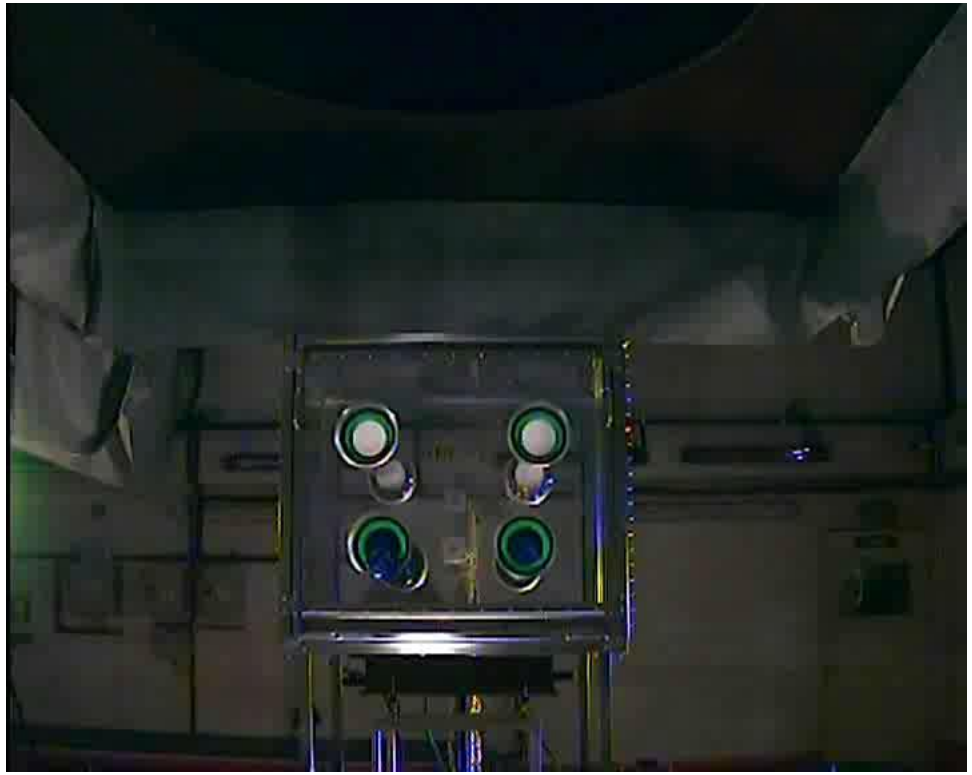
3eme Ecole des sciences des incendie et applications - ESIA 2022 - 30 Mai au 3 Juin 2022 – La Londe les Maures

Introduction aux techniques de mesure en science des incendies

Hugues Pretrel
Ingénieur d'essai
Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Boite à gants (Glove box)



Armoire électrique

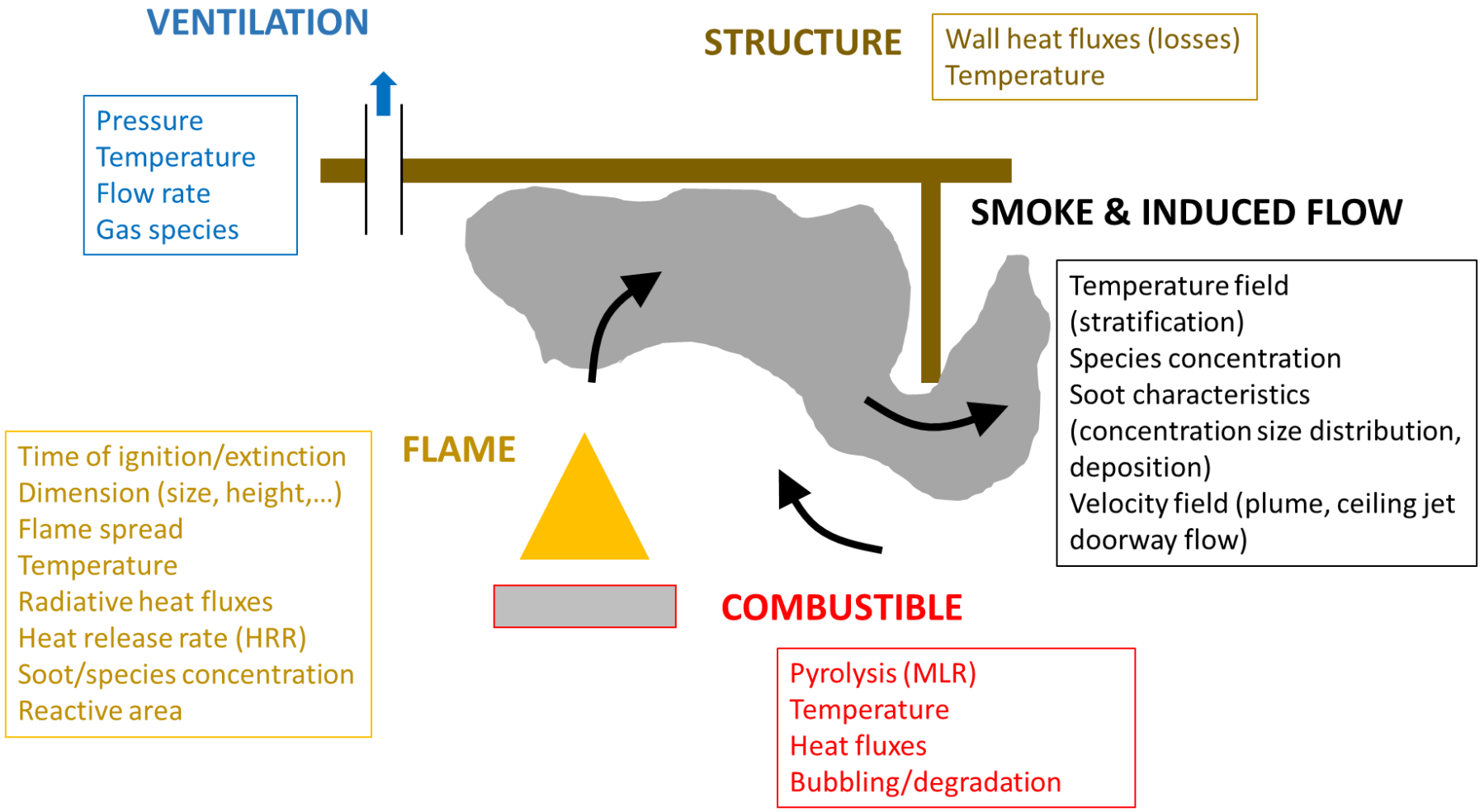
Sommaire

- Introduction
  - Phénomènes physiques mesurés en science de l'incendie
  - Les contraintes d'application
- Les techniques de mesures
  - Le foyer
  - Les transferts thermiques – La thermométrie
  - La composition des fumées – l'analyse chimique
  - Les écoulements
- Le traitement et l'analyse
  - Acquisition – Maintenance - Etalonnage
  - Traitement du signal, incertitudes, répétabilité
  - Analyse des données
- Conclusions et perspectives

Des éléments de contexte

- « Comprendre » le déroulement d'un incendie
- Phénomène complexe partiellement reproduit par des simulations numériques
- Evaluer des grandeurs physiques (données)
  - Recherche :
    - *Compréhension des phénomènes physiques*
    - *Elaboration de modèles physiques, corrélations*
    - *Validation des codes de calculs*
  - Etude : *Quantification, validation de configuration, tests normatifs*
  - Contrôle : *détection, alarme, activation de système d'extinction*
- Physiques pluridisciplinaires
  - *transferts thermiques, mécanique des fluides, chimie, milieux particulaires*

Quels phénomènes physiques mesurer?



Contraintes d'application : l'échelle

- Les échelles d'étude : réelle -> réduite
  - Echelle réelle : configuration réelle : essais démonstratif
  - Echelle intermédiaire : configuration et dimension représentative, mais simplifié
  - Echelle réduite : approche simplifiée, mais la présence des phénomènes est conservée
- Lois de similitude et rapport d'échelle
  - Nombres adimensionnels: Froude $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$, Reynolds $Re > Re_c$
  - Lois de similitude : lois de passage entre les échelles : $Fr_1 = Fr_2$
  - Les effets d'échelle : similitude restreinte, rayonnements,…

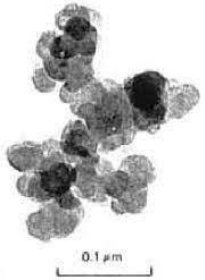
$$\frac{\dot{Q}}{\rho c_p T \sqrt{gD} D^2}$$

J. G. Quintiere, Scaling applications in fire research, Fire Safety Journal, 15, 1, (1989)

Autres contraintes d'application

- Le foyer
  - **Présence d'une zone de flamme : ambiance réactive**
    - Température/flux important 1300 K / Zone lumineuse : filtre pour les mesures optiques
  - **Milieu solide se dégradant au cours de l'expérience**
    - Pyrolyse des solides

- Les fumées
  - **Température élevée**
    - Décollement de fluxmètres / Système de protection, refroidissement: caméra, balance
  - **Présence de suie**
    - Obstruction colmatage / Dépôts : caméra, vitre
  - **Ecoulement multidirectionnel (3D)**

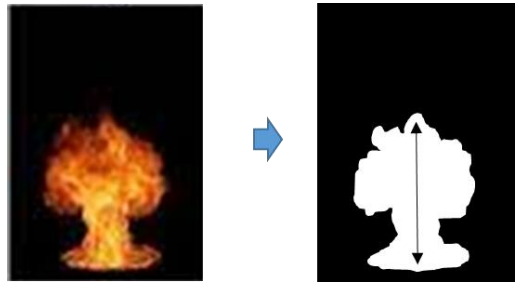


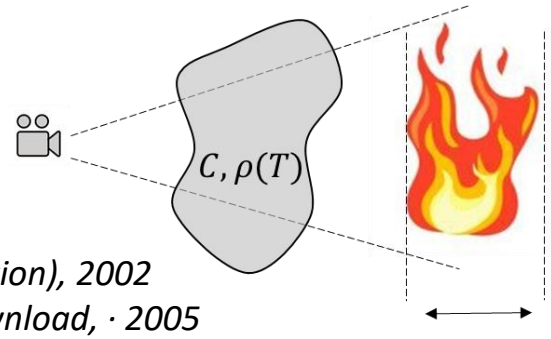
Les techniques de mesure

- Les caractéristiques du foyer
  - Dimensions: Camera vidéo
  - Perte de masse : balance
- Les transferts thermiques
  - Température : Thermocouple, Pyromètre, PLIF, thermographie IR
  - Flux de chaleur : Fluxmètres convectif et radiatif
- La composition (chimique) des écoulements
  - Concentration des espèces chimiques: analyseurs paramagnétique, FTIR
  - Caractéristiques des suies: filtres, TEOM
- La dynamique des écoulements
  - Pression des gaz : transmetteurs
  - Vitesse des gaz : sonde de Pitot, McCaffrey, LDV, PIV
  - Débits : massique, volumique

Caractéristiques géométriques de la flamme

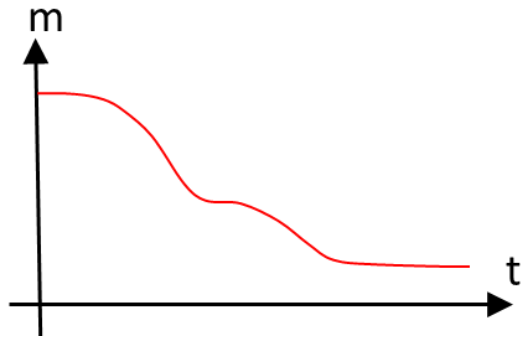
- Information recherchée
  - Image 2D (3D) de la zone de flamme
- Application
  - Géométrie de la flamme : hauteur, largeur, volume, …
  - Dynamique du phénomène de bouffées sur un feu de nappe
  - Vitesse de propagation de la flamme
- Appareil de mesure
  - Caméra standard, CCD
- Contraintes et remarques
  - Refroidissement dans un caisson
  - Protection contre le rayonnement thermique
  - Accès visuel disponible
  - Méthodes de traitement d'images



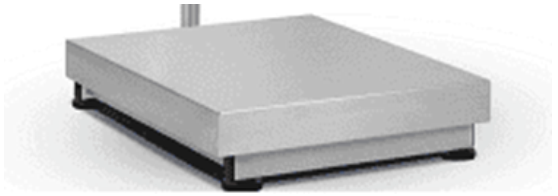


Heskestad, G., Fire Plumes, Flame Height and Air Entrainment, SFPE Handbook, of Fire Protection Engineering (3rd Edition), 2002
Stratton, B. J., Determining Flame Height And Flame Pulsation Frequency ...http://citeseerx.ist.psu.edu › viewdoc › download, · 2005

Perte de masse de combustible



- Information recherchée
  - La masse de combustible
- Application
  - la perte de masse (débit de perte de masse ou « mass loss rate » MLR)
  - Enthalpie de combustion (si HRR est mesurée par ailleurs)
  - Mesure globale
- Appareil de mesure
  - Balance, pesons,
  - ATG (Analyse thermogravimétrique)



- Contraintes et remarques
  - Mise en œuvre peut être complexe (mesure de la masse totale de la structu foyer) : chemin de câbles,… véhicule,…
  - Pesé parasite: aspersion, support, chute de matière au cours de l'expérience vibrations,…
  - Protection thermique

Température par thermocouple (1/3)

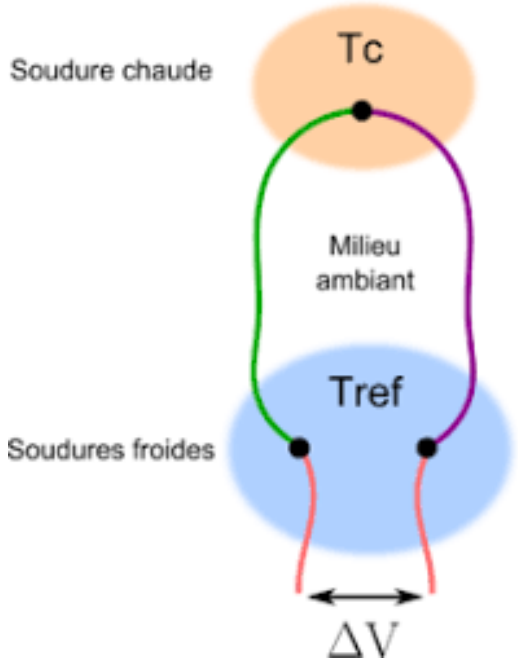
- Information recherchée

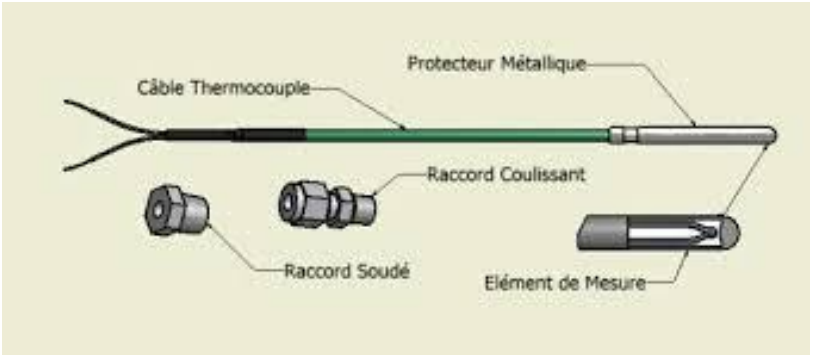
  Température de gaz, de surface, de paroi

- Principe

  FEM générée à la jonction de deux métaux de nature différente (ex Cuivre/Constantan) fonction de la température de la jonction

- Remarques et contraintes
  - Mise en œuvre très simple (montage et acquisition)
  - Faible coût
  - Intrusif
  - Prise en compte des transferts thermiques avec le milieu environnant

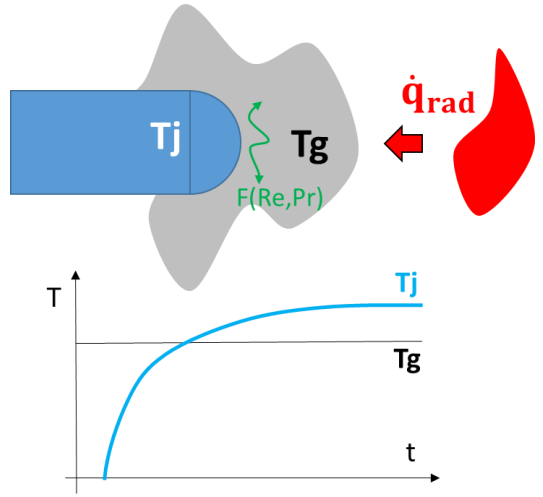




Température par thermocouple (2/3)

- *Effet du milieu environnant* : exemple pour la mesure de température de gaz
  - Ecart entre les températures de la jonction **Tj** et celle du gaz **Tg**

$$T_g = T_j + \frac{\rho c_p d^2}{6 k_g Nu}\left(\frac{dT_j}{dt}\right) + \frac{d}{k_g Nu}\epsilon\left(\sigma T_j^4 - \dot{q}_{rad}\right)$$



- Effet du temps de réponse : influence du diamètre (0,25-1,5mm)
- Effet du rayonnement thermique incident (flamme, feu,..)
- Effet du dépôt de suie
- Température « thermocouple » dans le code FDS

Xingyu Ren & al. ,Temperature measurement of a turbulent buoyant ethylene diffusion flame using a dual-thermocouple technique, Fire Safety Journal 120 (2021)

Température par thermocouple (3/3)

Le caractère intrusif => correction de la mesure

- Evaluation des transferts de chaleur parasites
  - Convection (vent)
  - Conduction (suie, dépôts)
  - Rayonnement (flamme,…) → thermocouples à aspiration
  - Résistance de contact: température de surface ou dans un solide
  - …

Brohez & al., two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires, Fire Safety Journal 39 (2004)
Kim & Hamins, On the Temperature Measurement Bias and Time Response of an Aspirated Thermocouple in Fire Environment, Fire technology, 26, 6, (2008)
Zhou & al. ,Validity evaluation on temperature correction methods by thermocouples with different bead …., Int. J. of Thermal Sciences 125 (2018)
Terrei & al., In-depth wood temperature measurement using embedded thin wire thermocouples in cone calorimeter tests, Int. J. of Thermal Sciences 162 (2021)

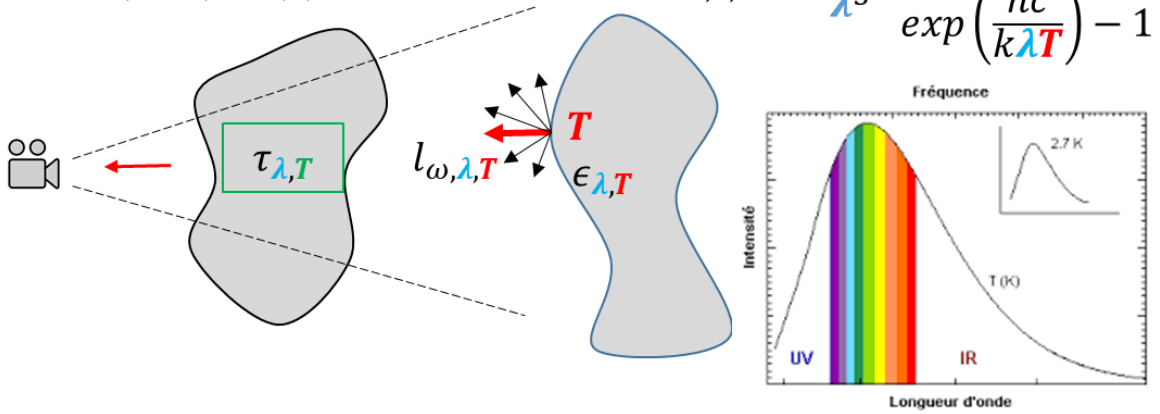
Thermographie infrarouge et pyrométrie (1/2)

- Principe

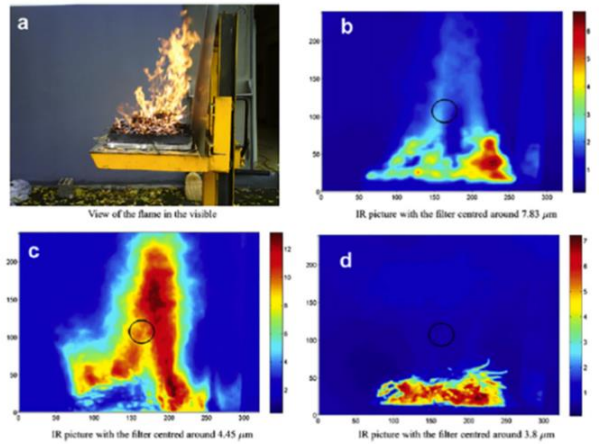
  Mesure l'émission Infrarouge émise par une surface

$$I = \tau_{\lambda,T} . \epsilon_{\lambda,T} . l_{\omega,\lambda,T}$$

$$l_{\omega,\lambda,T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}$$



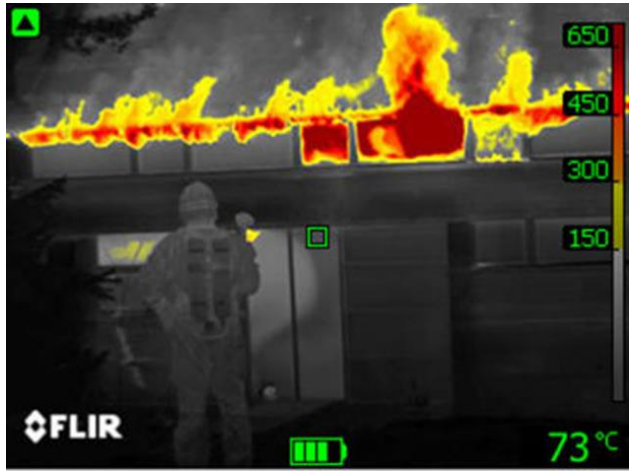
- Information recherchée
  - Température de surface
    - Local → Pyrométrie
    - Champs → Thermographie infrarouge
- Applications
  - Température de surface (structure)
  - Caractéristiques d'émission de la flamme



Planas-Cuchi & al., Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires …., Fire Technol. 39 (2003)
Parents & al., Spectral radiation emitted by kerosene pool fires, Fire safety Journal, 108, (2019)
Blunck, Review: Applications of infrared thermography for …., Experimental Thermal and Fluid Science 130 (2022)

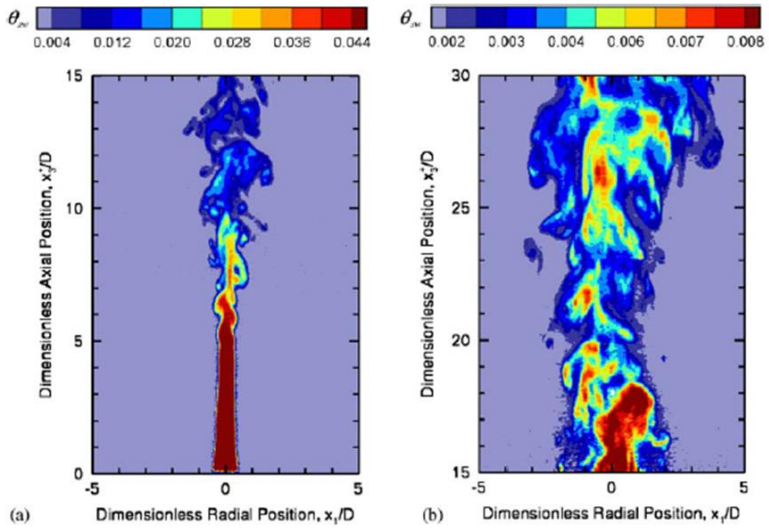
Thermographie infrarouge et pyrométrie (2/2)

- Remarques et contraintes
  - Emissivité du « média » observé (solide, liquide, gaz)
  - Caractéristiques et propriétés radiatives du milieu traversé (semi-transparent)
    - Composition chimique
    - Concentration de suie
    - Dépendance spectrale
- Exemples d'application « incendie »
  - Feu en milieu ouvert
  - « Face arrière » d'un combustible ou d'un objet soumis à une flamme
  - …



E. Planas-Cuchi & al., Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires …., Fire Technol. 39 (2003)
Parents & al.,Spectral radiation emitted by kerosene pool fires, Fire safety Journal, 108, (2019)
Blunck, Review: Applications of infrared thermography for …., Experimental Thermal and Fluid Science 130 (2022)

Autres techniques



- **Planar laser-induced Fluorescence (PLIF)**
  - Fluorescence d'un gaz traceurs induite par un plan laser
  - Température / concentration des gaz

Yao & al., Quantitative salt-water modeling of fire-induced flow, Fire Safety Journal 41 (2006)

- **Thermographie de fluorescence**
  - Fluorescence du Phospore
  - Température de surface

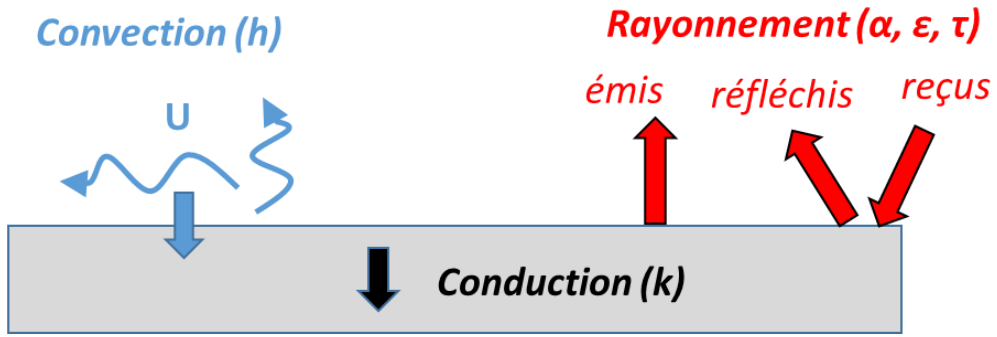
Degenève, & al., Optimisation de la mesure de température de paroi par thermographie de luminophore appliquée à la combustion, CFTL (2014)
Omrane & al., Surface temperature measurement of flame spread using thermographic phosphors, IAFSS conference, Lund, 2003

- **Fibre optique**
  - Dépendance d'un signal optique avec la température
  - Détection

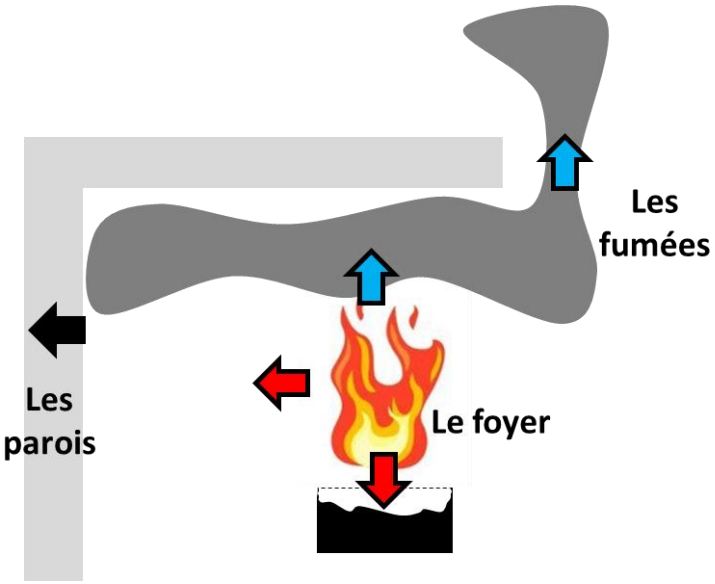
Ukil,& al., Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications, IEEE Sensors journal (2012)
Zhu, & al., Distributed fiber optic measurements of strain and temperature in long-span composite floor beams with simple shear connections subject to compartment fires, Fire Safety Journal 121 (2021)

La fluxmètrie (radiomètre)

- Information recherchée
  - Flux de chaleur : convectif (interaction surface/fluide), conduction (à travers un matériau), radiatif (reçu, émis)

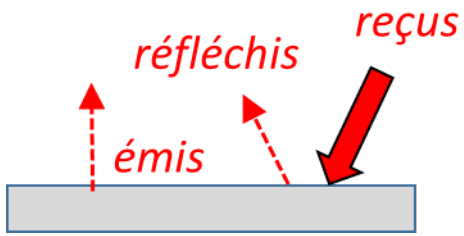


- Principe
  - Mesure d'une différence de température fonction du flux reçu
  - Plusieurs technologie : Schmidt-Boelter /Gardon/
- Application
  - La flamme:
    - Energie rayonné par la flamme et les fumées
    - Transferts thermiques au niveau du combustible (pyrolyse)
  - Les parois : chaleur absorbée par les structures
  - Les fumées : chaleur transportée par les fumées

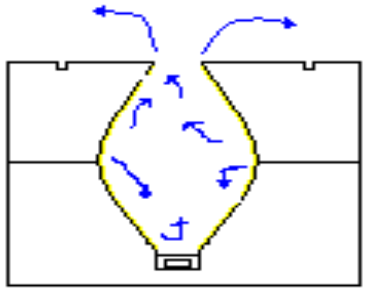


Description of Heat Flux Measurement Methods Used in Hydrocarbon and Propellant Fuel Fires at Sandia, James T. Nako, AND2010-7062, (2010)

Fluxmètre radiatif

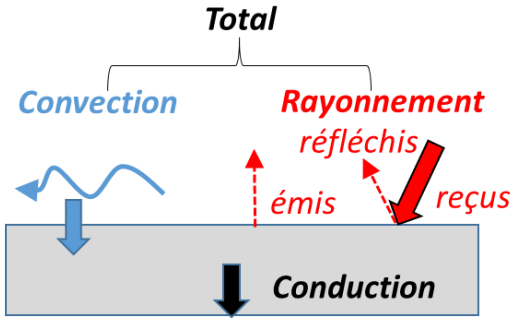


- Information recherchée
  - Flux de chaleur radiatif incident
- Principe
  - Mesure d'une différence de température : Schmidt-Boelter

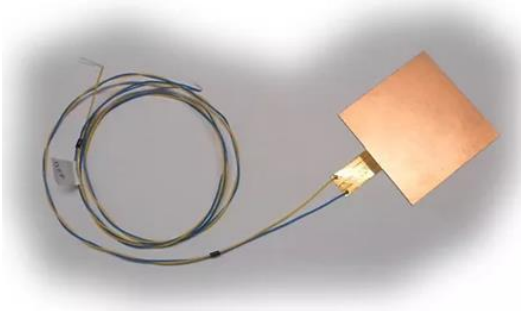


- Application
  - Caractéristique d'émission d'une source (flamme, couche de fumée)
- Appareil de mesure
  - Fluxmètre radiatif (Medtherm, Captec, Hukseflux)
- Contraintes - remarques
  - Calibration/étalonnage
  - Protection contre les suies (purge N_2)
  - Refroidissement en eau
  - Peu « intrusif »

Fluxmètre total



- Information recherchée
  - Flux de chaleur convectif + incident
- Principe
  - Mesure d'une différence de température : Schmid Boelter
- Application
  - Flux transmis à une paroi
- Appareil de mesure
  - Fluxmètre total (Medtherm, Captec, Hukseflux)
- Contraintes - remarques
  - Calibration/étalonnage
  - Protection contre les suies (purge N_2)
  - Refroidissement en eau
  - *Influence du support de fixation*



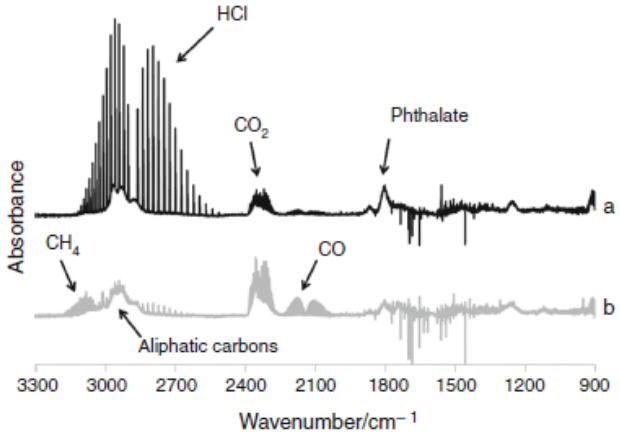
La fluxmètrie : spécificités et contraintes

- L'étalonnage
  - Source de référence (corps noir)
  - Réalisé par le constructeur
- Refroidissement/purge
  - Eau/N2
- Dépôts de suie
  - Jet d'air (ou azote)
- Influence du support
- Corrections
  - Evaluation des bilans thermiques sur la surface du détecteur

Concentration d'espèces chimiques

- Information recherchée
  - Concentration (mol/mol ou g/g) d'une espèce chimique (O2, CO2, CO, HCl, H2O, C_nH_m, C_2H_2…)
- Principe
  - Détecteur chimique in situ (sur une surface sensible)
  - Prélèvement + analyse : Paramagnétique (O_2) ; Infrarouge (CO_2/CO) ; ionisation de flamme (imbrulés) ,
  - Spectroscopie IR à transformée de Fourier (FTIR) (Multi-gaz)

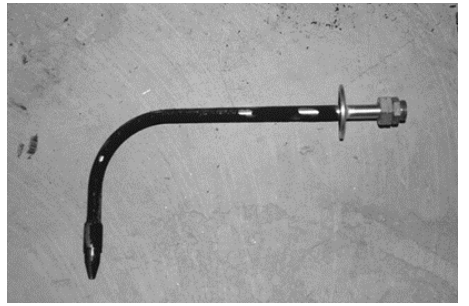
- Application
  - Composition des fumées (toxicité)
  - Réaction chimique
  - Régime de combustion (combustion sous-oxygénée, production d'imbrûlés)
- Appareil de mesure
  - Analyseurs + mallette d'échantillonnage
- Contraintes et remarques
  - Prélèvement (retard, correction)
  - Malette d'échantillonnage (régulation T et P, filtration)
  - Interférences entre gaz (FTIR)
  - Etalonnage avec des gaz étalons

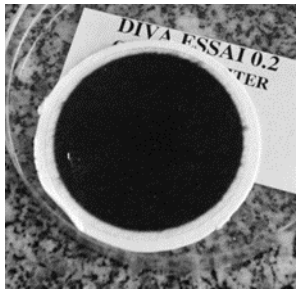


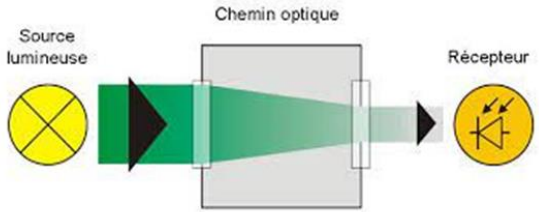
Decimus & a., Study of gases released under incomplete combustion using PCFC–FTIR, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry , (2019)

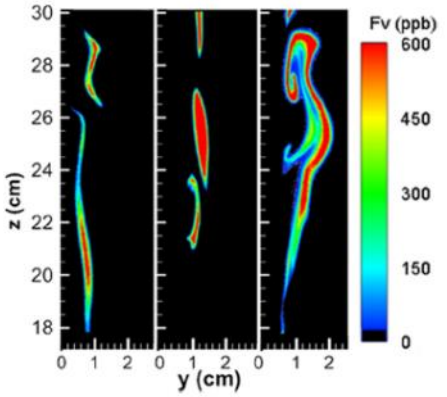
Concentration des suies

- Information recherchée
  - Concentration (g/g) ou fraction volumique (fv)
- Application
  - Composition des fumées
  - Facteur d'émission (terme source)
- Appareil de mesure
  - Dépôts sur filtre (mesure séquentielle ou continue)
  - Comptage (concentration en nombre)
  - Opacimétrie (loi de Beer-Lambert)
  - LII (Laser Induced incandescence)
- Contraintes & remarques
  - Prélèvement/dilution/ dépôts
  - Dépôts lors du prélèvement
  - Calibration pour l'opacimétrie (coefficient d'extinction)



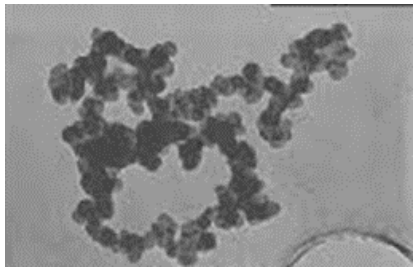




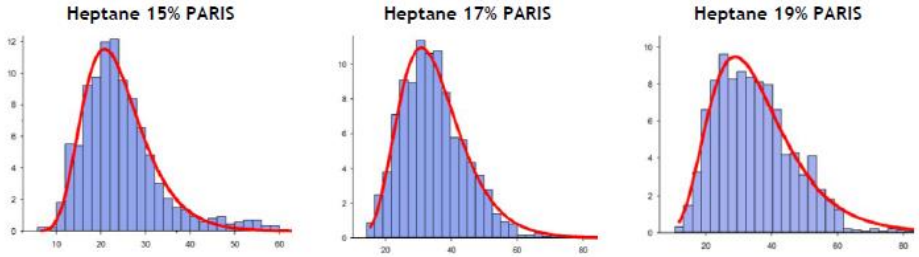


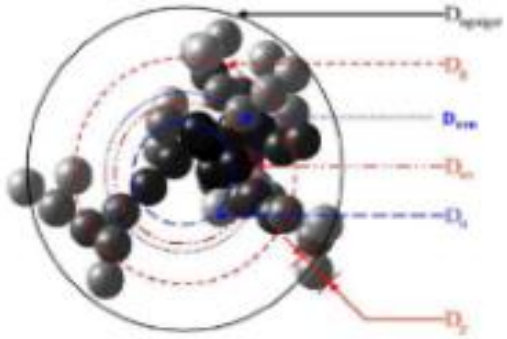
Valencia & al. Proceedings of the Combustion Institute, 2017

Distribution granulométrique des suies



- Information recherchée
  - Distribution (nombre ou masse) en fonction du diamètre
- Principe
  - Inertie (impaction), optique, électrique
- Application
  - Dépôts , Filtration, Remise en suspension
- Contraintes et remarques
  - Prélèvement/ dilution
  - Dépôts lors du prélèvement
  - Plusieurs « diamètres » (Diamètre aérodynamique, Sauter, D32,…)

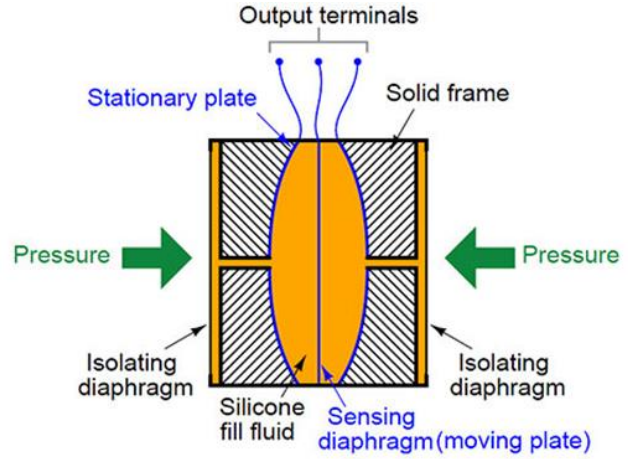




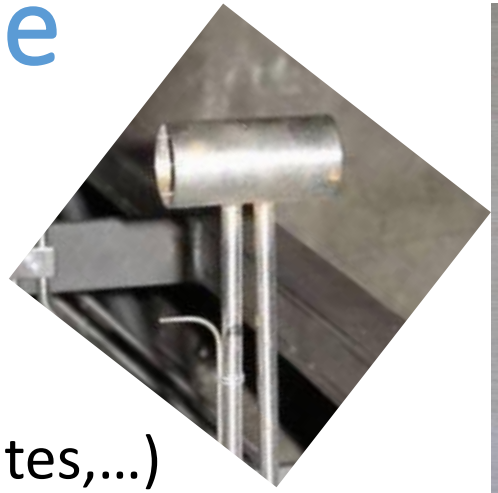
These de L. Lintis (2019) Université de Lorraine

Pression des gaz

- Information recherchée
  - Pression statique/dynamique
- Application
  - Cascade de pression dans un réseau de ventilation
  - Pression dans une enceinte
  - Mesure déprimogène (pitot, McCaffrey,…)
- Appareil de mesure
  - Transmetteur de pression (membrane)
- Contraintes et remarques
  - Connectique (tube)
  - Dérive → Etalonnage régulier
  - Faible amplitude (~Pa) pour la mesure de vitesse



Vitesse par technique déprimogène



- Information recherchée
  - Amplitude de vitesse dans une direction fixe
- Application
  - Écoulement à des ouvertures (portes, trémie, conduites,…)
- Appareil de mesure
  - Sonde de mesure (Pitot, McCaffrey) + transmetteurs

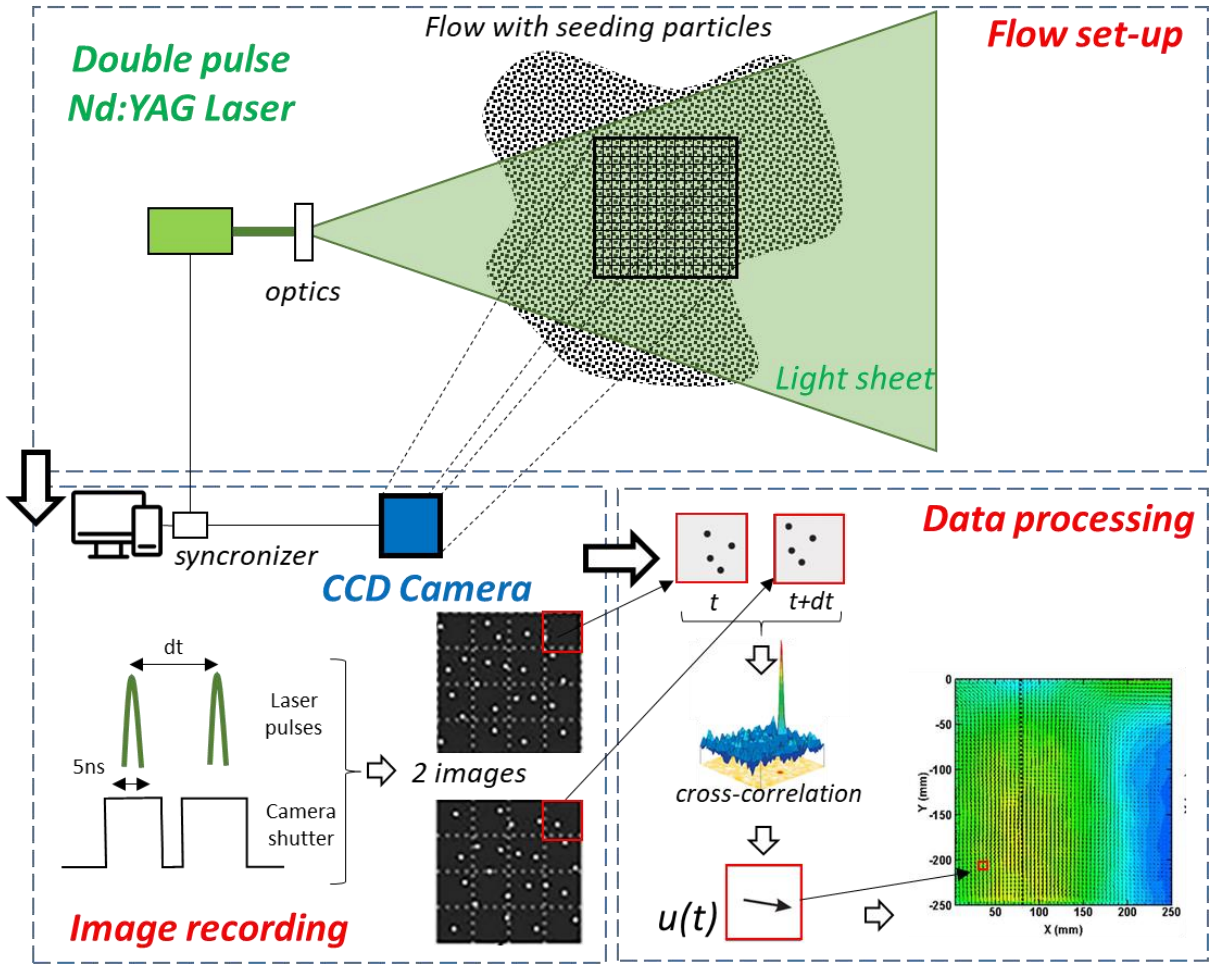
$$U = k\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

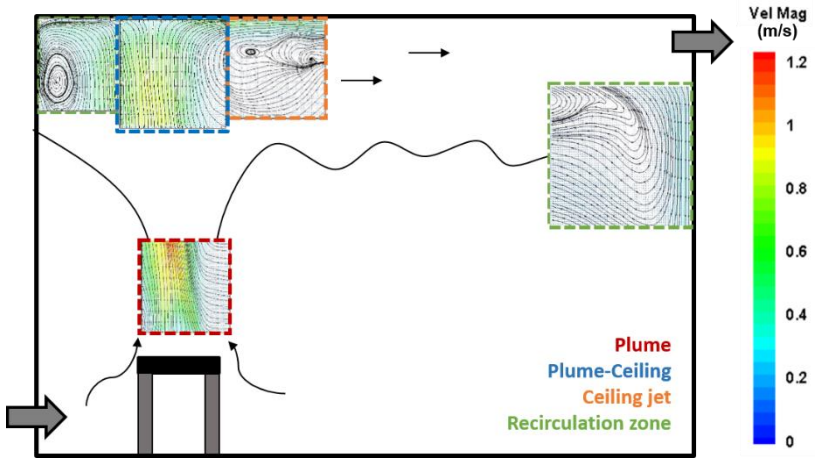
- Contraintes et remarques
  - Robuste, simple mais intrusif
  - Unidirectionnel, moyen
  - Etalonnage régulier, coefficient de sonde

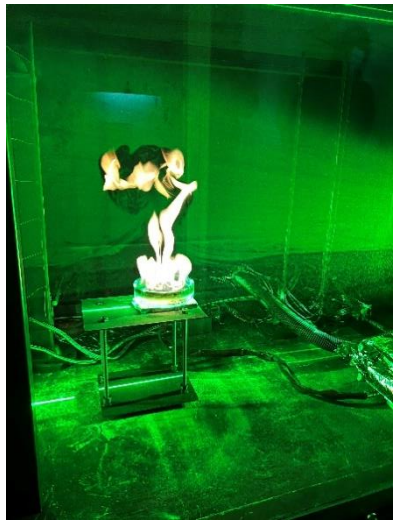
Vitesse par technique Laser : LDV/PIV

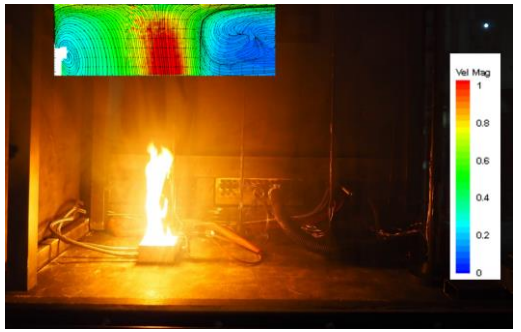
- Information recherchée
  - Vitesse ponctuel
- Application
  - Champs de vitesse 2D (PIV)
  - Grandeurs fluctuante, turbulence (LDV)
- Appareil de mesure
  - Système LDV/PIV (laser, récepteur, processing)
- Contraintes et remarques
  - Mise en œuvre complexe/ expertise requise /sécurité laser
  - Mesure détaillée, précise

La technique PIV



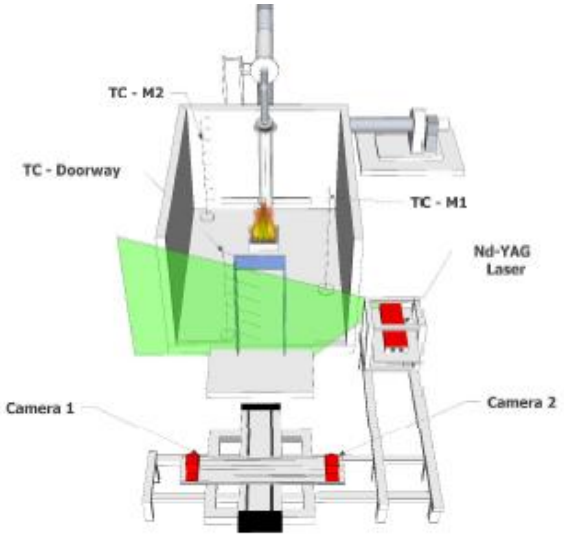


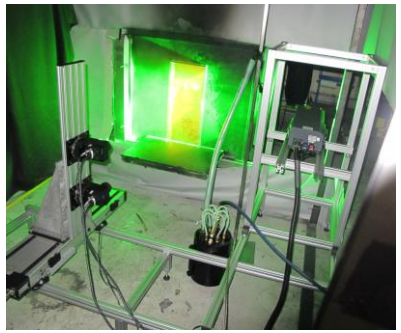


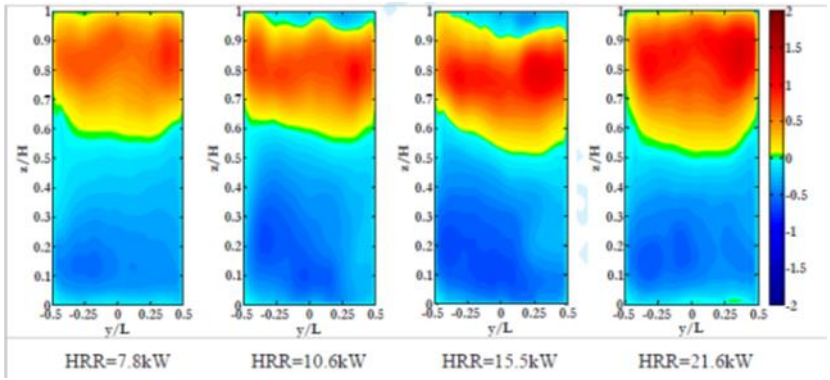


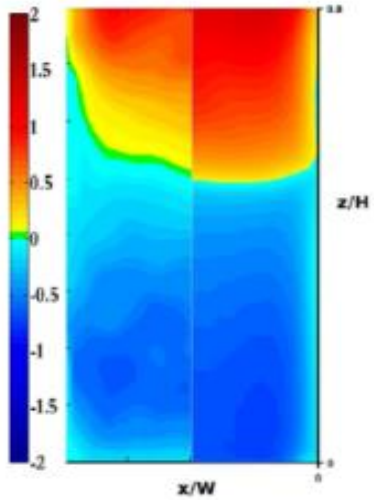
Zaidaoui, H, 10th ISFEH (2022)

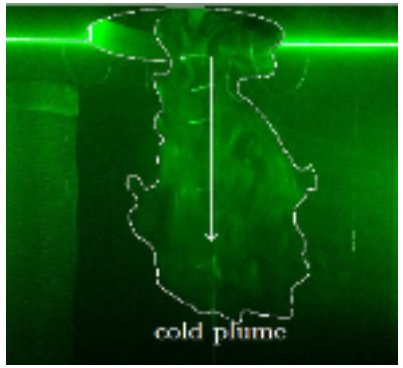
La stéréo PIV

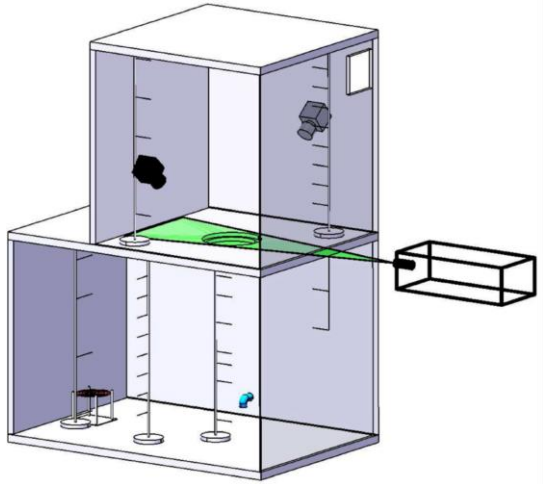


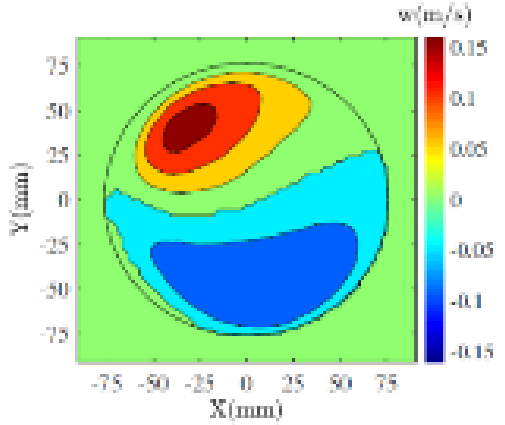


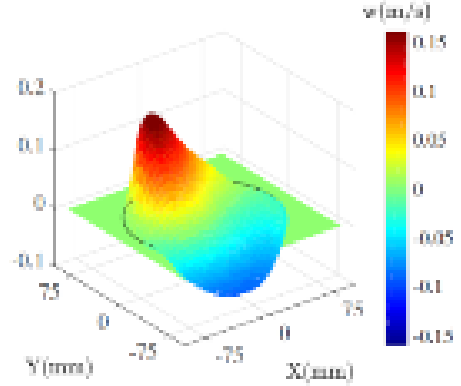






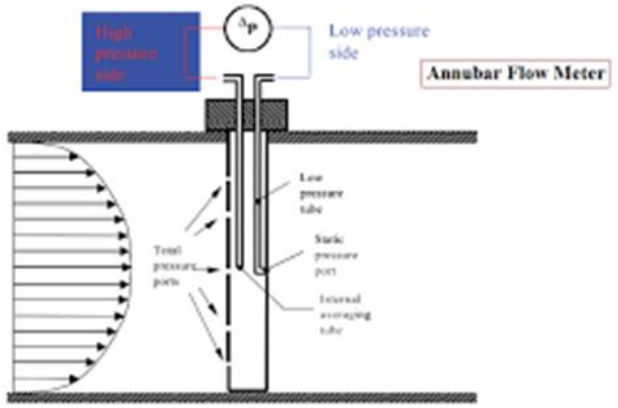


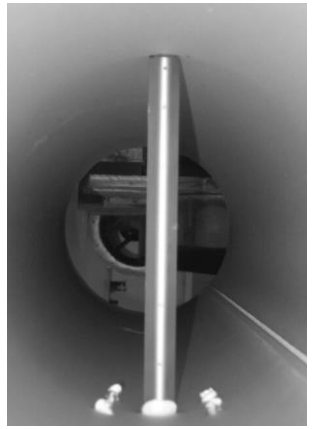




A. Koched & al. Experimental determination of the discharge coefficient of a doorway using SPIV technique for fire induced flow applications, FAM (2013)
S. Suard, & al., Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 81 (2015)
K. Varrall & al., Stereoscopic particle image velocimetry investigations of the mixed convection exchange flow through a horizontal vent , Experiments in Fluid, (2017)

Débit de gaz





- Information recherchée
  - Débit de gaz
- Application
  - Dans une conduite (ventilation)
  - Débit de combustible gazeux; brûleur à gaz
- Appareil de mesure
  - Sonde déprimogène (Pitot moyenné)
  - Débitmètre massique (propane, azote,…)
- Contraintes et remarques
  - Transmetteurs de pression + étalonnage (sonde déprimogène)

Traitements et analyse

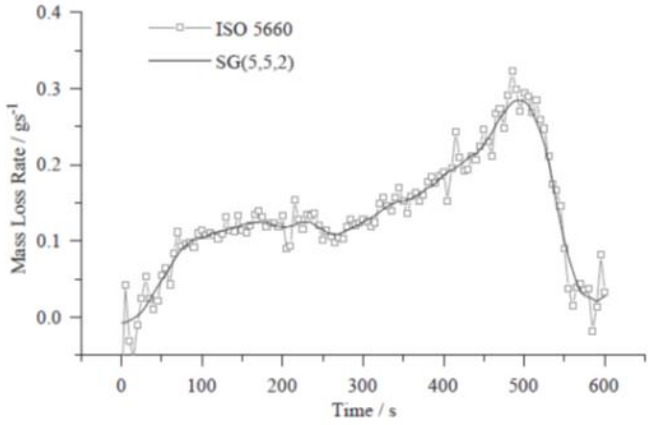
- Acquisition – Maintenance - Etalonnage
- Traitement du signal
- Incertitude
- Répétabilité
- Coût
- Analyse des données

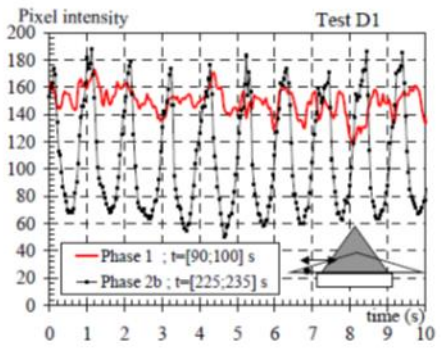
Acquisition – Maintenance - Etalonnage

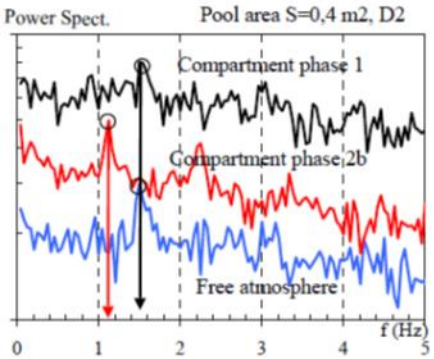
- Echelle de temps
  - Phénomène instationnaire, transitoire
  - Fréquence d'acquisition (1 hz)
  - Durée de l'expérience
- Transport du signal
  - Boucle 4-20 mA
  - ethernet
- Système d'acquisition
  - Au plus près des sondes de mesure
  - Carte d'acquisition, communication
- Maintenance – Etalonnage
  - Calibration (fréquence, dérive)
  - Suivi des équipements, entretien, maintenance

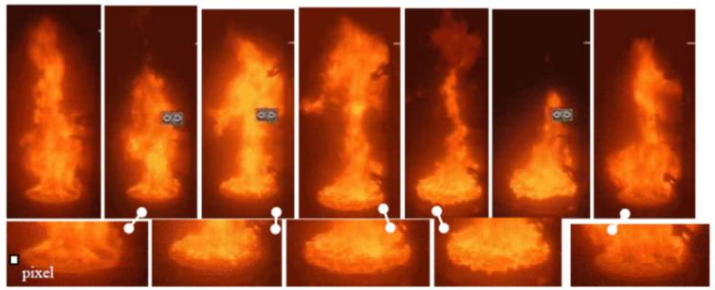
Traitement du signal

- Filtrage, moyenne
  - Savitsky-Golay (MLR)
- Echantillonnage
  - Pas constant (→ analyse fréquentielle, FFT)
- Format des données
  - Base de données (données+ méta données position, unité,…)
  - Accessibilité : comparaison, grandeurs moyenne,…
  - Communication - livraison
  - Pérennité - maitrise des données





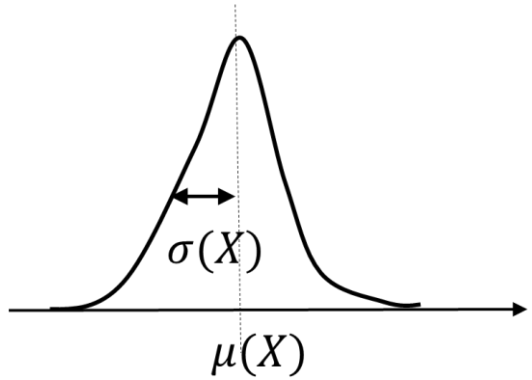




J.E.J. Staggs , Savitzky–Golay smoothing and numerical differentiation of cone calorimeter mass data, Fire Safety Journal 40 (2005)

Incertitudes

- Méthode
  - GUM: « **G**uide to the expression of **U**ncertainty in **M**easurement »
  - → moyenne μ(X)
  - → écart type σ(X)
- Méthodologie
  - Nature des incertitudes
    - Type A : aléatoire ; grand nombre de mesures
    - Type B : peu de mesures, propagation des incertitudes, données constructeurs
  - Facteur d'élargissement k (incertitude élargie) évalué par l'opérateur suivant la complexité de la mesure



Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297 1994
Guillaume & al., Uncertainty evaluation of oxygen index determination according to ISO Journal of Fire Sciences 2011
Bryant & al., Radiative heat flux measurement uncertainty, Fire Mater. 2003
Marquis & al., Accuracy (trueness and precision) of cone calorimeter tests with and without a vitiated air enclosure, Procedia Engineering 62 (2013) 103 – 119

Répétabilité (1/3)

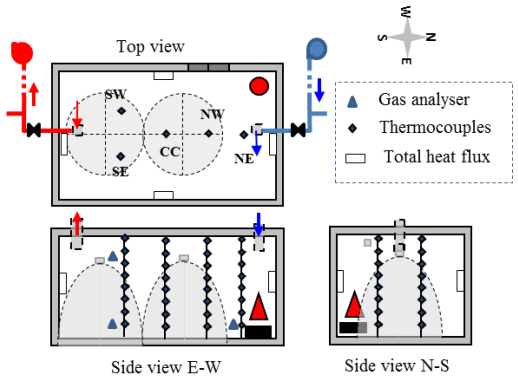
- Définitions
  - ***Répétabilité***: fidélité de la mesure pour des conditions semblables (opérateurs, installations, dates)
  - ***Reproductibilité***: fidélité de la mesure pour des conditions différentes (dispositifs, lieu, laboratoire,…)
- Application incendie
  - Répétabilité
    - Répétition d'un même essai lors d'une campagne d'essai
    - échelle réduite X3 pour tous les essais,
    - grande échelle X2 sur un essai caractéristique
  - Reproductibilité
    - Comparaison entre laboratoires d'un fluxmètre
    - Combustion sur une plaque de PMMA,…

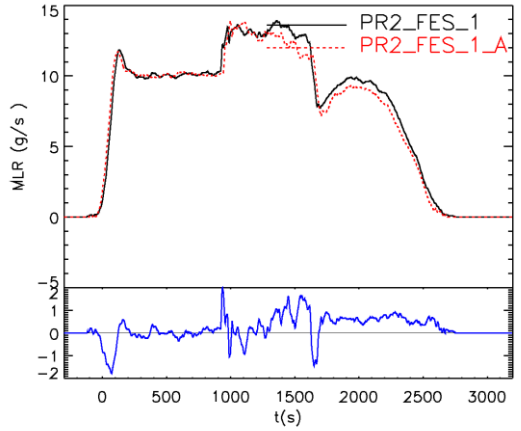
J.A. Purser & al., Repeatability and reproducibility of the ISO/TS 19700 steady state tube furnace, Fire Safety Journal 55 (2013)
N. Johansson & al., A Study of Reproducibility of a Full-Scale Multi-Room Compartment Fire Experiment, Fire Technology (2014)

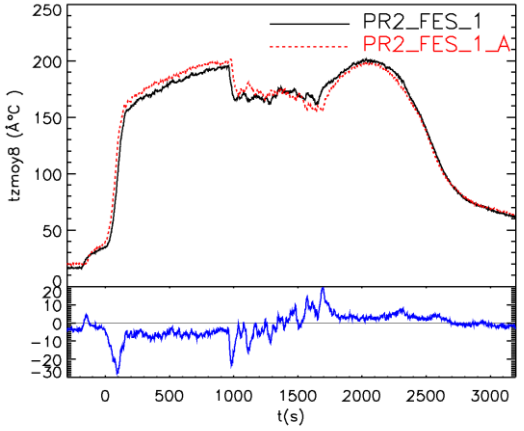
Répétabilité (2/3)

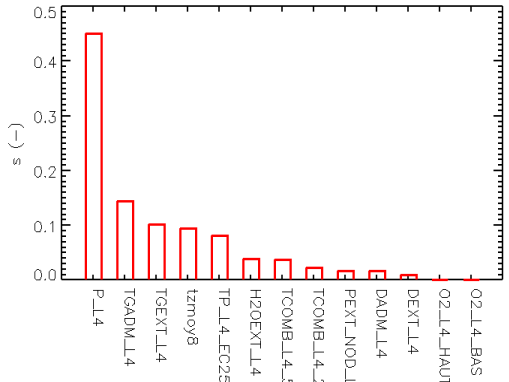
Répétabilité (x2)

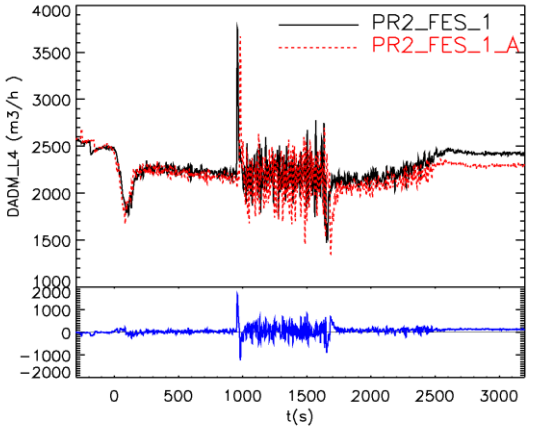
Application de l'aspersion sur un feu de nappe dans un caisson mécaniquement ventilé

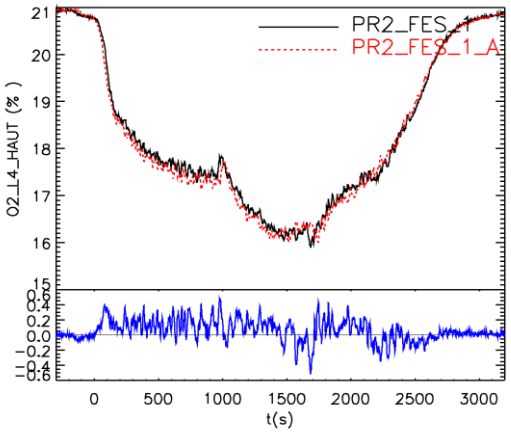


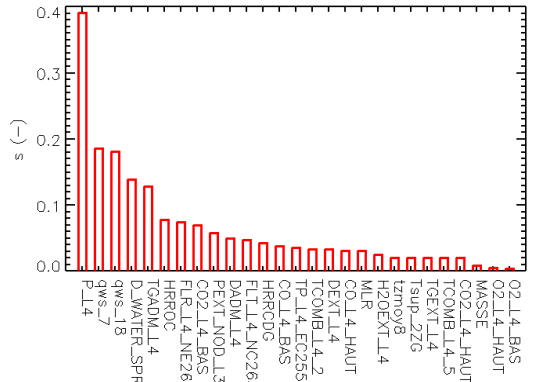








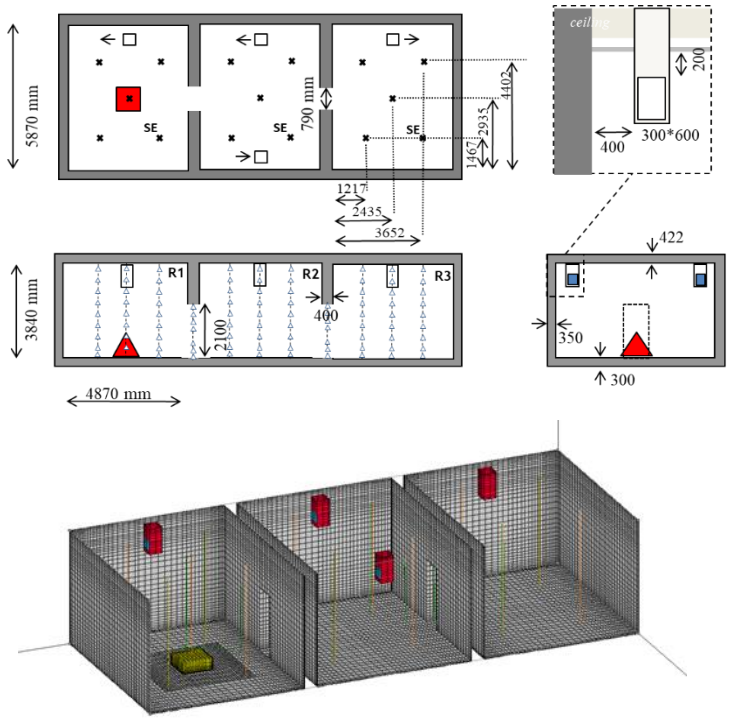


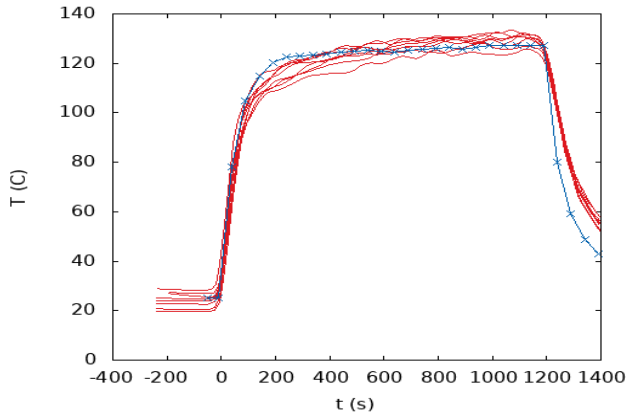


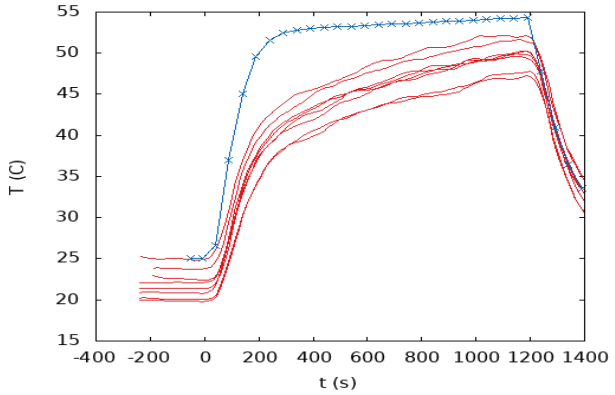
H. Pretrel, Ph. Querre, Repeatability assessment of large-scale fire experiment involving water spray system in a forced ventilated compartment, Fire and Materials, (2018)

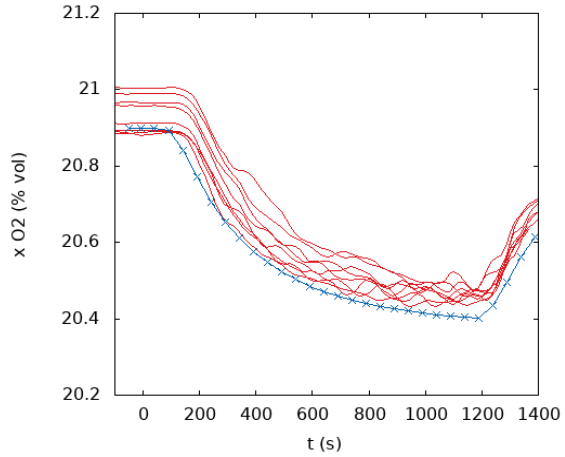
Répétabilité (3/3)

Répétabilité (x10) feu de gaz dans un ensemble de 3 enceintes ventilées mécaniquement



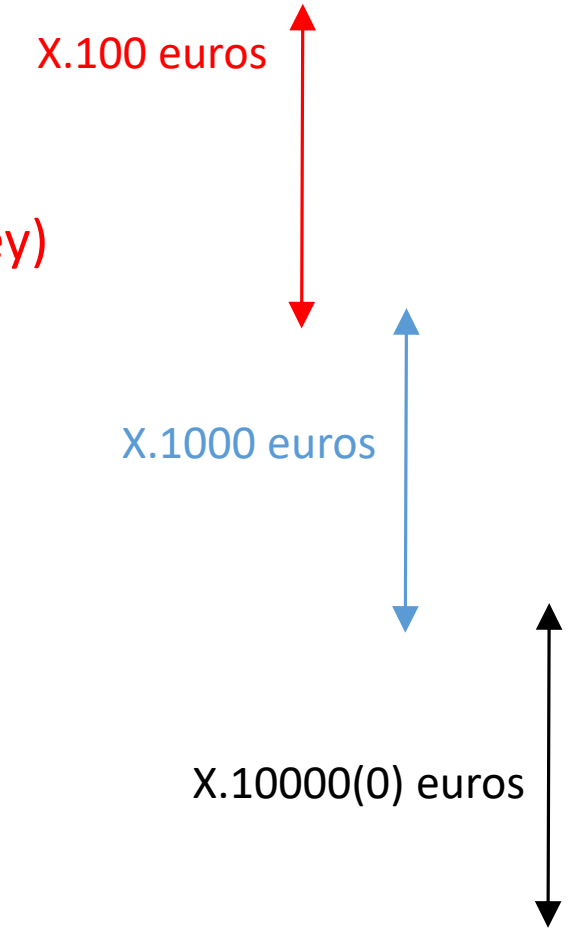






Coût/contrainte/complexité

- Vidéo
- Thermocouple
  - + carte acquisition spécifique
- Mesure de vitesse/pression/débit déprimogène (Pitot, McCaffrey)
  - Sonde, transmetteur de pression, étalonnage
- Pesée/balance
- Pyrométrie
- Opacimétrie
- Fluxmétrie
  - Etalonnage régulier/Refroidissement
- Analyse de gaz (espèces chimiques, suies)
- Thermographie infrarouge
- Diagnostics optiques laser (PIV, LDV, LII,…)



Analyse des données

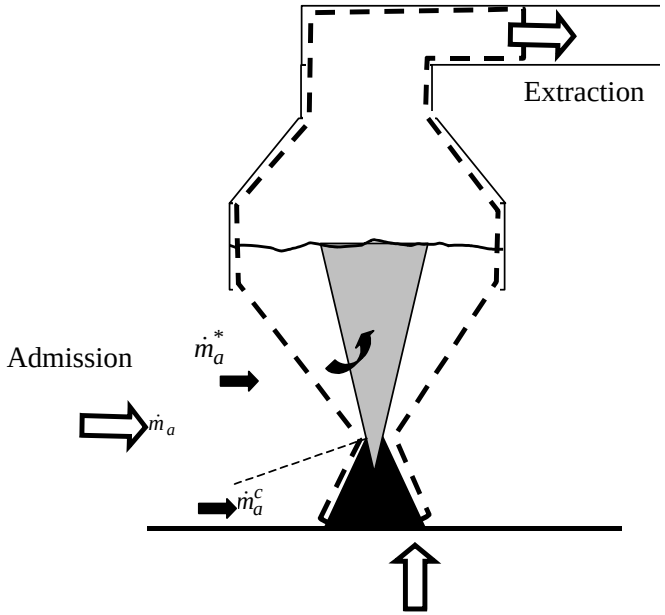
- Données élaborées (méthodes inverses)
  - Puissance (HRR)
  - Interface de fumée
  - Traitement d'images

Puissance (HRR)

- Objectifs
  - Evaluer la puissance du feu à partir de la mesure des espèces chimiques
- Expression

$$HRR_{OC} \sim \dot{m}_{O2}^{C} \boldsymbol{E_{O2}} \qquad \dot{m}_{O2}^{C} = \frac{\boldsymbol{\phi}}{1-\boldsymbol{\phi}} \boldsymbol{\dot{q}_{ext}} \frac{\boldsymbol{PM_{O2}}}{\boldsymbol{RT}} \boldsymbol{X_{O2}} \left(1 - \boldsymbol{X_{H2O}}\right)$$

- Propriétés-remarques
  - Cône calorimètre/Hotte/compartiment
  - Mesure du débit d'extraction
  - Foyer complexe/Pesée difficile ou combustible inconnu
  - Calibration sur des foyers de référence (feu de gaz)
  - Temps de réponse
  - Facteur d'émission + enthalpie de combustion



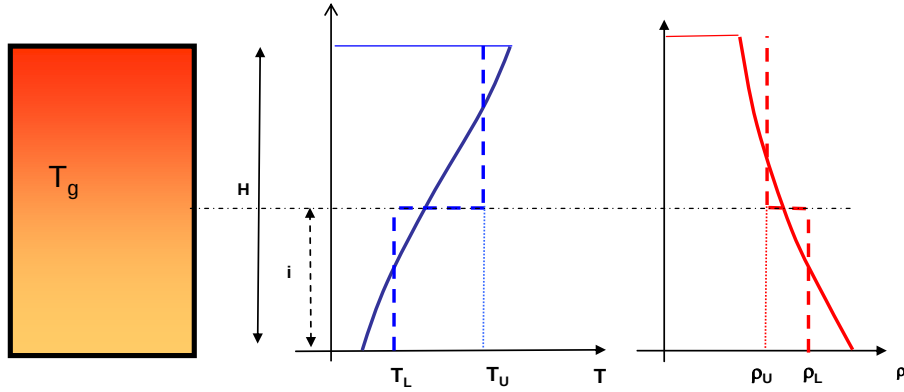
Tewarson A. Generation of heat and chemical components in fires. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd edn), Section 3, Chapter 4
Janssens ML. Measuring rate of heat released by oxygen consumption. Fire Technology 1991; 234–249
H. Prétrel & al., Experimental determination of fire heat release rate with OC and CDG calorimetry for ventilated compartments fire scenario, Fire Mater. 2014

Stratification thermique

- Objectifs
  - Evaluer la stratification simplifiée (T_{up}, T_{low}, h) à partir d'un profil de température
- Expression

$$J = \int_0^H T(z)dz \qquad I = \int_0^H \frac{1}{T(z)}dz$$

$$\boxed{\begin{aligned} J &= T_L i + T_U (H - i) \\ I &= \frac{1}{T_L} i + \frac{1}{T_U}(H - i) \end{aligned}}$$



- Propriétés-remarques
  - Plusieurs méthodes (sensibilité à la méthode peut être importante)
  - Nécessaire pour la validation des codes à zones

L.Y. Cooper & al., An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multilroom fire scenarios, J. Heat Transf. 104 (1982)
Y. He & al., Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment, Fire Saf. J. 3 (1) (1998)
H. Pretrel & al., New developments in data regression methods for the characterization of thermal stratification due to fire, Fire Safety Journal 76 (2015)

Traitement d'image

- Objectif
  - Interpréter des images (visible,…)
- Méthode
  - Niveau de gris/composante RBG/binarisation/seuillage/filtre 2D
- Application
  - Flamme/zone réactive : forme (surface, volume, dimension,…)
  - Régression de surface
  - Détection de flamme

Recommandations pour la mesure

- Identifier les contraintes du milieu (température, suie, présence de flamme,…)
- Définir la grandeur à mesurer et son exploitation (modèle physiques, gammes, dynamique, résolution temporelles,…)
- Identifier la technique de mesure la plus adaptée
- Qualification de la chaine de mesure (acquisition, échantillonnage, calibration, incertitude)
- Evaluer l’incertitude et la répétabilité de la mesure
- Anticiper le traitement et l’analyse de la mesure

Perspectives

→ Nouvelles technologies

- Etat de l'art dans d'autres disciplines (bibliographie régulière)
- Mesure à champs : PIV/vidéo/ Thermographie thermique
- Mesures acoustiques
- Fibre optique pour la température

→ Couplage expérimentation/simulation

- Optimisation de la mesure (position, grandeurs)
- Mise en œuvre de méthodes « inverses »
- Meilleur connaissance des phénomènes physiques en jeu
- Dimensionnement de l'expérience
- Comparaison