

# CARACTERISATION QUANTITATIVE PAR THERMOGRAPHIE BISPECTRALE DES EFFLUENTS GAZEUX (Application à la sécurité et à la respiration)

Philippe HERVE      David RAMEL  
Laboratoire d'Energétique et d'Economie d'Energie (EA 387)  
(Université Paris X. NANTERRE)  
1, Chemin Desvallières  
92 410 Ville d'Avray

## RESUME :

La détection qualitative de fuites gazeuses est une application déjà ancienne de la thermographie. Dans cet article, nous considérerons différentes méthodes permettant de caractériser quantitativement des effluents gazeux. La caractérisation chimique est faite en filtrant l'image à une longueur d'onde caractéristique du groupement fonctionnel recherché : -CH, C=O, organophosphoré, etc... A partir d'images soit monochromatiques soit bichromatiques, on fera une analyse quantitative soit passive résultant de l'émission du gaz conjuguée à celle de l'absorption du fond, soit active en éclairant le nuage suspect avec une source telle qu'un laser.

## INTRODUCTION

Historiquement, les caméras thermiques ont 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]. Les performances des caméras s'étant améliorées (résolution thermique actuelle de 0,02°C), 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. Avec GDF, nous avons étudié la détection et la quantification de fuites de méthane appelé plus communément gaz naturel. Un premier cas concerne la détection de fuites « domestiques » c'est-à-dire en milieu urbain. 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) présente toujours des fuites et une étincelle peut entraîner l'explosion du mélange et du méthanier qui contient 200.000m<sup>3</sup> de gaz! 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 comme les rejets d'acide chlorhydrique intéressent les industriels.

Enfin, n'oublions pas la détection de produits dangereux volontairement répandus tels les neurotoxiques[1]. En revenant à des émissions moins dangereuses, l'analyse par thermographie des véhicules en circulation permettrait de quantifier, au vol, la production de CO, des résidus imbrûlés de combustion et du CO<sub>2</sub>. C'est l'ensemble de ces problèmes qui peuvent être résolus à distance par thermographie avec des possibilités d'embarquer le système de mesure sur avions, hélicoptères et, maintenant, drones de surveillance.

## 1 PRINCIPE DES MESURES

Les gaz ont un spectre d'émission ou d'absorption caractérisé par des raies très fines, du moins à température ambiante [2]. Chaque raie correspond à des transitions entre des niveaux d'énergie définis par les modes de vibration des molécules ou des atomes. Les molécules constituées d'atomes différents (CO<sub>2</sub>, CO, HCl, etc...) ont un spectre de rotation-vibration dans l'infrarouge [2] qui est une véritable signature pour chacune de ces molécules (figure 1). Pour pouvoir détecter, il faut également que l'atmosphère soit transparente (figure 2).

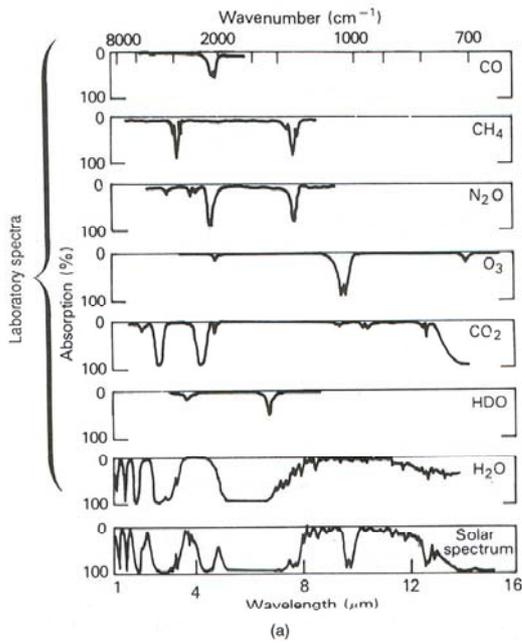


figure 1 : Spectres de gaz

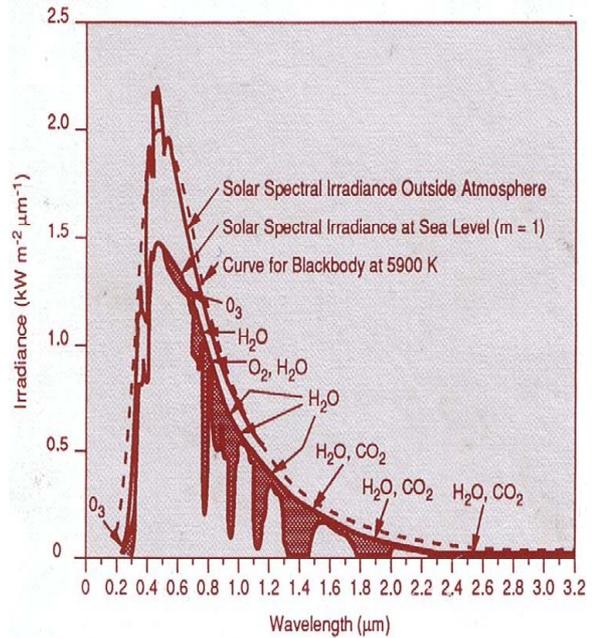


figure 2 : Transmission de l'atmosphère

En comparant ces deux figures, nous trouvons comme choix de bandes :

CO<sub>2</sub> ⇔ λ = 4,2 μm.

CH<sub>4</sub> ⇔ λ = 3,3 μm. Groupement C-H présent dans tous les Hydrocarbures.

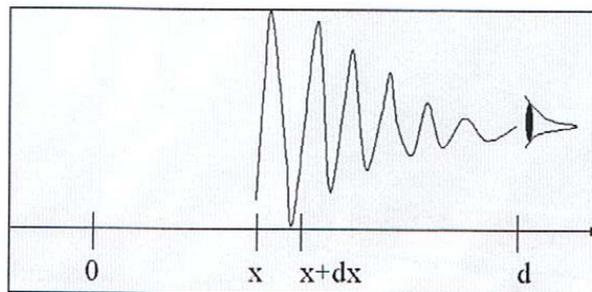
λ = 7,7 μm. Bande un peu absorbée par la vapeur d'eau atmosphérique.

CO ⇔ λ = 4,6 μm

NO ⇔ λ = 5,2 μm. Raie étroite partiellement masquée par des raies de la vapeur d'eau.

La bande 3,8 μm < λ < 4,10 μm est transparente pour tous les gaz usuels et cette bande pourra servir de référence dans un imageur. Les molécules telles que H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ou O<sub>2</sub> n'ont pas de moment dipolaire, donc pas de spectre de rotation-vibration, mais un spectre électronique situé essentiellement dans l'ultraviolet. L'émission, l'auto-absorption et la transmission d'un nuage de gaz représenté sur la figure 2 peut être décrite par la formule générale (Eq. 1) donnant la luminance L observée .

$$L_{\sigma}(x) = L_0 \cdot e^{-\int_0^x K_{\sigma}(v) \cdot dv} + \int_0^x K_{\sigma}(u) \cdot L_{\sigma}^0(u) \cdot e^{-\int_u^x K_{\sigma}(v) \cdot dv} \cdot du \quad \text{Eq. 1}$$



$$K = C\varepsilon$$

C : Concentration du gaz

ε : Emissivité du gaz

figure 3 : Emission et transmission dans un volume de gaz.

Dans le cas général d'un nuage inhomogène en température et en concentration, il faut trouver sur un pixel assez d'informations pour obtenir le profil de concentration C(x) et de température T(x). Ce problème ne peut être résolu qu'en faisant une analyse multispectrale sur chaque pixel en utilisant par exemple un spectromètre à transformée de FOURIER [3][4][5]. Dans le cas d'un jet de gaz, le problème peut être simplifié en supposant qu'un pixel ij donné voit une colonne de gaz à la température T<sub>ij</sub> constante. L'inconnue est alors :

$$X_{ij} = \int_0^{L_{ij}} C_{ij}(x) \cdot dx \quad \text{Eq. 2}$$

Cette grandeur  $X$  nous donnera la quantité de gaz présente dans le cylindre  $ij$ . Eventuellement l'intégrale  $\sum_{i,j} X_{ij}$  nous donnera la quantité de gaz présente dans le champ de la caméra.

L'équation (Eq. 1) se simplifie et devient :

$$L_{ij} = \varepsilon_{ij,f} \cdot e^{-\varepsilon_g \cdot X_{ij}} \cdot L_{\lambda}^0(T_{ij,fond}) + (1 - e^{-\varepsilon_g \cdot X_{ij}}) \cdot L_{\lambda}^0(T_{ij,gaz}) \quad \text{Eq. 3}$$

$L^0$  est la luminance du Corps noir qui est décrite par la loi de PLANCK.

avec :  $L^0 = (C_1 \cdot \lambda^{-5}) / (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)$ ,  $C_1 = 1,191.E8(W.m^{-2} \cdot \mu m^4 \cdot sr^{-1})$  et  $C_2 = 14388(\mu m.K)$ .  $\varepsilon_g$  est l'émissivité du gaz ( $m^{-1}$ ) et  $\varepsilon_{ij,f}$  l'émissivité du fond (sans unité).

A la longueur d'onde où le gaz est absorbant et dans le cas général où  $T_{gaz} \neq T_{fond}$  on a pour chaque pixel 3 inconnues :  $X_{ij}$ ,  $T_{ij,gaz}$ , et  $F_{ij} = \varepsilon_{ij,fond} \cdot L^0(T_{ij,fond})$ .

**1<sup>er</sup> cas :  $T_{fond} \gg T_{gaz}$  :** Dans ce cas l'émission propre du gaz n'intervient pas et la température du gaz n'a pas d'influence. C'est le cas où on a une source active, directe ou indirecte où le gaz (par exemple méthane vaporisé) est plus froid que l'environnement. Ce cas correspond aussi aux détections actives où la source d'éclairage est équivalente à un fond très chaud. Dans ce cas simple, une analyse à deux longueurs d'onde, l'une  $\lambda_0$ , où le gaz est transparent, l'autre  $\lambda_1$ , où le gaz est absorbant, permet d'obtenir pour chaque pixel  $ij$ , l'intégrale de la concentration sur le cylindre élémentaire observé.

**2<sup>ème</sup> cas :  $T_{fond} \ll T_{gaz}$  :** Dans ce cas, il reste dans l'équation deux inconnues liées  $X_{ij}$  et  $T_{ij,gaz}$ . On opérera à deux longueurs d'onde bien distinctes pour lesquelles le gaz est absorbant. Par exemple  $\lambda_{01} = 3,3\mu m$  et  $\lambda_{02} = 7,7\mu m$  pour le méthane.

**3<sup>ème</sup> cas :  $T_{fond} \approx T_{gaz}$  :** Il n'est pas possible d'obtenir directement  $\varepsilon_{ij}(\lambda_0)$  à la longueur d'onde où le gaz est semitransparent. On fera deux mesures l'une à  $\lambda_0$  et l'autre  $\lambda_1$  proches l'une de l'autre pour déterminer  $F_{ij}$ . On supposera alors en première approximation que  $F_{ij}(\lambda_0) \sim F_{ij}(\lambda_1)$ . Si on désire plus de précision il faudra comme en pyrométrie bichromatique faire une mesure à une troisième longueur d'onde  $\lambda_2$  pour déterminer simultanément  $T_{ij}$  et  $\varepsilon_{ij,fond}$  en supposant que  $\varepsilon_{ij}$  varie peu avec la longueur d'onde sur l'intervalle  $\lambda_1, \lambda_2$ .

## 2 METHODES DE MESURE POUR LES GAZ.

On peut distinguer deux types de méthodes, l'une passive utilisant directement une caméra thermographique, avec éventuellement un accessoire permettant une sélection des longueurs d'onde, l'autre active où une source lumineuse extérieure permet d'« éclairer » un fond afin de mesurer une absorption caractéristique du gaz. Nous allons analyser différentes méthodes de mesure en commençant par la plus simple : le filtrage à une longueur d'onde en mode passif.

### 2.1 Méthodes actives.

Dans ces méthodes, on éclaire le fond avec une source lumineuse centrée sur une bande d'absorption du gaz comme le montre la figure 4. Nous avons utilisé un laser He-Ne modulé émettant à  $3,39 \mu m$ , relié à une caméra munie d'une carte de détection synchrone. La détection synchrone appliquée à l'image permet d'extraire les signaux uniquement dus à l'absorption (parcours aller et parcours retour) du laser par le  $CH_4$ . des fuites très faibles sont détectées mais la précision sur la mesure est affectée par le facteur de réflexion variable du fond.

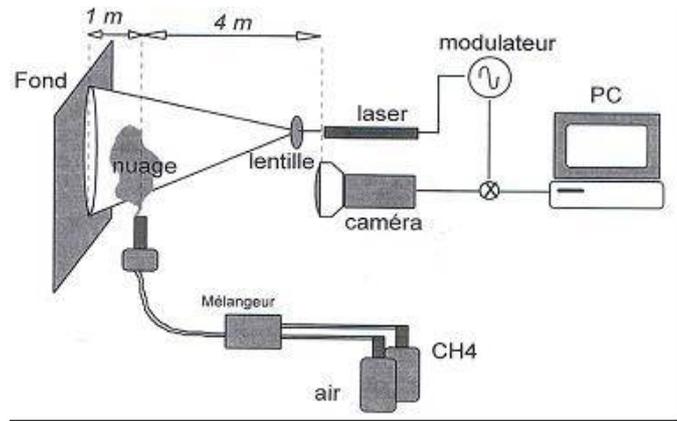


figure 4 : Banc pour tester une détection active de CH4.

## 2.2 Méthodes passives.

### 2.2.1 Monochromatique et polychromatique avec images séquentielles

La méthode la plus simple consiste à utiliser un filtre passe bande fixe, centré sur une raie d'absorption du gaz (publication d'une équipe japonaise d'Osaka, IGRC'95) la visibilité du nuage est améliorée en éliminant la plus grande partie des rayonnements ambiants transparents pour le gaz. Le principal inconvénient est dû à une forte dépendance par rapport aux conditions extérieures. Néanmoins, si on maîtrise le fond, on obtient en laboratoire des résultats quantitatifs intéressants La figure 5 montre le souffle d'une personne (filtre à  $\lambda = 4,26 \mu\text{m}$  et caméra CEDIP JADE MCT bande  $3,7 \mu\text{m} - 4,9 \mu\text{m}$ ).

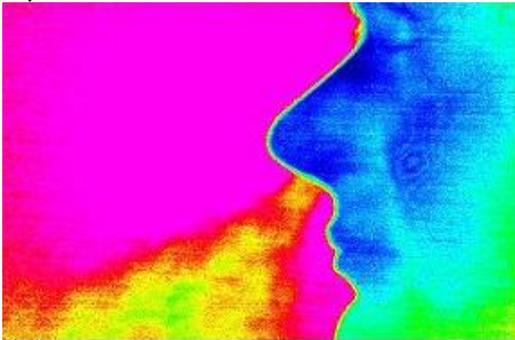


figure 5: Souffle (CO<sub>2</sub>) observé à  $\lambda = 4,26 \mu\text{m}$ .

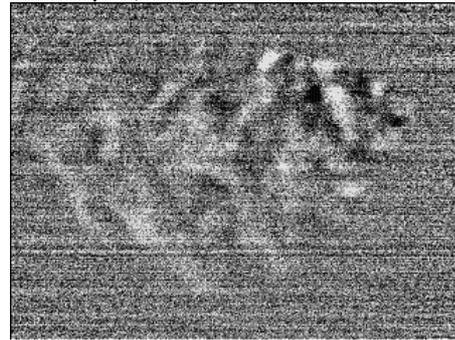


figure 6 : image différentielle ( $4,26\mu\text{m} - 4,00\mu\text{m}$ )

L'analyse par intégration dans l'image de la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée permet d'obtenir des critères quantitatifs (amplitude, période, etc.) figure 7, sur la respiration. Avec nos collègues de PARIS X, le Pr M. KREUTZER, éthologue et Pr T. MEYER, psychologue, nous avons étudié la « respiration reflet des émotions » en projetant devant des sujets des images plus ou moins stressantes [8] qui sont bien corrélées au débit respiratoire.

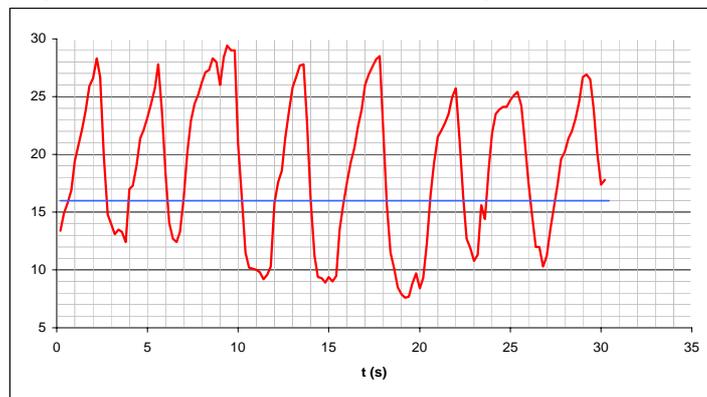


figure 7 : Débit de CO<sub>2</sub> (souffle) en fonction du temps (unité arbitraire).

Cette étude peut évidemment être directement appliquée en pneumologie, par exemple, à l'analyse des troubles du sommeil. Plusieurs gaz peuvent aussi être analysés avec la même caméra en utilisant des batteries de filtres spécifiques interchangeables. Des systèmes ont été commercialisés par CINCINNATI aux USA (4 filtres) et CEDIP en France (6 filtres). Un cas plus compliqué a été décrit dans un brevet de BERTIN. Deux filtres, l'un de mesure, l'autre de référence de type passe-haut sont changés séquentiellement avec soustraction des couples d'images ainsi obtenues. Cette méthode implique une hypothèse de base : l'homogénéité de tout le nuage, ce qui limite considérablement le champ d'application. Pour tous ces systèmes polychromatiques séquentiels, l'inconvénient majeur est l'évolution de la scène entre les deux images qui seront soustraites. **Pour cette raison, nous avons préféré réaliser un système dans lequel les images sont acquises simultanément.**

## 2.2.2 Polychromatique simultanée

Nous avons donc choisi de faire au moins deux images monochromatiques simultanément et de faire un traitement pixel par pixel de ces deux images. Pour le méthane, la raie d'absorption choisie est à  $3,3 \mu\text{m}$  et pour le  $\text{CO}_2$  elle est à  $4,26 \mu\text{m}$ . La longueur d'onde de référence  $\lambda_0$  a été choisie à  $4,0 \mu\text{m}$ . Le schéma ci-dessous présente le principe de la mesure qui a été breveté [7].

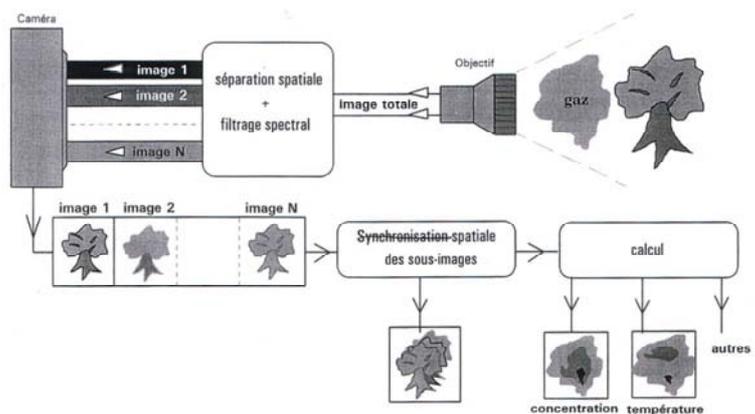


figure 8 : Schéma de principe d'une mesure polychromatique simultanée.

Nous avons réalisé plusieurs systèmes optiques pour séparer l'image de la scène observée en deux sous images. Un montage simple et robuste a été réalisé avec une billette de BILLET en germanium. La figure 9 montre l'intérêt de la méthode. Les essais ont été faits avec une caméra CEDIP  $128 \times 128$  pixels. L'image de gauche montre un bec BUNSEN dégageant du  $\text{CH}_4$  en utilisant toute la bande spectrale de la caméra. L'image de droite provient de la conjugaison de deux images monochromatiques. Le fond disparaît et seul le méthane apparaît comme absorbant le fond. Pour le  $\text{CO}_2$ , on peut comparer les images de la figure 5 et de la figure 6.

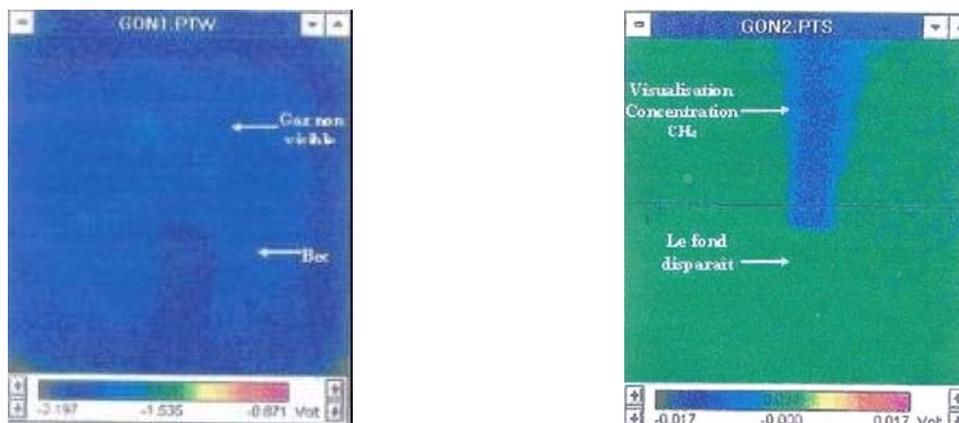


figure 9 : Visualisation du méthane sans et avec méthode différentielle.

La méthode différentielle permet de détecter de très faibles fuites de gaz. En effet, 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. 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  $T_1 = 243 \text{ K}$  et  $T_2 = 313 \text{ K}$  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 la concentration mesurée.

### 3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une méthode d'analyse de jets de gaz nous semble beaucoup plus efficace si elle utilise un système différentiel qui permet d'éliminer l'influence du fond. D'après les calculs d'erreur et les expériences effectuées, il paraît aussi essentiel, du moins si on veut obtenir des mesures quantitatives, de faire des images monochromatiques simultanément. Enfin, l'avenir est certainement à l'utilisation d'imageurs spectroscopiques [9] qui permettront de déterminer pixel par pixel le profil en température et en concentration de l'image pour chaque espèce ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ...). Il faut en effet une grande quantité d'informations [7] pour pouvoir, par des méthodes d'optimisation, inverser et obtenir ces profils. L'association d'une caméra matricielle à temps de réponse rapide et d'un spectromètre à transformée de Fourier ou d'un FABRY – PEROT accordable permet de faire ce type de mesures. Reste à traiter ces quantités d'information avec des temps de calcul raisonnables...

### REFERENCES

- [1].S. BEDNARCZYK ; P. HERVE ; P. ADAM : « Analysis of atmospheric pollution by quantitative infrared thermography ». Quantitative infrared thermography. QIRT 92. p. 319-325.
- [2]. A PETIT : « Théorie des spectres atomiques ». Techniques de l'ingénieur. p. 26-55.
- [3].K. SCHAFFER ; P. HERVE : « Non intrusive optical measurements of aircraft engine exhaust emissions and comparaison with conventional intrusive techniques ». Applied optics. 20 janvier 2000. Vol. 39. n° 3.
- [4].J.VALLY P.HERVE: « Système optique non intrusive et statique pour la mesure de température de gaz ou de son profil de température ». Brevet déposé en 1998.
- [5].P. ALKHOURY ; G. CHAVENT ; F. CLEMENT ; P. HERVE : « Inversion of spectroscopic data of  $\text{CO}_2$  radiation ». Inverse problems in engineering. Juin 2005.
- [6].P. HERVE ; A. RIGUET ; P. CARON ; O. JACQUOT : « Plumes passives télédétection and characterization. Application to  $\text{CO}_2$  ». European symposium on remote sensing. Barcelone. Espagne. 21-25 septembre 1998. Vol. 3493. n° ISBN 081942952.
- [7].P. HERVE ; E. KATCHAROV : « Brevet. Dispositif d'imagerie infrarouge pour la mesure de température de gaz ou de son profil de température. ». Brevet déposé par Gaz de France. Juillet 1998. n° 98-09859.
- [8].J. CHAPPE, T. MEYER, P.HERVE, M. KREUTZER, M. MURIAN, J.F. VERLHIAC: « Combiner des images et des textes : la respiration comme indice de ressources attentionnelles ». 6<sup>ème</sup> Congrès International de Psychologie Sociale. Grenoble 2006
- [9]. D. RAMEL ; P. HERVE ; M. BRUN. S. CARLIER : « Modeling and visualisation of a combustion gases jet ». The fourth pacific symposium on flow visualisation and image processing. Chamonix, France. 3-5 juin 2003.