

CARACTERISATION DE LA NATURE CHIMIQUE D'EFFLUENTS GAZEUX PAR THERMOGRAPHIE DIFFERENTIELLE SIMULTANEE

P. HERVE¹, D. RAMEL¹, I. AL SHUNAIFI¹
H. BEJI² A. MOREL³

¹ Laboratoire d'Energétique et d'Economie d'Energie
Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 50 Rue de Sèvres, 92410 Ville d'Avray France
pherve@u-paris10.fr

²Laboratoire des Technologies Innovantes.
Université de Picardie Jules Verne, Amiens

³ S.a.r.l. LASUR, 119 bis rue de Colombes, 92600 ASNIERES France.
Hassen.beji@u-picardie.fr

RESUME

Nous comparons ici différentes méthodes permettant de caractériser des effluents gazeux. La caractérisation chimique est faite en filtrant l'image reçue par la caméra à une longueur d'onde caractéristique de l'émission ou de l'absorption du corps recherché : CH₄, CO, HCL, organophosphoré... A partir d'une caméra soit monochromatique, soit bi-chromatique, on pourra utiliser une détection passive à partir de l'émission du gaz conjuguée à l'absorption d'un fond, ou une détection active en éclairant le nuage suspect. Nous avons appliqué cette méthode à une étude faite pour Gaz de France pour d'une part détecter des fuites domestiques, et d'autre part déceler, et si possible quantifier une fuite de méthane dans un terminal méthanier.

NOMENCLATURE

C	Concentration	(kg/m ³)
L	Luminance	(W.m ⁻² .sr ⁻¹ .μm ⁻¹) pour λ en μm
L ^o	Luminance du corps noir	
T	Température	(K)
ε _λ	Emissivité	(sans dimension)
λ	Longueur d'onde	(μm)

1. INTRODUCTION

Les caméras thermiques ont d'abord été utilisées pour détecter des objets chauds à distance : chars, soldats, ... et la première application à des fuites a été la détection des gaz d'échappement puis celle des gaz de combat [1]. La contre-mesure a lors consisté à diluer ces gaz pour abaisser leur température. Les performances des caméras s'étant améliorées (résolution thermique actuelle de 0,02°C) et leur coût ayant fortement diminué, les applications industrielles à l'étude des fuites d'effluents sont devenues possibles. Le premier secteur concerné a été celui de la sécurité dans le domaine de l'énergie. On peut se rappeler les premiers détecteurs de grisou, les canaris, qui étaient emmenés dans les galeries de mine pour prévenir des accumulations de gaz et de particules. Ce problème est toujours d'actualité et plus particulièrement dans les mines chinoises. Le cas d'école actuellement est la détection et la quantification des fuites de méthane appelé plus communément gaz naturel. Deux cas sont étudiés depuis plus d'une dizaine d'années. Le premier concerne la détection de fuites « domestiques » c'est-à-dire en milieu urbain, une solution utilisée par les distributeurs étant de faire circuler des véhicules « renifleurs » munis d'un spectromètre de masse. La difficulté consiste à mesurer au sol un gaz plus léger que l'air. Une mesure thermographique permet donc une détection à distance et, éventuellement, à l'intérieur des habitations. L'autre cas, à une échelle supérieure, concerne le déchargement des méthaniers dans les terminaux. Le tuyau permettant de décharger le méthane liquide (-168°C) peut présenter des fuites et, dans le cas où le

mélange méthane-air est dans la bonne fourchette de concentrations, une étincelle peut entraîner l'explosion du mélange. Les méthaniers actuels, ou ceux de la prochaine génération, ont des capacités de l'ordre de 200.000 m³ et le risque est tel qu'ils demeurent amarrés à quelques centaines de mètres du terminal proprement dit. Il y aura donc un tuyau de transfert plus ou moins immergé dans l'eau de mer sur quelques centaines de mètres. Dans le même secteur de l'énergie la détection de vapeurs d'hydrocarbures est aussi un facteur de sécurité dans tous les lieux de stockage.

D'autres pollutions accidentelles intéressent les industriels. Les rejets d'acide chlorhydrique ne sont souvent détectés que lorsque les réactions chimiques de ce gaz avec l'environnement se sont effectuées. Enfin, dans un monde toujours agité, n'oublions pas la détection de produits dangereux volontairement répandus. En 1990, à la suite de l'attentat dans le métro japonais, la RATP avait envisagé d'installer des détecteurs de neurotoxiques dans les stations de métro. En revenant à des émissions moins dangereuses, l'analyse par thermographie des véhicules en circulation permettrait de contrôler, plus efficacement que les contrôles techniques des véhicules anciens, la production de CO, de résidus imbrûlés de combustion et même de CO₂.

C'est l'ensemble de ces problèmes que la thermographie peut résoudre avec des avantages par rapport à d'autres méthodes dus à l'observation globale d'une scène à distance avec des possibilités d'embarquer le système sur avions, hélicoptères et, maintenant, drones de surveillance.

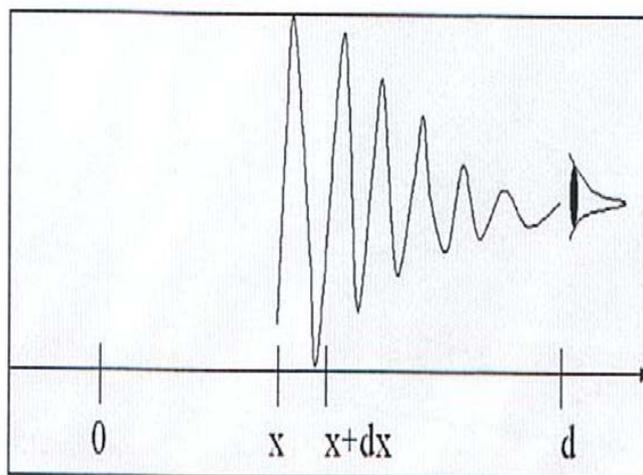
2.PRINCIPE DES MESURES

La thermographie d'un nuage de gaz conjugue l'émission de rayonnement par le gaz et la transmission d'un fond ou la réflexion d'une source par le nuage de gaz.

Les gaz ont un spectre d'émission ou d'absorption caractérisé par des raies très fines, à température ambiante et les molécules constituées d'atomes différents (CO₂, CO, HCl, etc...) ont un spectre de rotation-vibration dans l'infrarouge qui est une véritable signature.

Le signal sur chaque pixel de la caméra sera proportionnel à la luminance observée.

$$L_{\lambda} = L^{\circ}(\lambda) e^{-\int_0^d C(x) \varepsilon_{\lambda}(x) dx} + \int_0^d C(x) \varepsilon_{\lambda}(x) e^{-\int_0^x C(x) \varepsilon_{\lambda}(x) dx} dx \quad (1)$$



$$K = C \varepsilon$$

C : Concentration du gaz

ε : Emissivité du gaz

3.METHODES DE MESURE

Deux types de méthodes ont été développées: l'une passive utilisant directement une caméra thermographique, comportant un système optique sélectionnant des longueurs d'onde, l'autre active où une source extérieure « éclaire » un fond afin de mesurer une absorption caractéristique du gaz.

Les spectres de transmission de différents gaz industriels et de l'atmosphère sont représentés sur les figures 1 et 2.

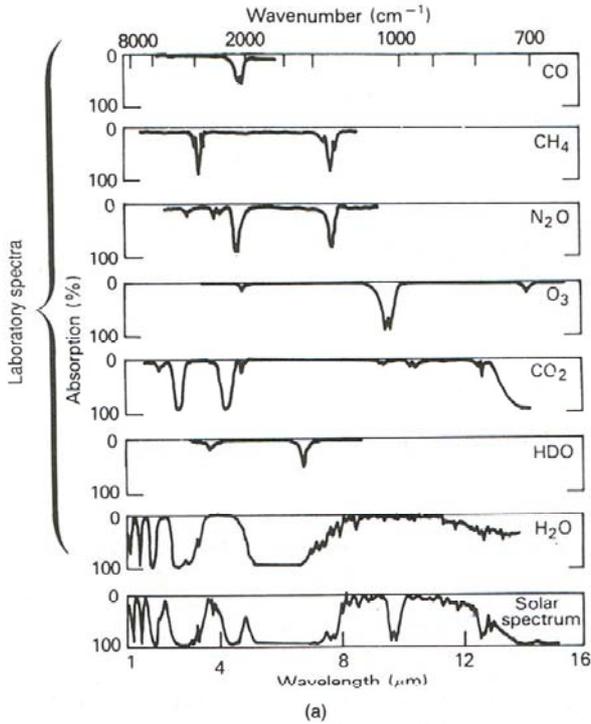


Figure 1 : Spectres de gaz.

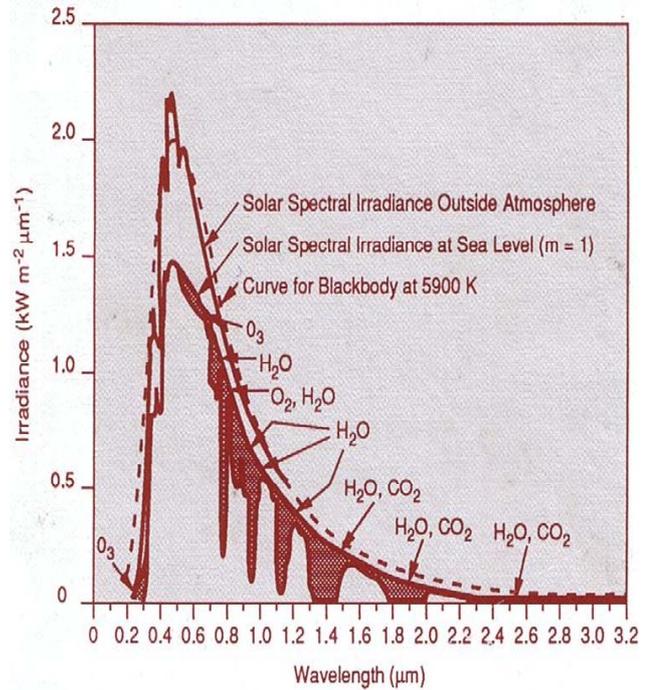


Figure 2 : Transmission de l'atmosphère.

En comparant les spectres des gaz avec le spectre de transmission de l'atmosphère, nous trouvons comme choix de bandes :

$\text{CO}_2 \Leftrightarrow \lambda = 4,2 \mu\text{m}$.

$\text{CH}_4 \Leftrightarrow \lambda = 3,3 \mu\text{m}$. Groupement C-H présent dans tous les Hydrocarbures.

$\lambda = 7,7 \mu\text{m}$. Bande un peu absorbée par la vapeur d'eau atmosphérique.

$\text{CO} \Leftrightarrow \lambda = 4,6 \mu\text{m}$

$\text{NO} \Leftrightarrow \lambda = 5,2 \mu\text{m}$. Raie étroite partiellement masquée par des raies de la vapeur d'eau.

La bande $3,8 \mu\text{m} < \lambda < 4,10 \mu\text{m}$ est transparente et pourra servir de référence dans un imageur.

3.1. Méthodes actives

Dans ces méthodes, on éclaire le fond avec une source lumineuse centrée sur une bande d'absorption du gaz. Pour CH_4 , nous avons utilisé un laser modulé He-Ne émettant à $3,39 \mu\text{m}$ et dont la référence de modulation est reliée à la caméra munie d'une carte de détection synchrone.

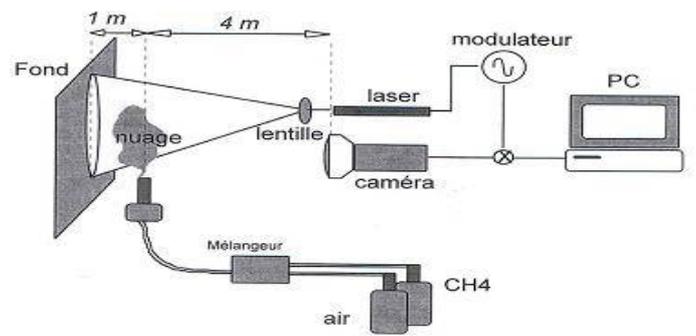


Figure. 3 : Banc pour tester une détection active de CH_4 .

3.2. Méthodes passives.

3.2.1 Monochromatique et polychromatique avec images séquentielles

La méthode la plus simple consiste à utiliser un filtre passe bande fixe. Si on maîtrise le fond, on obtient des résultats quantitatifs intéressants. La figure 4 montre le souffle d'une personne avec une Caméra CEDIP Orion bande $2\ \mu\text{m} - 4,9\ \mu\text{m}$ filtrée autour de $4,26\ \mu\text{m}$.

Plusieurs gaz peuvent être analysés en utilisant des batteries de filtres interchangeables. Un logiciel de tracking permet de recadrer l'image pour compenser les mouvements de translation et de rotation du sujet (individu, véhicule, etc...)

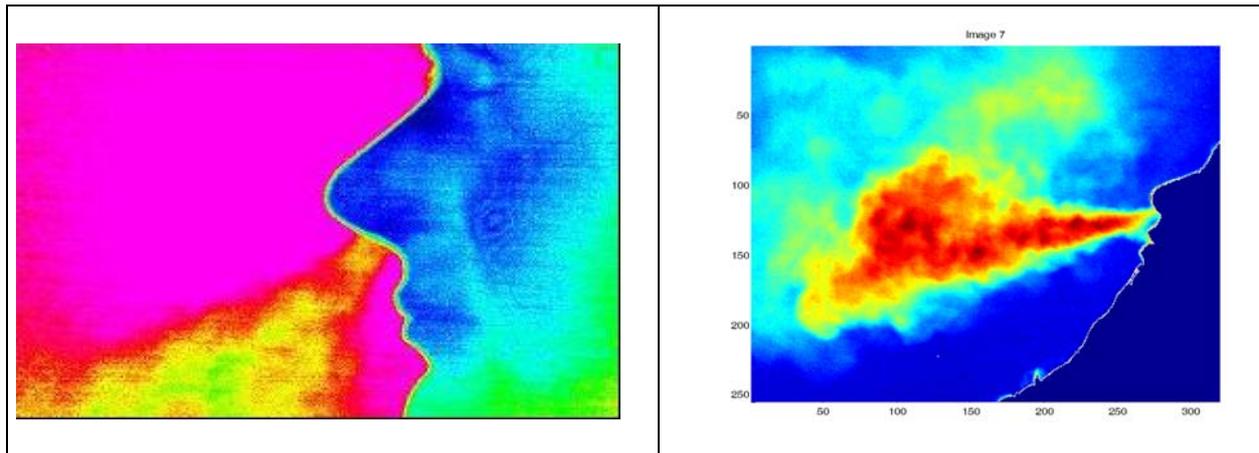


Figure 4 : souffle (CO_2) observé à $\lambda = 4,26\ \mu\text{m}$, puis en différentiel à $4,0\ \mu\text{m}$ et $4,26\ \mu\text{m}$

La méthode différentielle permet ainsi de détecter de très faibles fuites de gaz dans un environnement complexe. En réglant parfaitement le montage, on ne voit plus que le gaz. Il peut d'ailleurs être plus judicieux de laisser un fond très léger afin de se repérer sur la scène observée cf .fig 4 (droite).

3.2.2. Polychromatique simultanée

Pour ces systèmes polychromatiques séquentiels, l'inconvénient majeur est l'évolution de la scène entre les deux images qui seront combinées. Nous avons réalisé pour le cas de nuages évoluant rapidement, un système dans lequel deux images monochromatiques sont acquises simultanément .

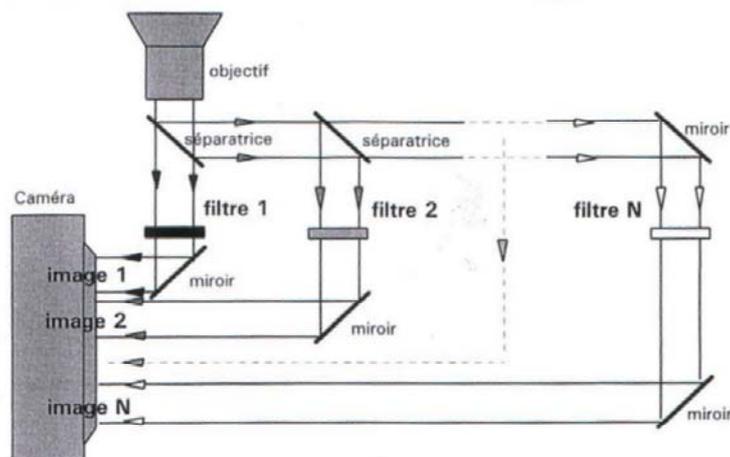


Figure 5 : schéma d'une mesure polychromatique simultanée

Nous avons réalisé différents montages optique dont le principe de base représenté sur la figure 5 a été breveté [2].

Nous avons essayé plusieurs systèmes optiques pour séparer l'image de la scène observée en deux sous images. Nous avons d'abord réalisé un montage simple avec une bi-lentille de BILLET. Les distances focales étant légèrement différentes aux deux longueurs d'onde, les deux sous images ont des tailles légèrement différentes ce qui complique le traitement mais permet d'avoir un grand champ d'observation. Nous avons finalement opté pour l'utilisation de deux miroirs paraboliques qui nous donnent, au prix de réglages précis et d'un champ étroit, deux sous images identiques.

La figure 6 montre l'intérêt de la méthode.

Les premiers essais ont été faits avec une caméra CEDIP 128 x 128 pixels. L'image de gauche montre un bec BUNSEN dégageant du CH₄ en prenant toute la bande spectrale de la caméra l'image ne montre pas de dégagement gazeux. L'image de droite provient de la conjugaison de deux images monochromatiques. Le fond disparaît et seul le méthane apparaît comme absorbant le fond.

La figure 7 montre une image obtenue avec une caméra CEDIP de type ORION sur la respiration qui est un jet gazeux instable.



Figure 6 : Visualisation du méthane sans et avec méthode différentielle.

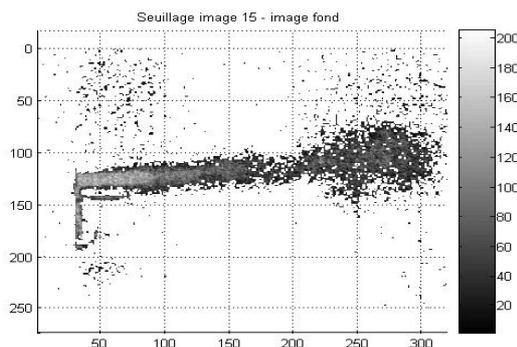


Figure 7 : Visualisation de la respiration après traitement différentielle des images.

Si on désire avoir des mesures quantitatives des volumes de gaz observés, il faut examiner l'erreur due à l'inhomogénéité de la température du gaz dans chaque « cylindre de gaz » observé par un pixel.

Par exemple, si on compare l'émission de deux colonnes de même concentration constituées de deux éléments identiques à $T_1 = 243$ K et $T_2 = 313$ K à l'émission de rayonnement de la colonne à la température $(T_1+T_2)/2$, on ne fait qu'une erreur de 2 % sur le produit (concentration × épaisseur). Ceci correspond à la précision de notre méthode sur un jet de gaz.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La détection est beaucoup plus efficace avec un système différentiel qui élimine le fond et en acquérant les images monochromatiques simultanément. Enfin l'utilisation d'un imageur spectroscopique associant une caméra et un spectromètre à transformée de Fourier [3] permet de déterminer pixel par pixel par inversion [4] les profils en température et en concentration de l'image pour chaque espèce (CO₂, CO, CH₄...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. BEDNARCZYK ; P. HERVE(1992) ; P. ADAM : Analysis of atmospheric pollution by quantitative infrared thermography. Quantitative infrared thermography.QIRT. pp. 319-325.
- [2] P. HERVE ; E. KATCHAROV (Juillet 1998) : Dispositif d'imagerie infrarouge pour la mesure de température de gaz ou de son profil de température. Brevet déposé par Gaz de France. n° 98-09859.
- [3] D. RAMEL ; P. HERVE ; M. BRUN. S. CARLIER (Juin 2003): Modeling and visualisation of a combustion gases jet. The fourth pacific symposium on flow visualisation and image processing. Chamonix, France.
- [4] P. ALKHOURY ; G. CHAVENT ; F. CLEMENT ; P. HERVE (Juin 2005) : Inversion of spectroscopic data of CO₂ radiation. Inverse problems in engineering. .