2</sub> dans N<sub>2</sub>)</li> <li>et</li> <li>- Gaz étalon méthane (CH<sub>4</sub> pur)</li> </ul>
Wobbemètre	Indice de Wobbe $W = \frac{PCS^*}{\sqrt{d}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure en direct et en continu l'indice de Wobbe.</li> <li>- Permet de reconnaître et de corriger les variations de la qualité combustible du gaz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avec un gaz étalon dont l'indice de Wobbe est parfaitement connu.</li> </ul>
Chromatographe	Constituants du gaz analysé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de connaître tous les constituants du gaz utilisé.</li> <li>- Mesure discontinue (2 à 20 analyses/heures).</li> <li>- Peut-être installé indépendamment et analyser le gaz de l'installation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par bouteille étalon contenant les gaz N<sub>2</sub> ; CH<sub>4</sub> ; CO<sub>2</sub> à des concentrations proches de celles des gaz analysés.</li> </ul>
Calorimètre	Pouvoir calorifique PCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure continue le Pouvoir Calorifique.</li> <li>- Fournit une mesure fiable qui peut être prise en compte dans les systèmes de régulation des fours.</li> <li>- Peut-être fourni par un comburimètre volumétrique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selon la technologie.</li> </ul>
Densimètre	Densité d	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure continue de la densité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selon la technologie.</li> </ul>

\* Va : pouvoir comburivore; d : densité; PCS : pouvoir calorifique supérieur.



Tableau VI : Critères de choix des simulateurs aux analyseurs de gaz.

	Étendue de mesure	Précision	Temps de réponse	Température d'utilisation	Possibilité de mise en boucle de régulation	Fournisseurs	Prix
Comburimètre	10 < B < 14	< 1 % de la valeur mesurée	< 10 s à 95 %	1 à 40°C	Oui	Recomat Anafluid Arelco + Robservice	60 000 à 180 000
Wobbmètre	11 < W < 16	± 1,5 % de la valeur finale de l'échelle	500 s à 95 %	5 à 40°C	Non	Union Beri Fluid- Système	
Chromatographe	Selon colonne utilisée	Enregistreur < 0,5 %	Durée d'analyse : > 3 mm	10 à 30°C	Oui	Varian HP ABB SRA	
Calorimètre	PCS 9 à 13	Selon technologie	Selon technologie	15 à 30°C	Selon technologie	Arelco Instrumet Robservice	
Densimètre	0,55 à 0,7	± 0,5 % de la plage de mesure	< 2 s	0 à 40°C	Oui Sortie	Beri Arelco	

Son but est de réguler les débits d'air et de gaz admissibles au brûleur.

### Principe

La vanne de régulation est composée de trois parties : le corps de vanne, le servomoteur et le positionneur.

La vanne est commandée par le servomoteur ; celui-ci reçoit l'ordre de commande du régulateur et vient agir sur l'actionneur (corps de vanne). Une reprise en commande manuelle est possible sur certaines vannes.

A la variation du signal de commande doit correspondre une variation de débit du fluide selon une loi établie (importance du choix de la caractéristique de la vanne) et avec un minimum de retard et d'hystérésis (rôle du positionneur). On rencontre divers types de corps de vannes qui correspondent chacune à un type d'application. Le corps de vanne est caractérisé par son coefficient de débit (Cv), sa caractéristique (courbe de débit fonction de la course du clapet) et son coefficient de débit critique (Cf). Leurs critères de choix sont donnés dans le tableau VII.

## Les régulateurs-détendeurs de pression

### Fonction

Le rôle du régulateur-détendeur est, dans un premier temps, de détendre le fluide à la pression désirée en aval, puis de maintenir cette pression quelles que soient les variations (débit, pression en amont, etc.).

Certains régulateurs de pression assurent de plus une fonction de sécurité (fermeture du clapet étanche si rupture de la membrane).

### Principes

Il existe deux catégories d'appareils :

- les régulateurs à action directe (à ressort),
- les régulateurs à action indirecte (pilotés).

La consigne de pression en aval est donnée par la pression du ressort ou par la pression du pilote selon le principe. La mesure de pression en

aval est faite par une prise d'impulsion sur la canalisation en aval du détendeur.

Les critères de choix sont résumés dans le tableau VIII.

## Les régulateurs de rapport air-gaz

### Fonction

Le régulateur de rapport air-gaz permet de maintenir constant le rapport des débits d'air et de gaz nécessaire à la combustion.

Ces régulateurs peuvent être utilisés en amont d'un système à prémélange ou pour alimenter un système à mélange au nez du ou des brûleurs.

### Principes

Différents systèmes sont mis en œuvre pour l'alimentation en air et en gaz des brûleurs :

- comparaison des pressions différentielles (représentant les débits respectifs),
- comparaison des pressions sta-

Tableau VII : Critères pour le choix des vannes.

	Conventionnelles		A cage	Opercule excentré	Papillon	A clapet
	Double siège	Simple siège				
Dimensions nominales courantes (pouces)	1 à 16	1/2 à 16	1/2 à 16	1 à 24	2 à 100	1/2 à 1
Coefficient de débit réduit nominal moyen	12	10	13	15	30	non significatif
Aptitude à résister aux $\Delta P$	Bonne clapet dit « équilibré »	Moyenne clapet non « équilibré »	Excellente (avec un obturateur « équilibré »)	Bonne	Bonne	Bonne (clapet de faible dimension)
Stabilité dynamique	Moyenne	Bonne	Excellente	Bonne	Moyenne (couple important à l'ouverture)	Bonne
Caractéristiques intrinsèques de débit courantes	Au choix	Au choix	Au choix	Linéaire	Exponentielle	Linéaire
Dynamique d'échelles courantes	50	50	100	100	30	50
Étanchéité à la fermeture métal/métal	Médiocre	Bonne	Bonne à excellente	Bonne	Médiocre	Bonne à excellente
Types d'applications	Générales mais limitées par l'étanchéité à la fermeture	Générales mais limitées par la $\Delta P$ à la fermeture	Générales	Générales	Générales mais limitées par la $\Delta P$ à l'ouverture et l'étanchéité à la fermeture	Générales
Prix d'achat relatif à dimension 3" (80 mm)	115	75	100*	70	50	
Coût d'entretien						
Tendance d'utilisation	En baisse	En baisse	Stationnaire	En augmentation	En augmentation	

\* Les valeurs sont comparées à celles d'une vanne à cage (base 100).

tiques (pressions air et gaz au brûleur),

– comparaison des débits massiques,

– aspiration du gaz par passage de l'air dans un venturi.

Tableau VIII : Quelques critères de choix des régulateurs-détendeurs de pression gaz.

	Action directe	Piloté
Débit maximal	$\leq 1\ 000\ \text{m}^3(\text{n})/\text{h}$	$> 1\ 000\ \text{m}^3(\text{n})/\text{h}$
Variations de débit	Rapides	Lentes
Précision sur la valeur de $P_{\text{aval}}$	+ 5 %	$\pm 2\ % ; \pm 1\ %$
Pression amont	MP	MP/HP
Coût	Modéré	Plus élevé

Néanmoins d'autres critères sont à prendre en compte :

- type de débit : modulé ou tout ou rien,
  - précision sur la pression aval requise,
  - valeur de la pression amont,
  - l'environnement (sécurité, bruit, accessibilité...).
- Cette liste n'est pas exhaustive.

## Évolution technologique des composants

### Les capteurs et actionneurs intelligents

Longtemps resté un concept abstrait pour les utilisateurs, l'instrumentation intelligente recouvre aujourd'hui une réalité concrète à travers une offre de capteurs et d'actionneurs chez tous les grands constructeurs de matériels. Certains



Tableau IX : Critères de choix des régulateurs de rapport air-gaz.

Caractéristiques										
Types	Précision	Temps de réponse(s) O <sub>min</sub> → O <sub>max</sub>	Dynamique (1)	Pression amont max (bar)	Plage des débits (m <sup>3</sup> /h)	Plage des diamètres (mm)	E.V. sécurité (2)	Réglages (3)	Constructeurs	Prix - F pour 1"
SKP 70	2 à 10 %	5 s	1:5	1,2 bar	10 à 390	15 à 125	* 1 s	0,4 à 9	Landis et Gyr	1 300 à 15 000
SKP 50	2 à 10 %	5 s	1:5	1,2 bar	10 à 390	15 à 125	* 1 s	Diaphragme	Landis et Gyr	
BZR	3 à 7 %	1 s	1:8	140 mbar	4,5 à 1 000	20 à 100	Non	Non	Pyrodiff	
Moduline ML1-Gvo	2 à 10 %	5 s	1:7	500 mbar		20 à 25	* 1 s	0,7 à 7	Gastechnic	
GIH		1 s		200 mbar	10 à 70	25 à 40	Non	Diaphragme	Kromschr.	
VRG-VH		≥ 0,5 s		130 mbar	20 à 200	40 à 125	*	0,7 à 6	Kromschr.	
ERC électronique	+ 3 %		1:10	3 bar	Tous	Tous	Non	Vannes	Albion	
FCR		1 s		100 mbar	18 à 73	20 à 40	Non	Diaphragme	Pyrodiff	

(1) Plage de fonctionnement de l'appareil (débit) sur laquelle il conserve la précision indiquée sur la mesure du rapport.

(2) Temps de fermeture des électrovannes de sécurité intégrés (lorsqu'il y en a).

(3) Plage de réglage du rapport (lorsque possibilité).

de ces produits peuvent être utilisés pour la régulation des fours ou sur les lignes air-gaz : capteurs de pression, température, débit, vannes de régulation.

Vendue avec un surcoût qui tend à diminuer, cette nouvelle génération de composants de technologie numérique se distingue de la précédente (capteurs et actionneurs analogiques) sur quatre points :

- amélioration de la précision, grâce au traitement numérique local des grandeurs physiques,
- configuration personnalisable du composant à l'aide d'une « calculatrice » ou par logiciel,
- procédures d'autotest et d'auto-diagnostic facilitant la maintenance,
- communication numérique avec les organes de régulation et de contrôle-commande par BUS de terrain (Binary Unit System).

L'intérêt de cette dernière fonctionnalité reste toutefois limité, à ce jour, par l'absence de protocoles de communication normalisés garantissant l'interopérabilité entre composants de fournisseurs différents. La formation récente, à l'échelle mondiale, d'associations de grands constructeurs (WorldFIP, FieldBus

Fondation) permet d'espérer que ce problème sera résolu dans les années futures.

## Intégration des composants de la ligne air-gaz

L'évolution actuelle de la conception et de la mise en œuvre des lignes air-gaz est marquée par l'apparition de panoplies standard préfabriquées, proposées par certains constructeurs de brûleurs, et par une offre grandissante de macro-composants multi-fonctionnels pour ligne gaz. Ces dispositifs permettent de réaliser dans un seul appareil multibloc des fonctions de sécurité et de réglage (filtre, sectionnements de sécurité, détente, ratio air-gaz, contrôle d'étanchéité). Ces appareils, développés principalement en Allemagne et en Suisse pour le marché des chaudières du résidentiel et du tertiaire, trouvent des applications sur la plupart des procédés industriels basse température, de faibles et moyennes puissances, alimentés à

des pressions inférieures à 350 mbar.

Pour les fours industriels de puissances plus importantes et fonctionnant à plus haute température, des projets sont en cours pour améliorer la compacité et les performances des lignes air-gaz.

### Les évolutions liées à la norme EN 746

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1995, les fours industriels nouvellement construits sont soumis à des contraintes réglementaires issues de la directive européenne sur la sécurité des machines. Tout constructeur d'équipement neuf doit notamment : signer une déclaration par laquelle il certifie la conformité de l'équipement aux exigences essentielles de la directive, et effectuer un marquage CE sur l'installation. Cette directive ne concerne pas les chaudières.

Pour faciliter le travail des constructeurs de fours, une norme élaborée au niveau européen, traduit en termes de prescriptions techniques les exigences de la directive.

Cette norme (EN 746) traite dans

sa partie 2 de tous les aspects relatifs aux lignes air-gaz. Pour l'essentiel, elle formalise des règles de l'art déjà souvent pratiquées par la profession. Parmi ses éléments les plus remarquables, on peut citer :

- l'installation quasi-systémique de deux vannes de sécurité de classe « A » d'étanchéité,
- l'installation d'un contrôleur d'étanchéité sur les équipements de puissances supérieures à 1 200 kW,

- une codification des procédures de démarrage, d'arrêt et de mise en sécurité de l'équipement,
- une description du contenu des notices d'instruction et de maintenance.

## Gaz et règles de sécurité

### Source et nature des risques

#### *Pression du gaz naturel*

Le gaz naturel fortement comprimé renferme beaucoup d'énergie de pression pouvant être libérée brutalement en cas de rupture, ou en cas d'intervention erronée sur une canalisation ou une capacité pressurisée.

#### *Propriétés chimiques des gaz*

**Intoxication** : dans les proportions où l'on risque d'inhaler les composés du gaz naturel ou des gaz de pétrole, on peut dire que ces gaz ne sont pas toxiques.

**Asphyxie** : le gaz naturel et les gaz de pétrole ne comportent pas d'oxygène indispensable à la vie. Une personne soumise à une atmosphère contenant beaucoup de gaz risque donc de s'asphyxier par manque d'oxygène. Contrairement au butane et au propane plus lourds que l'air, le risque d'asphyxie avec le gaz naturel est plus faible au niveau du sol que dans la partie supérieure d'un local.

#### *Propriétés chimiques du mélange de l'air et du gaz*

Les gaz sont utilisés pour leur propriété de pouvoir brûler lorsqu'on les mélange avec de l'air ; cette

propriété est la principale source de risques liée à toute fuite de gaz.

Deux conditions impératives sont simultanément requises pour que se produise une inflammation :

- mélange du gaz avec l'air dans une proportion de 5 à 15 %,
- présence d'une flamme, d'une étincelle ou d'un point chaud (plus de 600°C).

**Explosion par détonation** : la détonation est une explosion très violente où l'onde de choc se déplace à une vitesse quelquefois de plusieurs kilomètres par seconde.

Le gaz naturel ne peut en aucun cas conduire à une explosion par détonation.

**Explosion par déflagration** : la déflagration est une explosion où, seule la flamme se propage à une vitesse relativement lente de quelques mètres par seconde. Dans un local fermé, la déflagration peut également avoir des effets de destruction mécanique (paroi arrachée, objet projeté, ...).

Le gaz naturel peut conduire à une explosion par déflagration.

**Incendie** : comme pour tout autre combustible, lorsque la combustion se produit en présence d'autres produits inflammables, on risque une propagation d'un incendie.

#### *Propriétés chimiques des produits de combustion de l'air et du gaz*

La combustion du gaz, des gaz de pétrole ou de tout autre combustible

libère des produits normalement composés de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, ainsi que de l'azote et de l'oxygène en provenance de l'air de combustion.

Une combustion incomplète peut conduire à des produits comportant des quantités importantes de monoxyde de carbone-CO, voire dans un cas extrême, des gaz non brûlés et de la suie.

#### *L'intoxication*

- **Le monoxyde de carbone est un gaz inodore hautement toxique**, qui se fixe dans le sang et qui empêche l'échange dans les poumons entre l'oxygène et le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>. L'intoxication au monoxyde de carbone débute par des maux de tête, une baisse de l'acuité auditive et souvent une impression angoissante de manque d'air. Le coma survient au bout d'un temps variable ; convenablement traité (respiration artificielle d'oxygène pur), il évolue vers la guérison.

- Le dioxyde de carbone n'est pas toxique. A de très fortes concentrations (non rencontrées dans le cas de combustion avec l'air), il est très irritant pour les voies respiratoires du fait de son acidité.

#### *Les autres risques*

**Asphyxie** : La combustion consomme l'oxygène présent dans l'air. Une évacuation des produits de combustion et un renouvellement de l'air du local considéré doivent donc être prévus.

**Explosion** : Le monoxyde de carbone, les gaz non brûlés, la suie,

éventuellement présents à la suite d'une combustion très incomplète, sont combustibles. En cas de concentration importante, ils peuvent donc comporter les mêmes risques d'explosion ou d'incendie.

## Protection contre les risques

Le paragraphe précédent montre que, comme pour tout autre combustible, des mesures sont à prendre pour assurer une utilisation sans risque.

Elles doivent être prises à tous les niveaux, du poste de livraison jusqu'à l'évacuation des produits de combustion et ce depuis la conception jusqu'à la maintenance.

### *Livraison du gaz naturel : le poste de comptage*

Conçu pour assurer le comptage et éventuellement une détente du gaz, le poste de livraison intègre dans sa conception des éléments essentiels en matière de sécurité :

- local ventilé (par exemple un mur, 3 faces grillagées),
- vanne d'arrêt amont, située à l'extérieur du poste,
- équipement de sécurité dans le poste : filtre, soupape, vannes de sécurité, manomètre,
- accessoires de sécurité : plaque de consigne, extincteur, clef de manœuvre de la vanne d'arrêt.

La maintenance de ces installations reste du domaine d'intervention exclusif du fournisseur de gaz.

### *Distribution du gaz : le réseau intérieur*

Les paramètres à prendre en considération sous l'angle de la sécurité, lors de la conception du réseau intérieur, sont :

- la pression de service et la pression maximale en service,
- les températures extrêmes du gaz que l'on peut fixer entre – 15 à

+ 55°C ; cette précaution permet de pallier l'éventuelle formation d'un manchon de glace, la fragilité du matériau et les phénomènes de dilatation de la canalisation,

- la corrosion,
- l'environnement immédiat du réseau.

La prévention du risque lors de l'utilisation concerne les mises en service/hors service :

- mise en service : chasse directe de l'air par le gaz,
- mise hors service : chasse du gaz par air soufflé (ou azote), avec évacuation par tube de purge à l'extérieur du bâtiment.

La maintenance consistera à vérifier périodiquement les organes mécaniques (détendeurs-souppes-vannes, etc.) et l'état de protection de la canalisation.

### *Sécurité des équipements de combustion*

Les dispositifs de sécurité auront pour but de prévenir tous risques d'accumulation de gaz dans la chambre de combustion, et en l'absence de flamme, d'une quantité notable de combustible imbrûlé qui, en mélange avec l'air, peut exploser en présence d'une source d'inflammation.

Diverses réglementations imposent par type d'équipement un certain nombre de dispositifs à employer. Des dispositifs de sécurité, sont mentionnés ci-après à titre *indicatif* et seront donc complétés en fonction des exigences de la réglementation en vigueur.

L'appareillage minimum de sécurité que l'on retrouvera sur la ligne d'alimentation air-gaz comprend :

- une vanne de sectionnement en tête de l'installation,
- un filtre sur l'arrivée gaz,
- un manostat détecteur de l'insuffisance ou de l'excès de pression de gaz,
- un manostat détecteur de débit d'air,
- un dispositif détecteur de flamme,

- deux électrovannes de sécurité,
- un dispositif de sectionnement par brûleur.

La mise en œuvre de ces différents dispositifs doit être clairement définie dans le manuel d'instructions (procédures de démarrage, d'arrêt, de fonctionnement automatique ou manuel).

La maintenance de ces différents dispositifs est également un élément très important qui doit être spécifié dans un manuel d'instructions pour préciser :

- les périodicités d'entretien,
- les procédures à respecter (arrêt, procédure de test, remise en service).

Outre la maintenance préventive de l'appareillage ci-dessus, on peut considérer qu'un élément important de la maintenance consiste également en un contrôle périodique des produits de combustion pour vérifier l'absence de formation d'imbrûlés due à un mauvais mélange de l'air en trop grand excès est un gaspillage certain et peut conduire à des pertes de rendement importantes.

### *Évacuation des produits de combustion et ventilation des locaux*

Il existe de nombreuses méthodes de dimensionnement des conduits d'évacuation des produits de combustion.

Le rôle d'un conduit d'évacuation est souvent, non seulement de canaliser des produits de combustion vers l'extérieur mais aussi, de créer une dépression suffisante pour assurer le fonctionnement d'un appareil de combustion. Il est donc évident que son calcul dépend des appareils qui doivent y être raccordés.

Par ailleurs, il participe en général à l'aération du local puisque l'air de combustion, venant de l'extérieur, traverse le local avant d'arriver au brûleur.

La détermination du débit de ventilation du local devra donc prendre en compte :

- l'air à fournir aux appareils de

combustion existant dans le local considéré,  
– le volume des produits de combustion éventuellement dégagés dans le local.

Le résultat à obtenir, du point de vue de l'hygiène et de la sécurité des locaux, peut être défini par la notion de CMA (concentrations maximales admissibles en séjour permanent de 8 heures répété chaque jour).

Les valeurs volumiques des CMA, généralement reconnues pour les corps pouvant provenir d'une combustion, sont les suivantes :

Dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub> 5 000 p.p.m.

Monoxyde de carbone, CO 50 p.p.m.

Monoxyde d'azote, NO 5 p.p.m.

Dioxyde d'azote, NO<sub>2</sub> 25 p.p.m.

Formaldéhyde, HCHO 2 à 5 p.p.m.

Anhydride sulfureux, SO<sub>2</sub> 5 p.p.m.

– émission de polluants divers : ce sont des gaz, vapeurs, poussières, fumées et brouillards toxiques ou des gaz, vapeurs et poussières inflammables, résultant de l'opération thermique réalisée avec le gaz. Des valeurs empiriques de taux de

renouvellement d'air (rapport du débit horaire d'air, en mètres cubes/heure, au volume du local, en mètres cubes) ont été publiées. Voici quelques-unes de ces valeurs indiquées dans le tableau X.

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif et ne dispensent pas des calculs, surtout lorsqu'il y a risque de présence de polluants toxiques ou inflammables.

Tableau X : Taux de renouvellement d'air.

Locaux professionnels	Valeur empirique du taux de renouvellement d'air
Ateliers de peinture	30 à 60
Ateliers d'usinage	6 à 10
Blanchisseries	20 à 30
Fonderies	20 à 30
Laboratoires	4 à 6
Teintureries	20 à 30

### Ce qu'il faut faire dans le cas d'odeur de gaz dans un local

- 1 - faire évacuer le local,
- 2 - couper l'alimentation en gaz du local,
- 3 - ne rien manœuvrer sur les circuits électriques, y compris le téléphone,
- 4 - aérer au maximum en ouvrant portes et fenêtres,
- 5 - ne pas approcher avec une lumière,
- 6 - selon l'étendue de l'odeur et les possibilités d'intervention sur le réseau,
  - appeler les pompiers et prévenir le fournisseur de gaz,
  - couper l'alimentation générale,
  - rechercher la fuite avec l'eau moussante.

**Il est formellement interdit** de rechercher la fuite avec une flamme.