

tirons la conclusion, à l'heure où les appareils automatiques (avec microprocesseur intégré) se multiplient sur le marché, qu'il est difficile, dans un domaine pourtant aussi connu que la chromatographie en phase gazeuse, d'offrir un mode d'automatisation unique quelle que soit la fonction effectuée par l'appareil. Nous sommes arrivés pour notre part à conserver une architecture

commune à nos différentes expériences, mais avec trop de différences au niveau du traitement de détail pour pouvoir unifier totalement nos systèmes. Des systèmes automatisés « multi-usages » doivent donc, nous semble-t-il, être envisagés avec prudence surtout s'ils se présentent sous une forme non modulaire, non adaptable par l'utilisateur en fonction de ses besoins.

Signalons pour terminer que cette expérience nous aura été très utile sur le plan de l'enseignement, puisqu'une part importante de l'étude a été réalisée avec la collaboration successive de groupes d'élèves-ingénieurs, dans le cadre de projets d'initiation à l'informatique industrielle.

Automatisation du contrôle de la composition et du calcul des caractéristiques des gaz naturels Système COCAGNE

par M. Charron, J.-P. Coquand et J.-J. Chéron

(Centre d'Essais et de Recherches sur les Installations Gazières, Direction des études et techniques nouvelles, Gaz de France, La Plaine Saint-Denis).

Dans le cahier des charges type pour la concession des distributions publiques de gaz sont définis les droits et obligations de l'autorité concédante (en général une municipalité) et de l'établissement public concessionnaire (Gaz de France). On trouve au chapitre IV une clause « qualité du gaz distribué » qui définit les paramètres à contrôler. Ils sont au nombre de quatre :

- la pression, dont on fixe la fourchette de variation ;
- le pouvoir calorifique,
- les caractéristiques de combustion, qui doivent rester sensiblement constantes dans un appareil d'utilisation conforme aux normes françaises et en bon état de fonctionnement,
- l'odeur, qui doit toujours être suffisante et caractéristique pour que les fuites soient immédiatement perceptibles à l'odorat et qui doit disparaître par la combustion complète du gaz.

L'esprit du texte est d'assurer la régularité de la transaction commerciale et la sécurité du public.

Établi à l'époque où l'on distribuait essentiellement du gaz de houille, le cahier des charges est le reflet des soucis de l'industrie gazière de l'époque. Malgré la profonde mutation de celle-ci, il n'en demeure pas moins valable à quelques aménagements ou mises à jour près.

La pression liée à la qualité de la distribution ne nous intéressera pas dans la suite, qui concernera uniquement les trois autres facteurs, représentant réellement la qualité du gaz.

Au départ, pouvoir calorifique et caractéristiques de combustion ont été mesurés par des appareillages normalisés simples. Dans certaines petites exploitations, par exemple pour contrôler le pouvoir calorifique, on mesurait le volume de gaz nécessaire pour évaporer une masse d'eau connue dans un système brûleur - récipient bien défini.

Ces déterminations rendaient compte de la

conformité aux spécifications mais ne constituaient pas de véritables mesures.

Les appareils de mesure, cependant, existent, mais leur coût et les contingences qu'ils imposent les ont réservés pendant longtemps aux exploitations importantes.

Avec le calorimètre automatique Cutler-Hammer, on mesure le pouvoir calorifique en transférant la chaleur obtenue par la combustion du gaz à un courant d'air et en mesurant l'élévation de température de cet air. Les débits de gaz et d'air sont dans un rapport fixe, à une température qui est celle d'un bain d'eau. Les gaz de combustion sont isolés de l'air chargé d'absorber la chaleur et refroidis de façon à être à une température à peine supérieure de quelques degrés à la température de l'air et du gaz entrants. Dans ces conditions, l'eau formée dans la combustion se condense et l'élévation de température est proportionnelle au pouvoir calorifique du gaz. Celle-ci est mesurée par un thermomètre à résistance.

Cet appareil nécessite une climatisation soignée car, si sa lecture est une fonction linéaire de la résistance du thermomètre, cette dernière est, elle, une fonction quadratique de la température ; par conséquent, en ambiance non contrôlée, la réponse ne sera pas une fonction linéaire du pouvoir calorifique. De même, lorsque la température extérieure se modifie, les débits de gaz et d'air entrants changent ainsi que leur teneur en vapeur d'eau. Enfin, la maintenance d'un tel matériel impose une visite hebdomadaire. Il s'agit cependant là d'un appareil de base de l'industrie gazière.

Les caractéristiques de combustion (indice de Wobbe * essentiellement peuvent être

* L'indice de Wobbe repère le débit calorifique d'un appareil donné alimenté sous pression constante auquel il est proportionnel. Il s'exprime en kilowatts-heures par mètre cube normal.

mesurées à l'aide du brûleur-contrôleur, type Gaz de France. La détermination est précise, certes, mais délicate pour les gaz naturels, avec lesquels de multiples précautions sont nécessaires pour éliminer les erreurs dues aux conditions ambiantes. Une forme analytique, issue d'études théoriques, a été trouvée pour l'indice de Wobbe : ce dernier est égal au pouvoir calorifique divisé par la racine carrée de la densité du gaz :

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d}}$$

On préfère donc aujourd'hui, pour l'obtenir, associer au calorimètre dont il a été question plus haut un densimètre.

En ce qui concerne l'odeur, le contrôle se faisait par des équipes spécialement entraînées. La mesure a d'abord été celle d'un pouvoir odorant, puis celle d'une intensité d'odeur.

En dehors de ces paramètres qu'elle a obligation de contrôler, l'industrie gazière a également ses propres besoins : elle souhaite disposer des caractéristiques physiques des gaz qu'elle achète, transporte, stocke et distribue, ne serait-ce que pour établir ses bilans. Les caractéristiques essentielles sont le facteur de compressibilité (Z) pour le calcul des débits, la viscosité qui intervient dans le calcul des pertes de charge, le rapport des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants pour la compression, les températures de rosée eau et hydrocarbures pour la sécurité du transport.

En fait, chacun des paramètres envisagés ci-dessus est fonction de la composition des gaz. Il importe donc, dans un premier temps, de faire l'analyse du gaz de façon simple. Comment se pose le problème ? La composition d'un gaz naturel épuré est donnée dans le tableau I.

A l'examen de ce tableau, on se rend compte que seule la chromatographie permettra

Tableau I. Composition d'un gaz naturel épuré.

Constituants	Concentration	
He	0-0,07 mole %	Inertes
H ₂	0-0,05	
A	0-0,004	
O ₂	0-0,002	
N ₂	0,2-15	
CO ₂	0-2	
CH ₄	80-97	
C ₂ H ₆	1,5-10	
C ₃ H ₈	0,1-4	
i-C ₄ H ₁₀	0,05-1,5	
n-C ₄ H ₁₀	0,05-1,5	
néo-C ₅ H ₁₂	0,001-0,2	
i-C ₅ H ₁₂	0,002-0,4	
n-C ₅ H ₁₂	0,002-0,4	
C ₆ et +	i-C ₆ H ₁₄ n-C ₆ H ₁₄ benzène cyclohexane	
	i-C ₇ H ₁₆ n-C ₇ H ₁₆ toluène n-C ₁₀ H ₂₂	0-0,07 mole %
H ₂ O	0-300 mg/m ³ (n)	Température de rosée eau. Risque de formation d'hydrates (sécurité du transport sous pression)
MeOH	0-2 000 mg/m ³ (n)	
S _T	H ₂ S	0-150 mg/m ³ (n) (Utilisation industrielle)
	CH ₃ SH	
	C ₂ H ₅ SH	
	i-C ₃ H ₇ SH	
	n-C ₃ H ₇ SH	
	t-C ₄ H ₉ SH	
	sec-C ₄ H ₉ SH	
	i-C ₄ H ₉ SH	
	n-C ₄ H ₉ SH	
	T.H.T.	
COS	0-30	
CS ₂	—	
		Odeur (sécurité du public)

l'analyse d'un pareil mélange et que, suivant le paramètre à contrôler, on ne s'intéressera pas aux mêmes constituants.

Analyse en vue du calcul des caractéristiques physiques et des caractéristiques de combustion

Quatre solutions ont été définies en fonction de la nature du gaz et de la définition recherchée :

- analyse des constituants majeurs du gaz (inertes, CO₂, C₁ à C₅) en quinze minutes (cas des gaz naturels ayant subi une liquéfaction), solution de base ;
- même analyse que précédemment plus estimation des hydrocarbures lourds par l'utilisation de la technique de l'inversion de débit (cas général) ;
- solution de base, accompagnée de l'analyse de la fraction C₄-C₁₀ ;

- solution de base, accompagnée de l'analyse de la résolution des inertes.

Analyse en vue de contrôler l'odorisation (*)

Les composés sulfurés sont les seuls concernés et parmi eux on ne considère que les thiols et le tétrahydrothiophène (THT), ce dernier étant un composé destiné à odoriser les gaz ne présentant pas d'odeur propre. Dans ce cas, la mise au point d'un détecteur électrochimique spécifique a simplifié le problème analytique (appareil Medor).

Dans chacun des cas, on a cherché une solution chromatographique simple en s'at-

* Pour assurer la sécurité du transport, on s'intéresse seulement à la présence d'eau, de méthanol et d'H₂S dans le gaz.

tachant particulièrement à travailler à température constante au niveau du four, à éliminer les commutations. Seule la technique d'inversion de débit a été conservée car, moyennant le remplacement de la vanne d'injection à six voies par une vanne à dix voies, elle ne nécessite pas l'introduction d'une vanne supplémentaire.

Là, se termine le rôle de l'analyse. Parallèlement, en laboratoire, des méthodes de calcul ont été élaborées pour calculer les différentes variables mentionnées. Des expériences très fines, avec les meilleurs méthodes de mesure dans les conditions les plus rigoureuses, ont permis d'établir la validité des modèles établis. La jonction entre les deux se fait par l'informatique.

La chromatographie se prolonge en effet par son système d'acquisition de données. Aux intégrateurs à logique câblée ont, dès 1974, succédé des appareils à microprocesseurs d'une souplesse et d'une puissance infiniment plus grandes. La possibilité, sur ces derniers, de programmer les paramètres d'intégration, de forcer l'intégration tangentielle, de forcer la ligne de base, de grouper des pics, permet à l'opérateur d'imposer à l'appareil la façon dont il doit intégrer les pics. Des séquences d'étalonnage et d'analyse peuvent être aisément définies. Le système, après avoir identifié les constituants, va jusqu'au calcul des concentrations, suivant les méthodes classiques utilisées en chromatographie. Enfin, il peut aller jusqu'à transformer n'importe quel chromatographe en un chromatographe automatique. En effet, on dispose de temporisations qui, moyennant un coffret électronique, permettent :

- de commander la vanne d'injection,
- de commander un échantillonneur.

Plusieurs analyseurs peuvent être connectés sur un système centralisé.

Cependant, en ce qui concerne les problèmes gaziers, le fait d'avoir la composition même de façon automatique ne nous suffit pas. C'est en effet des variables gazières que l'exploitant a besoin.

La solution passe donc par l'adjonction à ces ensembles de capacités de calcul internes ou externes, ce qui correspond à la définition dans notre industrie de systèmes COCA-GNE.

Ayant ressenti un besoin que nous n'étions pas les seuls à avoir, les constructeurs offrent ces possibilités de calcul ; réduites pour certains appareils, elles ne permettent que le calcul de forme linéaire ; plus complètes sur d'autres, elles vont jusqu'à la disponibilité du langage BASIC. Ces appareils préprogrammés ne permettent cependant pas, en général, de mettre en œuvre une programmation économique. Par ailleurs, sur les modèles ayant une capacité réduite, on peut noter certaines erreurs systématiques susceptibles de se révéler gênantes, au niveau par exemple des arrondis et des sommes (fig. 1).

Une autre solution passe donc par l'addition au système d'un calculateur. Les possibilités deviennent alors quasi infinies et l'on restreint ainsi le rôle de l'intégrateur-

ANALYSE.G.N.		1979 JUN 29 11:01:03					
CHANNEL	1	RUN	12	FILE	1	METHOD	1
INDEX	12	SAMPLE BEYNES.17(31.05.79)					
NAME	CONC	RT	AREA	KF	RRT		
O2AZOTE	5.204	147	291059	.859	.936		
O1METHANE	86.97	157	4177158	1	1		
O3CO2	4.013	183	211109	.913	1.166		
O4ETHANE	2.981	208	186154	.769	1.325		
O5PROPANE	.555	287	42529	.627	1.828		
O6IBUTANE	.087	383	7445	.562	2.439		
O7NBUTANE	.109	453	10121	.516	2.885		
O8NEOC5	.001	489	116	.57	3.115		
O9IC5	.03	676	2931	.498	4.306		
IONC5	.029	773	2966	.478	4.923		
12C6+...1	.022	1409	2692	.4	8.374		
13C6+...1	.03	1511	3590	.4	9.624		
TOTALS	99.98		4937870				
	100.031						
ANALYSE.G.N.		1979 JUN 29 11:01:03					
INDEX	12	SAMPLE BEYNES.17(31.05.79)					
CONSTITUANTS	CONC	PCS(MJ)	PCS(WH)				
O2AZOTE	5.204						
O1METHANE	86.97	34.7	9635				
O3CO2	4.013						
O4ETHANE	2.981	2.104	584.1				
O5PROPANE	.555	.565	157.1				
O6IBUTANE	.087	.115	31.95				
O7NBUTANE	.109	.146	40.51				
O8NEOC5	.001	.002	.65				
O9IC5	.03	.052	14.34				
IONC5	.029	.05	13.93				
11C6+...1	.052	.096	27.36				
TOTALS	99.99	37.81	10500				

Figure 1.

calculateur à celui d'un périphérique spécialisé, parmi d'autres périphériques (calorimètres, densimètres, débitmètres...). Le logiciel adapté à chaque problème permet, outre la sortie des variables gazeuses :

- l'édition des résultats, suivant des formats,
- la prise en compte d'informations prioritaires (par exemple, présence d'un méthanier en cours de déchargement dans un terminal),
- l'établissement de bilans,
- le redémarrage automatique de l'ensemble de l'installation,
- la transmission à distance des résultats.

Une illustration des performances de ces systèmes peut être faite à l'aide du pouvoir calorifique. En kilowatts-heures, le pouvoir calorifique par mètre cube normal est pour le gaz naturel de l'ordre de 11 800. La répétabilité de la détermination de ce paramètre par l'analyse et le calcul est meilleure que $\pm 5 \text{ kWh/m}^3 (n)$. La justesse, qui fait intervenir la justesse du mélange pour étalonnage et la qualité de l'approximation, est inférieure à $\pm 15 \text{ kWh/m}^3 (n)$. Une comparaison systématique faite avec la mesure directe dont la justesse donnée par le constructeur est de $\pm 20 \text{ Wh/m}^3 (n)$ montre que l'écart entre les deux méthodes est inférieur à $10\text{-}15 \text{ Wh/m}^3 (n)$ lorsque les appareils sont en bon état de marche. Un écart supérieur est l'indice d'un mauvais fonctionnement le plus souvent imputable au calorimètre automatique.

Dans le tableau II sont donnés quelques exemples de réalisation.

L'expérience acquise lors de la mise en route de tels ensembles nous fait dire, qu'après une période d'adaptation au site qui n'a jamais

Tableau II.

	Stockage souterrain de Tersanne	Terminal méthanier du Havre	Stockage souterrain de Chemery	Station de compression de Roussines
Date de mise en service	Avril 1977	Nov. 1977	Fév. 1978	Fév. 1979
Échantillonneur	16 voies	5 voies	1 voie	3 voies
Nombre d'analyseurs chromatographiques	1	1	5	2
Système d'acquisition de données chromatographiques	HP 3385	SP 4000	SP 4000	SP 4000
Autres capteurs	non	oui	non	oui
Calculateur	HP 9825	HP 9825	—	HP 9825
Télétransmission ou liaison calculateur	oui	non	non	oui
Personnel sur place	oui	oui	oui	non
Coût du système analytique (matériel)	140 000 F	165 500 F	240 000 F	200 000 F

excédé quelques mois, le système devient opérationnel et on peut noter que cette adaptation est d'autant plus rapide que le personnel chargé de la maintenance et de l'exploitation aura été mieux formé. Cette formation, dont la durée sera variable en fonction de qualification des agents, est une étape essentielle qu'il convient de ne pas sous-estimer si l'on veut pouvoir tirer de tels systèmes les satisfactions qu'on est en droit d'en attendre. Un point important est également le contact étroit entre les concepteurs et exploitants du système.

Il est assez difficile de définir une installation COCAGNE type ainsi que le montre le tableau II ; c'est pourquoi il est malaisé de parler prix. Cependant, si on se limite au calcul des caractéristiques des gaz, il faut opposer au système « Tersanne » le coût d'un calorimètre automatique et d'un densimètre. Sur ce plan, aucune des deux solutions n'a d'avantage, les coûts étant identiques. L'installation COCAGNE est par contre très avantageuse :

- sur le plan des frais d'installation,
 - sur le plan des frais de maintenance,
- et, ce qui est encore plus difficilement chiffrable, sur le plan de la richesse de l'information fournie.

En conclusion, nous espérons avoir montré que, grâce à l'informatique, d'un capteur à vocation universelle, nous avons fait un capteur parlant le langage de l'industrie gazière pour un coût équivalent à celui des appareils traditionnels et avec une qualité de service bien supérieure. Cependant, nous insistons sur le fait qu'il est nécessaire d'ouvrir la voie à de tels systèmes par un réel effort de formation du personnel concerné. Ce n'est qu'à ce prix qu'on pourra en tirer les satisfactions qu'on est en droit d'attendre.