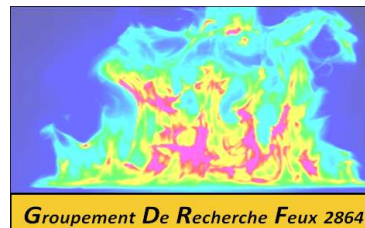


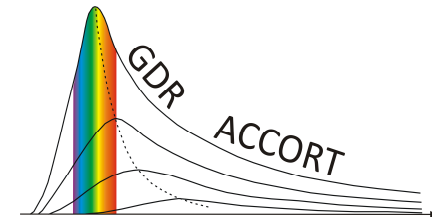
Forces et faiblesses des modèles de rayonnement utilisés par la communauté FEUX...

P. Boulet et col*...

LEMMA - Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
Opération Scientifique Combustion, feux de forêts, feux confinés



&



* Avec l'aide de Z Acem, E Blanchard, A Collin, B Porterie, Y Billaud, R De Marco, S Suard, JL Dupuy, A Lamorlette, D Morvan, A. Normande...

17 Problèmes posés par ce type de synthèse...

1 Travailler par domaines d'application ?

- Feux de forêts / Feux confinés / Modèles de dégradation
- Identification et métrologie

2 Travailler par type de méthode ? par codes?

- Pbe : on trouve de tout... des facteurs de forme à la MMC...
- Qqs codes bien identifiés (FDS, ISIS, SAFIR, Code_Saturne, FIRESTAR, FIRETEC, FIREFOAM, etc...), mais beaucoup d'autres codes « maisons »

+ Problème des propriétés radiatives, des mesures,... ?

Au final, dans ce qui suit ...

- **des généralités sur le rayonnement et les habitudes au sein du GDR Feux**
- **quelques illustrations sur des cas « choisis »**

Difficultés spécifiques dans le domaine « feux »

- 1 **Gros problème de couplage**
 - Le rayonnement n'est qu'un des modes de transferts
 - Chaleur – masse + pbe de la dégradation, des sources, combustion...
- 2 **Milieus hétérogènes , différentes échelles**
 - Approche multi-échelles, très grandes dimensions
 - Milieus multiphasiques, dispersés
- 3 **Une influence du rayonnement forcément importante...
... mais variable / à la convection par exp.**

La réalité est souvent celle d'un milieu semi-transparent, hétérogène, anisotherme (mélange de gaz chauds, de suies, de particules, ... de gouttes d'eau si aspersion)

Situation généralement instationnaire! Sur de très grands domaines de calculs!

En résumé : le pbe le plus complexe avec en plus des limitations imposées en temps de calcul et stockage de données... pas étonnant que l'on cherche à simplifier!

2^e Modèles - Les plus « simples »...



simplicité



très approché...

1 Notion de fraction radiative

- Paramètre χ_r , fixé +/- arbitrairement (0,35 suggéré dans FDS)

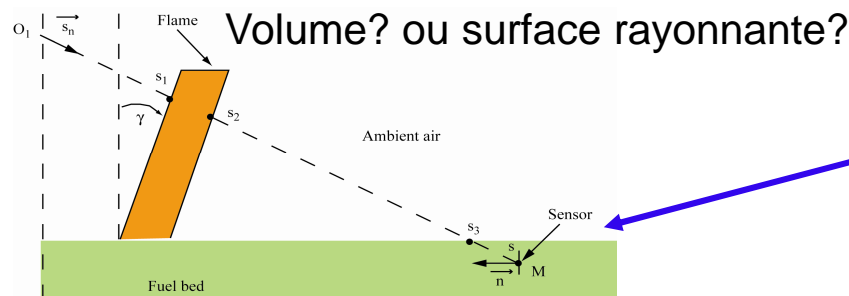
2 Concept du panneau rayonnant / facteur de forme

- La source de rayonnement émet « $\epsilon\sigma T^4$ »

Sources et cibles sont des surfaces opaques noires ou grises liées par des considérations géométriques... notion de facteur de forme F_{ij}

Emissivités et absorptivités pré-supposées, mal connues

Extrait de
 Rossi et al. 2010



$$\Phi = \tau \epsilon \sigma T_f^4 S_f F_{f \rightarrow M} \quad ?$$

$$\Phi = \tau 4 \pi \kappa_f \frac{\sigma T_f^4}{\pi} V_f \mathfrak{S}_{f \rightarrow M} \quad ?$$

Modèles basés sur la résolution de l'ETR (1)



Éprouvé, simple et robuste



Optiq^t épais, LAS

1 Approximation P1

- Notamment dans Code_Saturne, ISIS

$$\Rightarrow \nabla_{\tau} \left(-\frac{\nabla_{\tau} G}{3 - A_1 \omega} \right) + (1 - \omega)G = (1 - \omega)4\pi L_b$$
$$\nabla_{\tau} \vec{q} = (1 - \omega)(4\pi L_b - G)$$
$$\vec{q} = -\frac{\nabla_{\tau} G}{3 - A_1 \omega}$$

- Avantages : temps de calcul (une seule équation à résoudre en milieu gris)
+ vraiment tirée de l'ETR (2 grosses hypothèses: « épais » et LAS)
+ diffusion peut être prise en compte (anisotropie limitée / LAS)
+ approximation souvent utilisée / qualité maîtrisée
- Pbe si le milieu n'est pas optiquement épais / pas toujours vérifié

Remarque : des améliorations possibles (MDA, IDA)... « jamais » vues dans les feux

Modèles basés sur la résolution de l'ETR (2)



Commence à être plus fin...



Effets de rayons, tps de calcul

2 DOM et MVF

- Notamment dans SAFIR et FIRESTAR en feux de forêts
dans Code_Saturne et ISIS (non diffusant) en confiné
dans FDS (avec diffusion) en confiné
- Basé sur la même littérature que dans la « communauté rayonnement »
Quadrature angulaire souvent limitée à de la S_4 (qqx exceptions)
Approche sur milieu gris (avec moyennes de Planck parfois)
- Contrainte forte pour limiter le poids « informatique » d'où les csqs:
 - effets de rayons inévitables
 - discrétisation spatiale / tailles de mailles difficilement réduites
 - discrétisation spectrale « jamais » appliquée

Modèles : DOM – exemple de FIRESTAR

⇒ Une résolution de l'ETR couplée à un modèle de propagation
Application aux feux de forêts

**Equation de transfert radiatif (RTE)
implémentée dans FIRESTAR**

$$\frac{d \alpha_g I}{ds} = \alpha_g \sigma_a \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right) + \sum_k \left[\frac{\sigma_s \alpha_s}{4} \left(\frac{\sigma T_s^4}{\pi} - I \right) \right]_k$$

$$J = \int_0^{4\pi} I d\omega$$

The diagram shows a forest fire scene with a hazy, orange-tinted sky. Two red arrows point downwards from the RTE equation towards the labels 'Gaz + Suie' and 'Combustible solide' at the bottom. The arrow from the first term of the equation points to 'Gaz + Suie', and the arrow from the summation term points to 'Combustible solide'.

Gaz + Suie **Combustible solide**

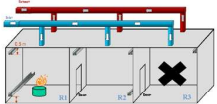
- A priori, DOM S4, milieu gris
- Prise en compte possible du couplage avec la turbulence
- Travail spécifique sur la contribution des différentes phases

Modèles : SAFIR – un autre exemple sur ETR multiphasique / MVF

➡ ETR multiphasique couplée à un modèle de propagation
Prise en compte des suies, gaz, phases gouttelettes

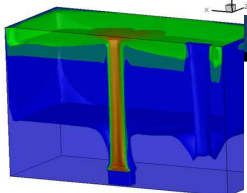
SAFIR: PRISME Door (PRS-DI-D3)

Fire propagation in a mechanically-ventilated two-room configuration

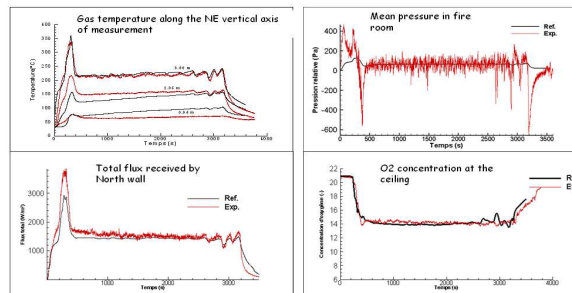


Fire in R1
R1 & R2: 6m x 5m x 3.95m
Concrete walls (thickness: 0.3m)
Ceiling insulated with 5cm-thick rock wool panels
Fuel: C12H26
Pyrolysis mass rate: experimental data
Air renewal rate: $-4.7h^{-1}$ in R1 and R2

Isotherms 370, 420 and 520K



SAFIR: PRISME Door (PRS-DI-D3)



Diapositive N°10



Diapositive N°11



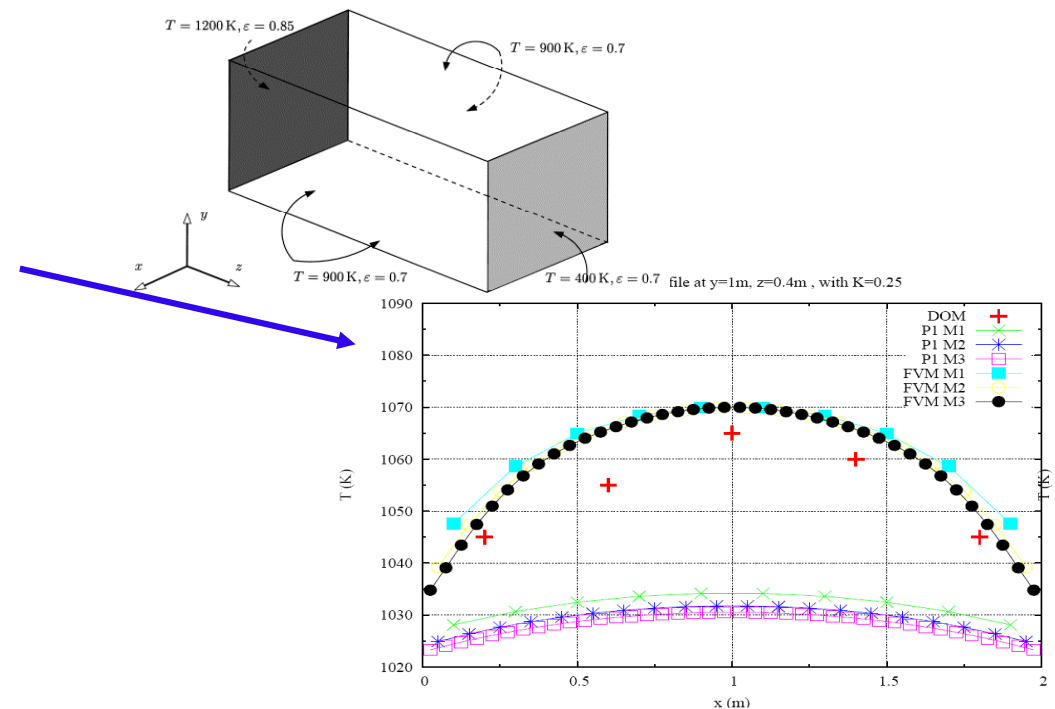
- Nombreux cas tests
- Démo que le couplage est possible sur des cas complexes
- Restent les défauts « habituels » des méthodes à quadrature, mais solution éprouvée

Modèles : MVF – exemple de ISIS

⇒ ISIS/ code complet prévu pour P1 mais étendu à de la MVF

- A priori, MVF S4 (?) milieu gris
- Mais \neq modèles pour ptés radiatives
- Possibilité de couplage
- Travail de validation sur cas tests
- Non diffusant

*Une expérience importante comme
code de propagation avec couplage au
rayonnement.
Pas souvent avec la MVF?*

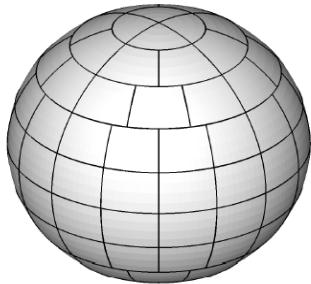


Modèles : MVF – exemple de FDS

- ➡ Une résolution de l'ETR, avec prise en compte de la diffusion (proche d'une méthode δ -Eddington)
- Couplé à un code de propagation pour feux confinés

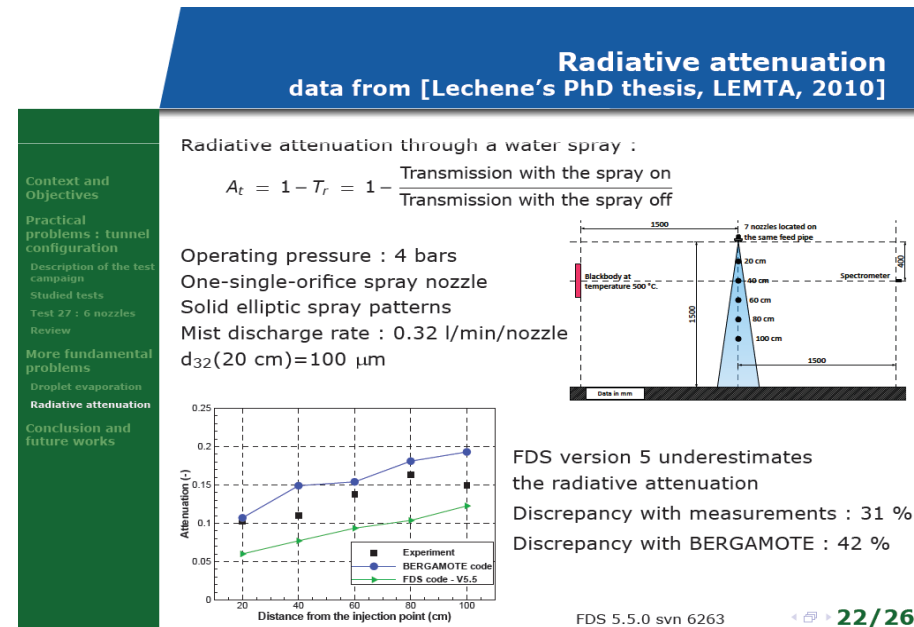
Absorption : modèles de suies et de gaz

Discrétisation angulaire à poids cst



Test récent sur échelle labo
Plutôt convaincant sur un
pbe de rideau d'eau
(E. Blanchard, 2011)

Le temps de calcul reste un pbe...



Rem.: des résultats décevants avec les résolutions spectrales (6 ou 9 bandes)

Autre approche fine... idéale en terme de précision?



Modèle de référence



« trop gourmand? »

3 Méthode de Monte Carlo

- Testé par IUSTI (thèse Y. Billaud)

MMC également associée à FIRETEC (INRA/LANL)



S'accorderait bien des pbes de « grosses mailles »

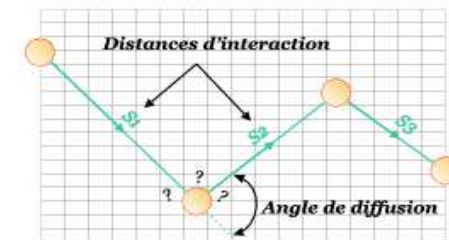
L'approche spectrale ne serait pas un pbe avec un tirage adapté

Idéal en terme de précision si les statistiques sont convergées



Temps de calculs...

Couplage...



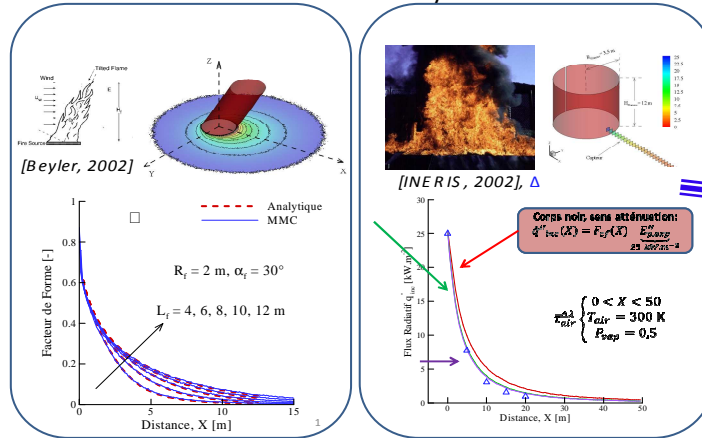
Rem.: au moins un moyen de se donner des solutions de référence

MMC – exemple des travaux de Y. Billaud à l'IUSTI

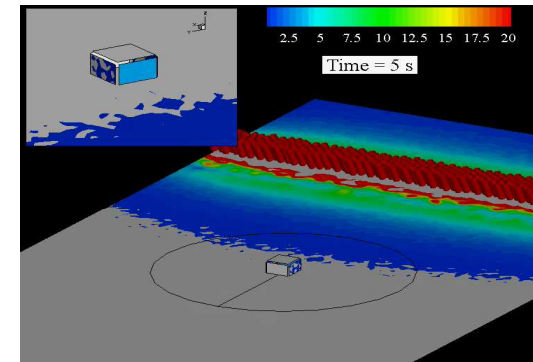


La flamme reste un panneau rayonnant, mais on pourrait combiner à une approche spectrale

Validation du facteur de forme et comparaison de différents modèle de rayonnement



Validation



Simulation d'un feu se propageant dans du chêne
 Kermès à $V_p = 40 \text{ m.min}^{-1}$

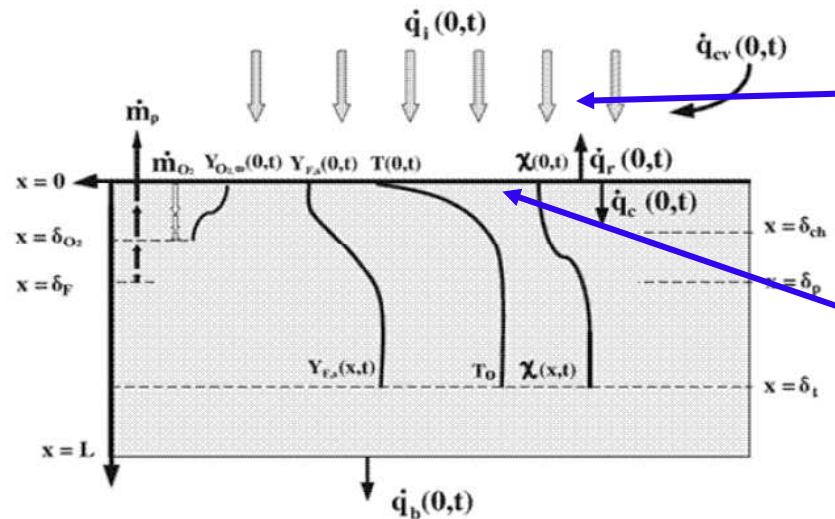
Application

Reste le pbe du couplage et des temps de calculs induits

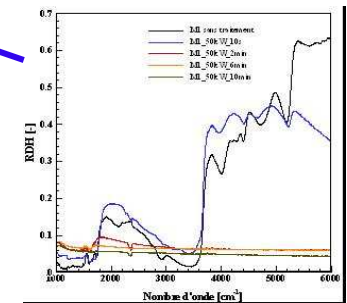
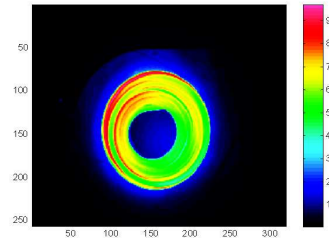
Problème spécifique de la dégradation thermique

Modèles 1D de transferts couplés chaleur et masse avec un volet radiatif

- Complicqué!
- Ptés radiatives évolutives
- et non maîtrisées
- Opaque? Semi-transparent?



Représentation schématique 1D de la dégradation d'un solide, Torero



Déjà vus : loi de Beer, Rosseland, deux-flux / attention aux limitations!

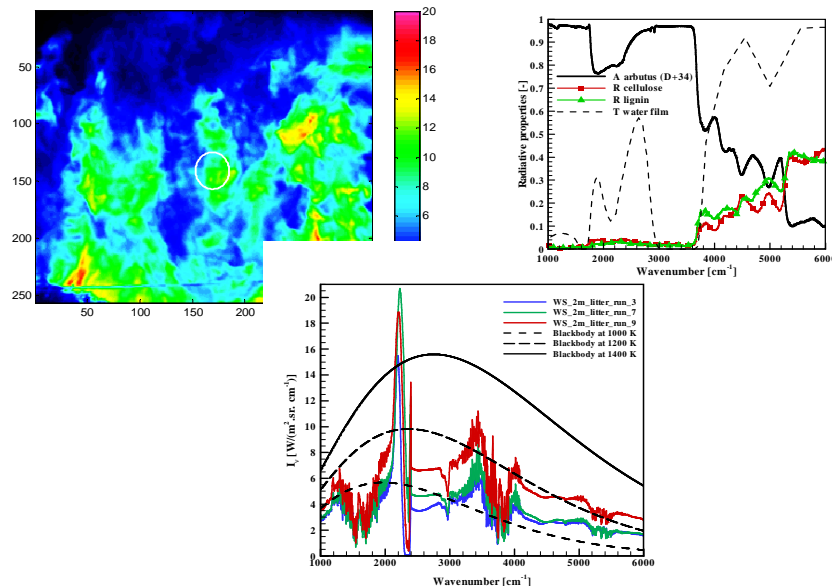
MMC... la référence si on maîtrise le coef d'absorption?

Pourquoi pas la P1 ? Un bon compromis?

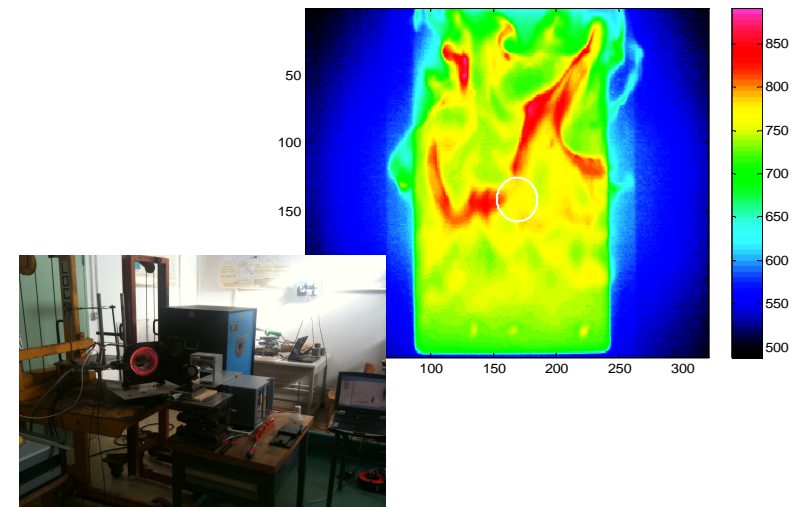
3^e Propriétés / simplifications courantes sur les propriétés des surfaces

Possible d'en savoir plus avec la spectroscopie IR : on sait mesurer des absorptivités et des émissivités! ... éviter l'hypothèse « surface noire » systématique

Sur feux naturels



Sur feux confinés



Peut-on faire du spectral? Au moins des moyennes pondérées...

Propriétés des milieux et des flammes / très variables selon les cas

Pour la flamme cela dépend des hypothèses :
 panneau rayonnant ou volume semi-transparent

$$\varepsilon = 1 - e^{-\kappa L} \quad \text{ou ETR !}$$

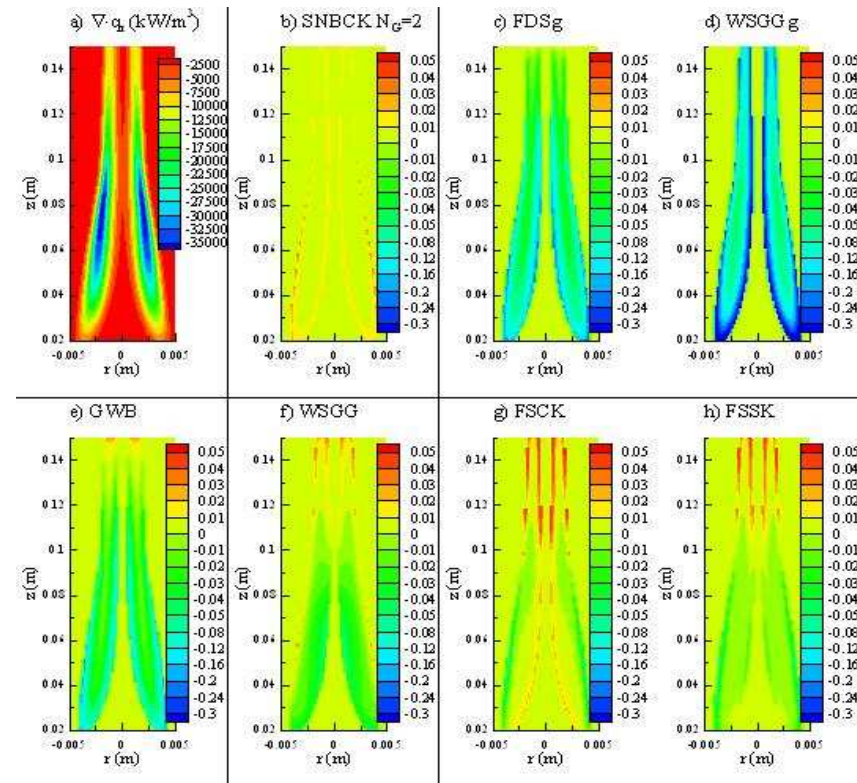
Des valeurs de κ imposées constantes...
 ... ou des évaluations élaborées sur la base de
 distributions en espèces et températures :

Modèles de suies : $\kappa = 5,5 f_v / \lambda$
 Modèles de gaz: du gris au SNBCK

Pour les végétaux (feux de forêts) corrélation de
 DeMestre :

$$\kappa = (1 - \tau) n_l \frac{S}{4}$$

Généralement ramené à du « gris équivalent »

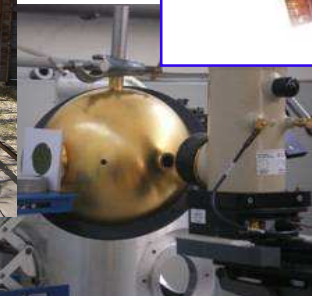
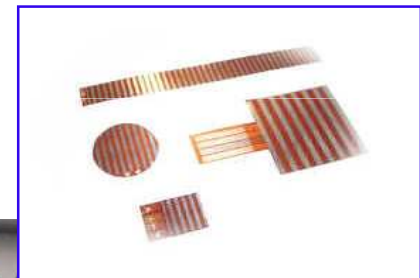
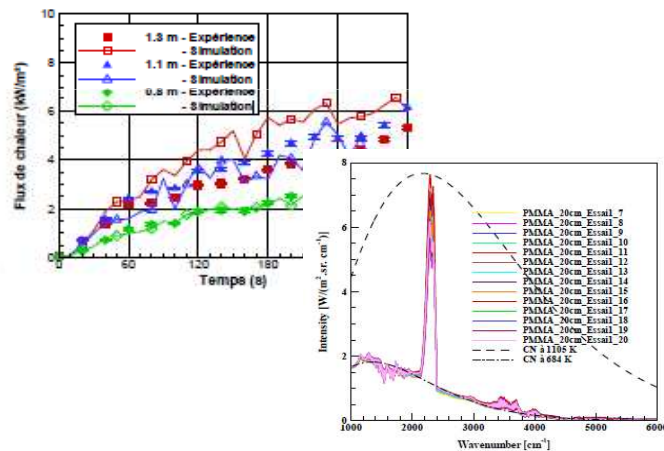


Benchmark R. de Marco sur flamme éthylène/air
 2D axi avec suies/CO₂/H₂O sur champs précalculés
 ETR résolue par FVM

Quelques réflexions sur la métrologie

Captec et medtherm vs caméra et FTIR :

- d'un côté la simplicité et un coût acceptable mais des résultats parfois incertains
- de l'autre des appareils chers et complexes donnant énormément d'infos... qu'il faudrait mieux exploiter et peut-être simplifier.



Que valent vraiment les capteurs de flux « de rayonnement » ?

Comment les évaluer vraiment? (idée en cours INRA/SPE/LEMETA/...)

En résumé... avec qqs réflexions personnelles

- On trouve vraiment des modélisations de tous niveaux... (de F_{ij} à la MMC)
- **Mais faire de la MMC avec des modèles de gaz performants est trop coûteux?**
- **Le pbe est clairement la complexité du rayonnement vs ressources nécessaires**
- Les modèles vraiment fins sont rarement couplés au code de propagation
- Une vraie faiblesse : encore trop d'hypothèses de flammes = panneaux rayonnants?
 - + que vaut l'hypothèse de flamme mince? + « l'invariance » avec le chgt d'échelle?
 - + généraliser les études de sensibilité?
- Peut-être faudrait il?...
 - au moins **se donner des solutions de référence / spectral et MMC**
 - au moins faire du « gris équivalent » (moyennes de Planck ou autre)
 - recevoir **l'aide de ACCORT pour la modélisation fine du rayonnement des gaz**
 - progresser sur l'identification de propriétés d'après mesures radiatives