



Rideaux d'eau et brouillard d'eau

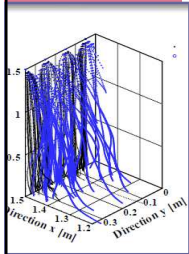
Principes de la technologie et recherches en cours

Pascal BOULET

Opération scientifique Combustion, Feux de Forêts, Feux Confinés

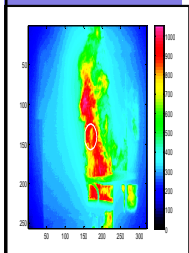
LEMTA – Université de Lorraine, CNRS

pascal.boulet@univ-lorraine.fr



Sommaire

- Les modes d'action des brouillards d'eau
- Propriétés intéressantes des brouillards d'eau et conséquences
- Quelques éléments de modélisation... ce que l'on sait faire
- Les essais à l'échelle du laboratoire
- Les essais en vraie grandeur
- Perspectives...



Quelques mots sur le LEMTA

Le LEMTA (UMR7563) : une Unité Mixte de Recherche du CNRS, associée à l'Université de Lorraine

160 chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, post-doctorants et personnels administratif et technique

”Un travail équilibré entre recherche fondamentale et appliquée, et entre acquisitions de connaissances et préoccupations sociétales comme l'énergie (pile à combustible), les incendies de forêts, la sûreté du stockage de déchets radioactifs, ...”

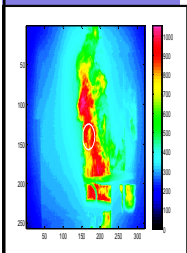
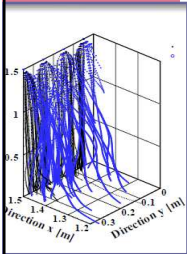
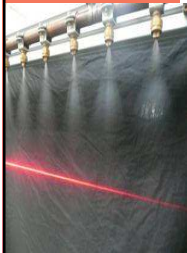
Groupes de recherche :

- Milieux Fluides Réactifs Multiphasiques
- Energie et Transferts
- Mécanique des Matériaux et Structures

... avec une Opération Scientifique (12 chercheurs, enseignants-chercheurs)
« *Combustion, feux de forêts, feux confinés* »



La recherche sur les feux et la lutte contre incendie en France : le GDR* FEUX (*Groupe De Recherche, CNRS)



Modes d'action des brouillards d'eau

Pulvériser à haute pression
Pour une granulométrie fine



Mots clés:

- Refroidissement de la flamme
- Refroidissement des surfaces combustibles
- Inertage
- Ecran radiatif

Pour y parvenir...

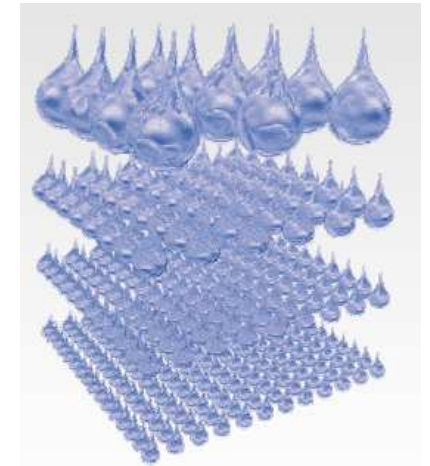
- Evaporer les gouttes (*cf chaleur latente*)
- Produire de la vapeur d'eau (*inerte*)
- Mouiller les surfaces combustibles (*pénaliser la pyrolyse*)
- Absorber et diffuser les flux rayonnés (*atténuer les flux*)

B.E.* ... des propriétés intéressantes

(*Brouillard d'eau)

« Fractionner » l'eau en gouttes de petites tailles...

- Augmente la surface totale d'échange eau / gaz
- Améliore la capacité d'évaporation
(rappel: favorise les effets de puits thermique et inertage)
- Augmente les capacités d'absorption et diffusion



(S. Coquard)

CSQS attendues...

- Une efficacité supérieure à quantité d'eau donnée
- Possibilité de réduire les débits d'eau utilisée
(réduction des dommages dus à l'eau, du stockage éventuel,...)

3 caractéristiques fondamentales :

- 1L d'eau divisé en gouttes de 1mm forme une surface de 6m² ; 100μm...60m²; 10μm... 600m²!
et les échanges sont proportionnels à la surface!
- Propriétés de l'eau : capacité thermique 4180J/kg/K... chaleur latente vaporisation 2,2MJ/kg!
- 1L de vapeur occupe un volume 1700x plus grand qu'1L d'eau liquide

La taille des gouttes, un critère crucial

Favorisera les échanges, l'évaporation, l'atténuation du rayonnement *

(*) à débit constant...

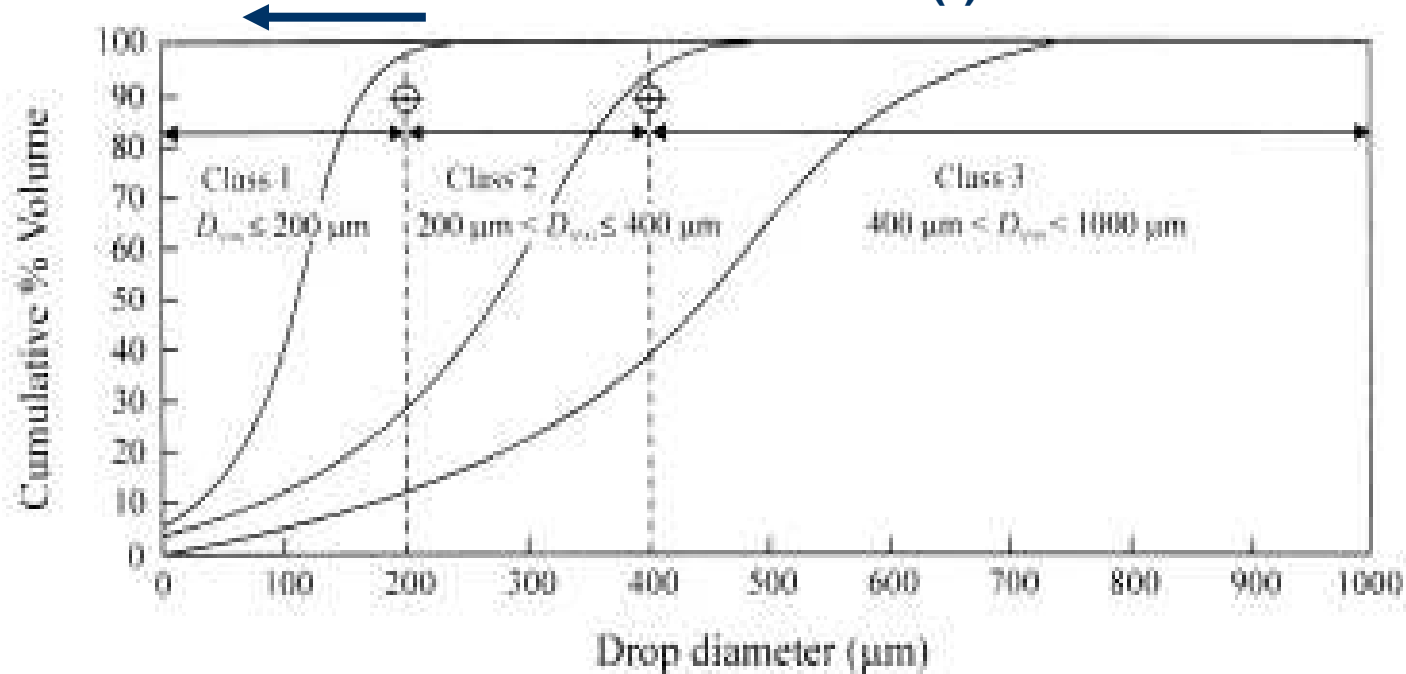
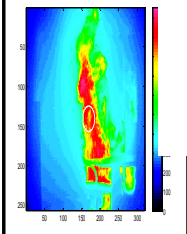
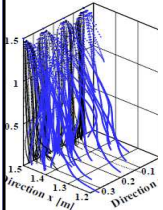
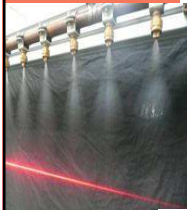


Fig. 7. Classification of water sprays by droptime distribution [31]. Reprinted with permission from Fire Protection Handbook, 18th ed., Copyright © 1997, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269.

Favorisera l'inertie, le mouillage, mais pénalisera l'évaporation

Séminaire IWMA, Paris, 17 avril 2013

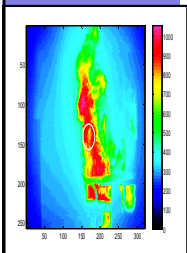
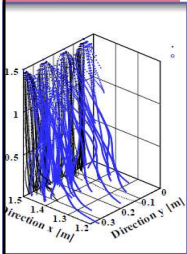


Modélisation et simulation, ce que l'on sait faire (extraits de présentations...)



Rideau d'eau, en quelques mots, comment la simulation fonctionne...

Suivre les gouttes le long de leur trajectoire dans le milieu environnant (effets connus: trainée, gravité, turbulence, évaporation, échanges thermiques), reproduire leur effet sur le rayonnement thermique.



Contexte
Activités rideaux d'eau
Activités feux et caractérisation des flammes
Bilan - Perspectives

Généralités sur les rideaux d'eau
Outil numérique BERGAMOTE
Dispositif expérimental
Exemples de résultats

Schéma de principe de la simulation

Couplage de trois codes de calculs

Écoulement diphasique où l'air est entraîné par le mouvement des gouttelettes d'eau (couplage eulérien-lagrangien)
Transferts radiatifs dans le brouillard d'eau (méthode de Monte-Carlo pour le rayonnement)

```

    graph TD
      A[Suivi Lagrangien  
↳ spray] -- Étape I --> B[Simulation Eulérienne  
↳ fluide]
      B -- Étape II --> C[Monte Carlo  
↳ rayonnement]
      C -- Étape III --> A
    
```

LEMMA UMR CNRS 7563 - Nancy - Université
Pascal Boulet - 6/07/2011
7 / 37

Contexte
Activités rideaux d'eau
Activités feux et caractérisation des flammes
Bilan - Perspectives

Généralités sur les rideaux d'eau
Outil numérique BERGAMOTE
Dispositif expérimental
Exemples de résultats

Méthode de Monte-Carlo

- Quantum défini par une quantité d'énergie, une direction de propagation (choix aléatoire) :
 $\omega_0 = 2\pi R_\omega$ et $\cos^2\delta_0 = R_\delta$ où $R_i \in]0; 1]$
- Distance d'interaction S_σ : $R_\sigma = \exp\left(-\int_0^{S_\sigma} \sigma ds\right)$
- Nouvelle direction de propagation choisie à partir de :
 $R_\Theta = \frac{1}{2} \int_0^\Theta P(\theta) \sin\theta d\theta$ et $\Phi = 2\pi R_\Phi$

Distances d'interaction

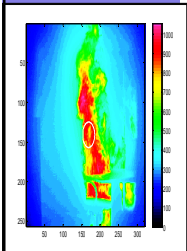
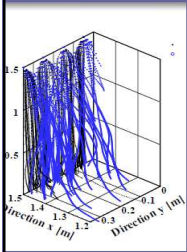
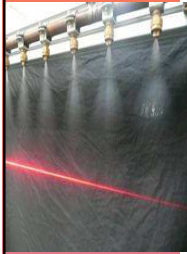
Angle de diffusion

Direction d'incidence

Direction de diffusion

LEMMA UMR CNRS 7563 - Nancy - Université
Pascal Boulet - 6/07/2011
11 / 37

Modélisation et simulation, ce que l'on sait faire (2)



Contexte
Activités rideaux d'eau
Activités feux et caractérisation des flammes
Bilan - Perspectives

Généralités sur les rideaux d'eau
Outil numérique BERGAMOTE
Dispositif expérimental
Exemples de résultats

Propriétés radiatives

- Théorie de Mie pour les gouttes : absorption, diffusion (fortement anisotrope vers l'avant) et fonction de phase (cumulée)
- Modèle C-k pour les gaz H_2O et CO_2 (coefficient d'absorption)
- Additivité simple des coefficients d'absorption des deux phases

Coefficient d'absorption (gaz-gouttes)
Coefficient d'absorption (gouttes)
Coefficient de diffusion

H₂O 1600 cm⁻¹
CO₂ 2325 cm⁻¹
H₂O 3700 cm⁻¹
H₂O 5300 cm⁻¹

Absorption - Diffusion

Fonction de phase cumulée [%]

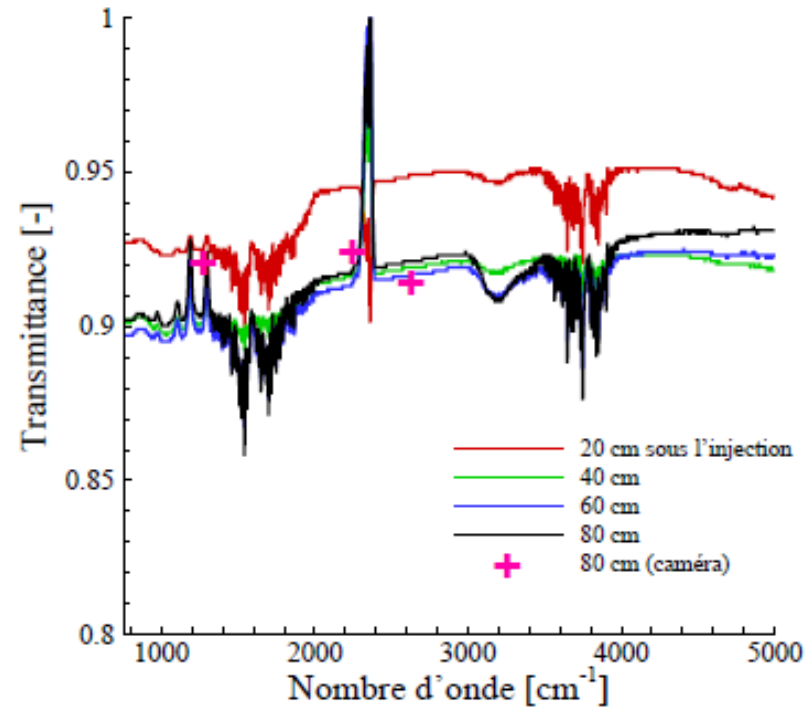
λ = 5 μm

Angle de diffusion [°]

Caractéristiques dynamiques : $F_V = 8,2 \cdot 10^{-5}$ m³ d'eau par m³ d'air ; $D_{32} = 108 \mu m$

LEMMA UMR CNRS 7563 - Nancy - Université
Pascal Boulet - 6/07/2011
10/ 37

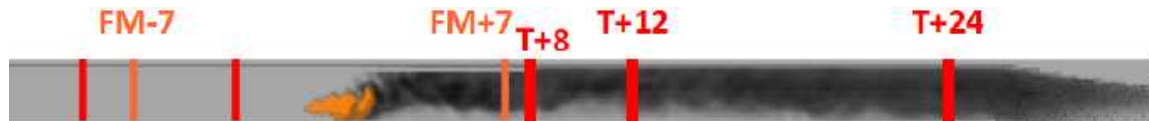
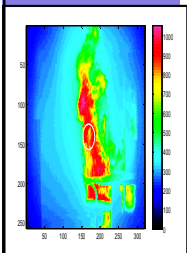
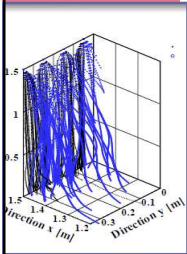
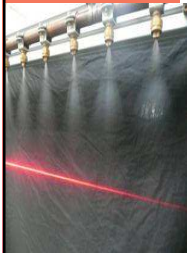
Des effets d'absorption par les gouttes et la vapeur + de la diffusion



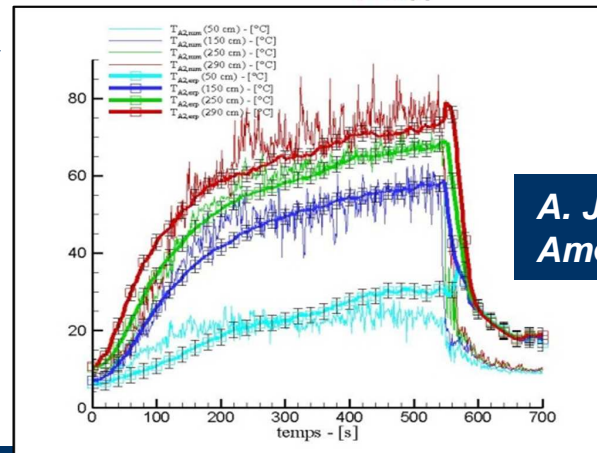
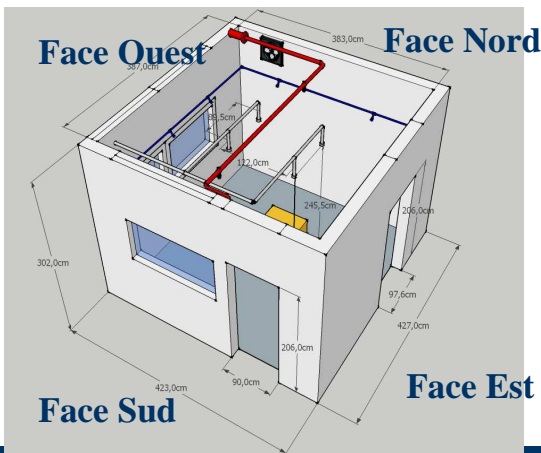
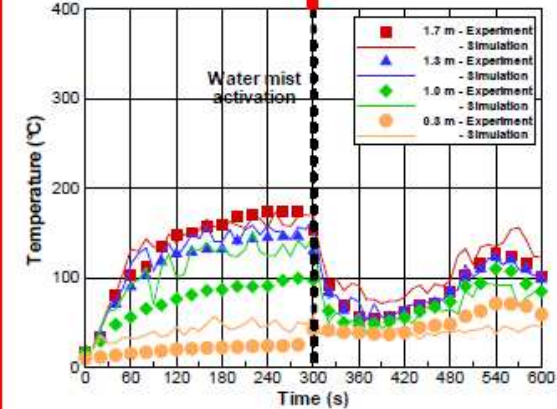
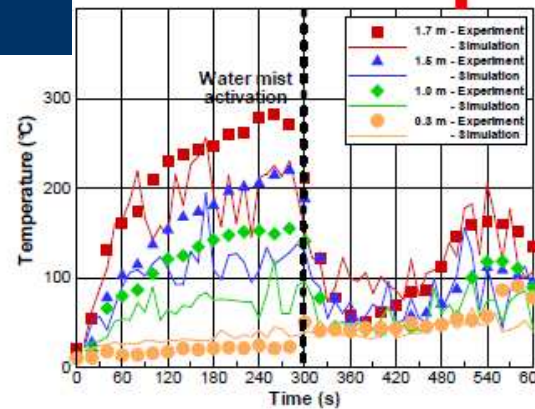
S. Lechêne, des propriétés radiatives à l'atténuation des flux par rideaux d'eau

Modélisation et simulation, ce que l'on sait faire (3)

Brouillard d'eau, des exemples également dans les présentations qui suivent...

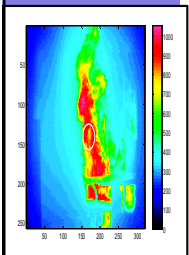
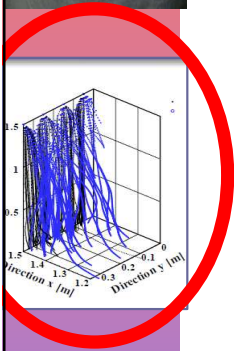
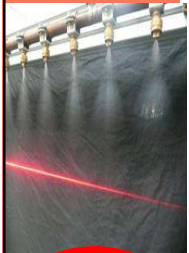


E. Blanchard, 2011, Aspersions en tunnel Interactions B.E. / feu / fumées



A. Jenft, 2013, Extinction dans un local Amélioration des modèles d'extinction

Modélisation et simulation, ce que l'on sait faire (4)



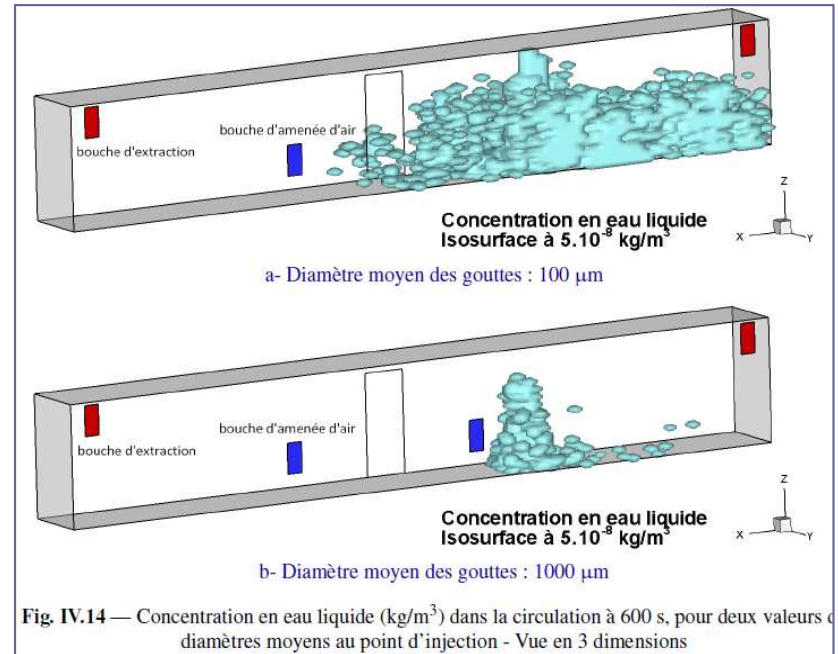
Contexte
Activités rideaux d'eau
Activités feux et caractérisation des flammes
Bilan - Perspectives

Généralités sur les rideaux d'eau
Outil numérique BERGAMOTE
Dispositif expérimental
Exemples de résultats

2. Comparaison de stratégies d'injection

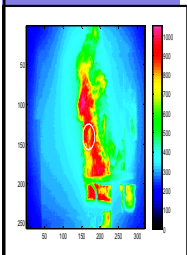
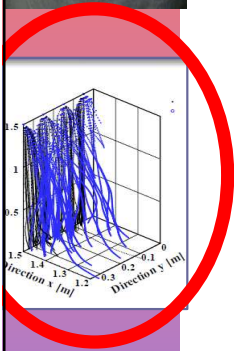
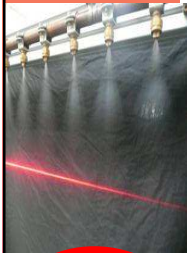
Stratégie	66 μm	271 μm
Descendant	0,88 s	0,26 s
Ascendant	12,19 s	2,68 s
Impactant	4,93 s	2,03 s

LEMTA UMR CNRS 7563 - Nancy - Université | Pascal Boulet - 6/07/2011 | 14/37



On sait prédire l'évolution des gouttes dans l'aspersion

Modélisation et simulation, ce que l'on sait faire (5)

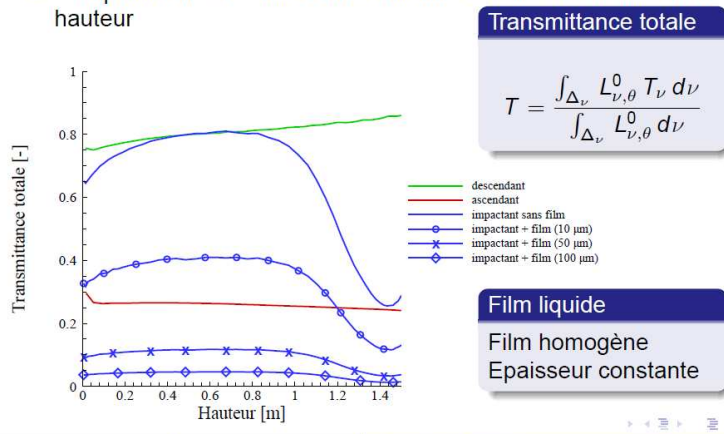


Contexte
Activités rideaux d'eau
Activités lieux et caractérisation des flammes
Bilan - Perspectives

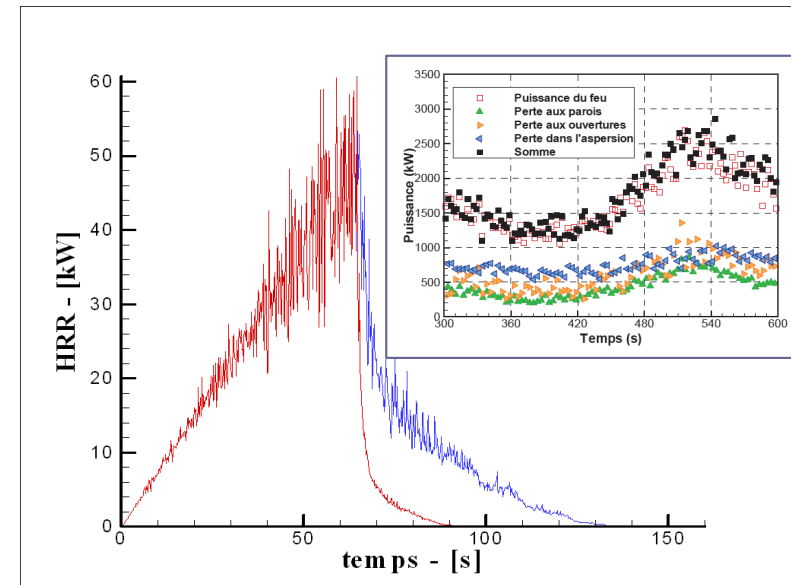
Généralités sur les rideaux d'eau
Outil numérique BERGAMOTE
Dispositif expérimental
Exemples de résultats

Efficacité des stratégies de pulvérisations

- Comparaison en terme de transmittance totale en fonction de la hauteur



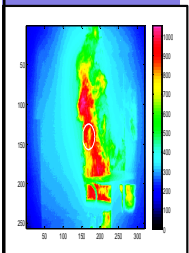
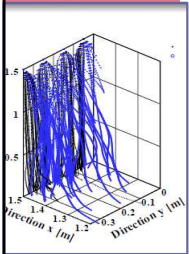
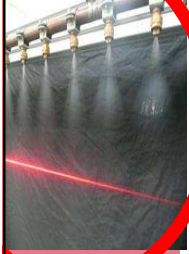
Rôle de la stratégie de pulvérisation dans un rideau d'eau Descendant/ascendant/impactant



Réduction du HRR par aspersion et interprétation des flux échangés

On modélise l'atténuation des flux rayonnés, la réduction de la puissance du feu

Les essais à l'échelle du laboratoire (1)



<p>Contexte Activités rideaux d'eau Activités feux et caractérisation des flammes Bilan - Perspectives</p>	<p>Généralités sur les rideaux d'eau Outil numérique BERGAMOTE Dispositif expérimental Exemples de résultats</p>
---	---

Dispositif expérimental

Des mesures sur l'atténuation de flux par rideaux d'eau.

Exemple typique de rampe

Source radiative
Corps noir étendu de dimensions 30 cm x 35 cm
Température : 773 K

Spectromètre
Inclut un double détecteur MCT-InSb
Analyse le faisceau transmis

Caméra infrarouge
Aide à l'alignement
Données d'atténuations complémentaires

Corps noir étendu

ou

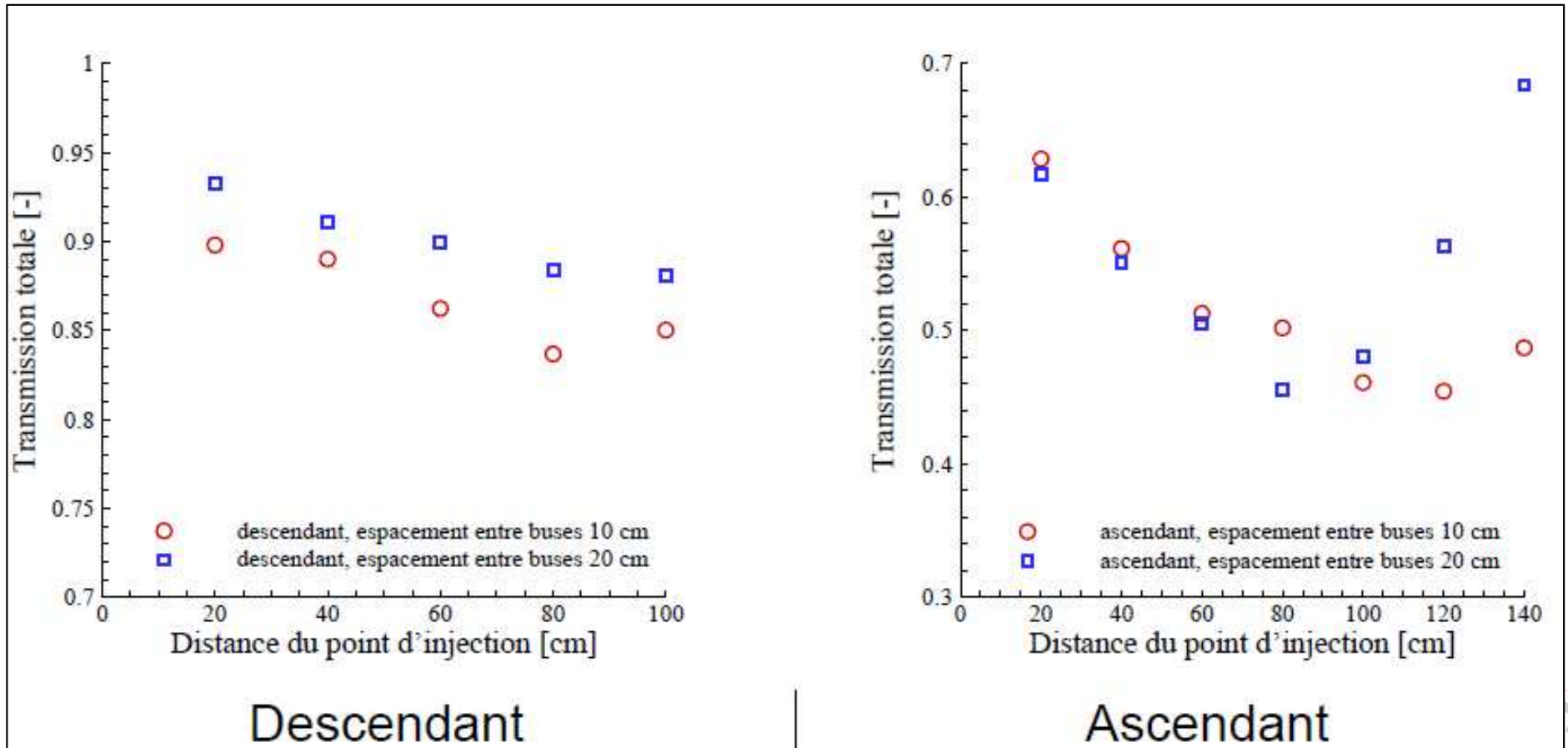
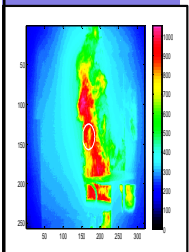
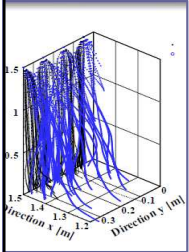
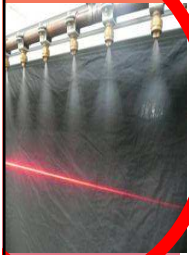
Alimentation en eau

Spectromètre + caméra infrarouge

Infraline

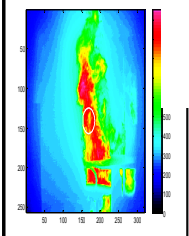
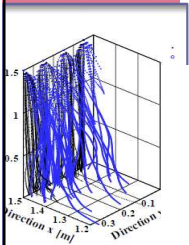
Les essais à l'échelle du laboratoire (2)

Optimisation en terme de débit d'eau, de stratégie d'injection

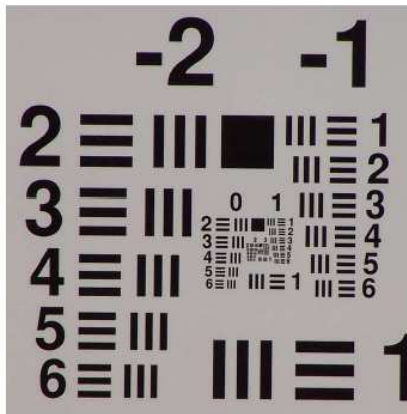


Les essais à l'échelle du laboratoire (3)

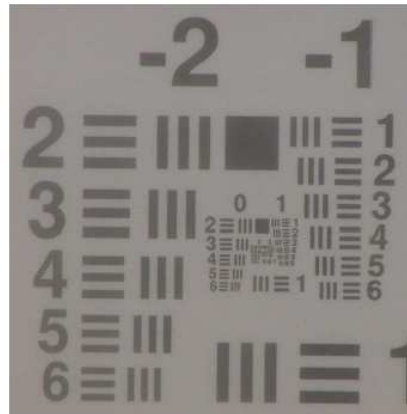
Travaux sur l'opacité et la visibilité



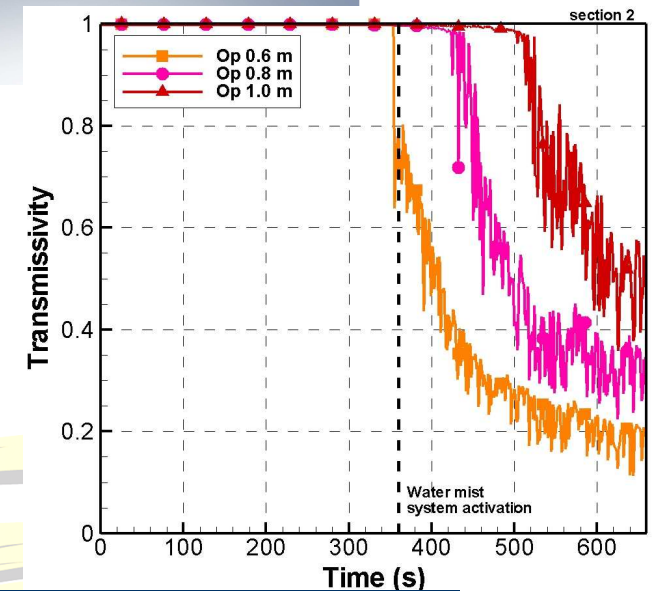
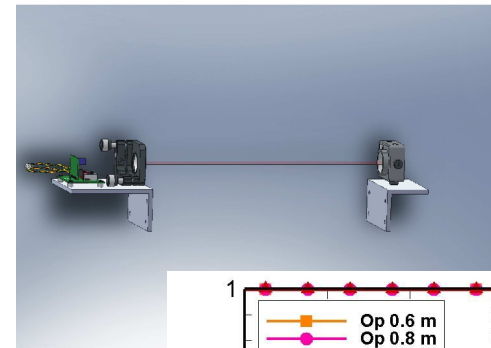
- Photo d'une cible (mire) avec et sans spray
- Configuration ascendante en double rampe (écartement entre rampes et espacements entre buses de 10 cm)
- Milieu fortement diffusant (peu absorbant)



Sans spray



Avec spray



Les essais en grandeur réelle (LEMTA/CNPP)

Sur l'extinction de feux de bacs

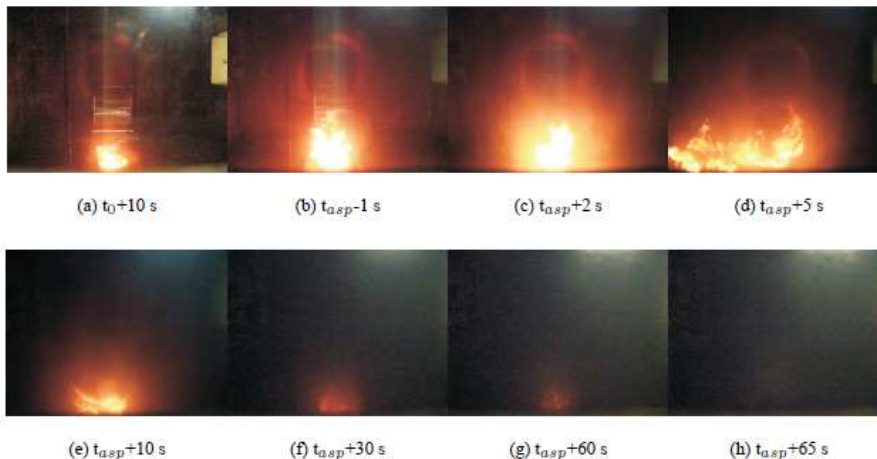


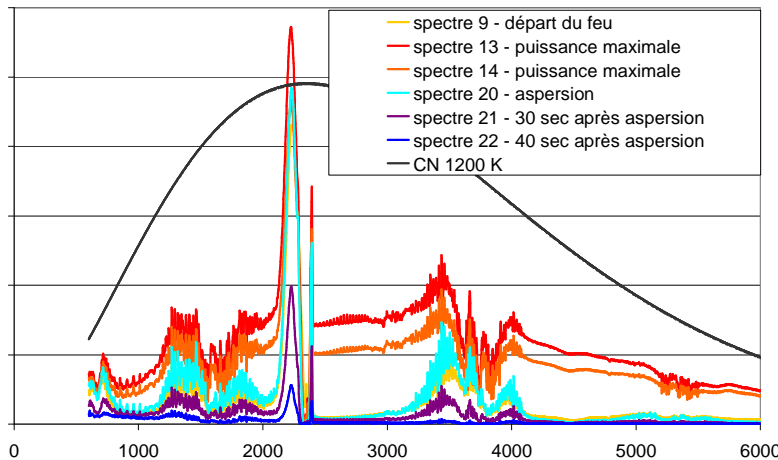
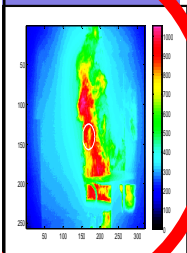
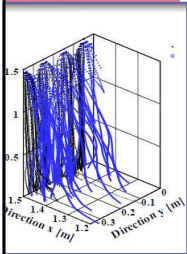
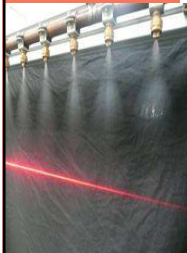
Figure 2: Fire suppression for early application : test ewm_14

Feu de bac (fuel)
en local (CNPP)
Objectif : comprendre et
simuler les effets de
refroidissement de
flamme, d'inertage et de
refroidissement de la
nappe liquide.

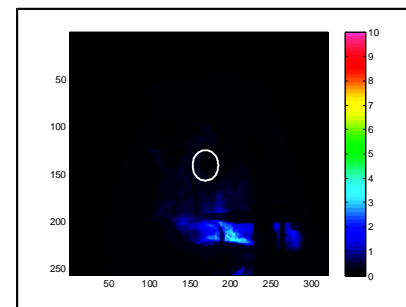
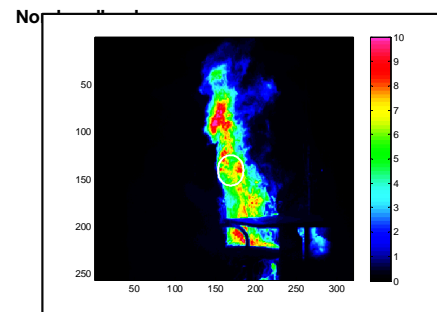
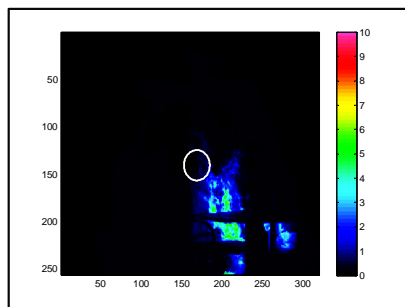
Des phénomènes différents selon les conditions et temps avant aspersion
Injection « tôt » dans un environnement moins chaud... besoin de temps...
Injection dans une environnement chaud (feu développé)... évaporation efficace

Les essais en grandeur réelle (LEMTA/CSTB)

Feux de mobilier dans un local... on retrouve l'idée d'atténuation des flux



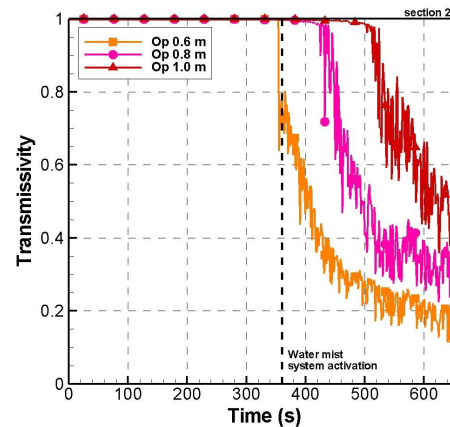
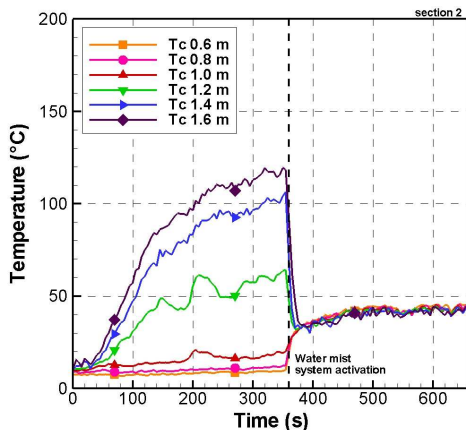
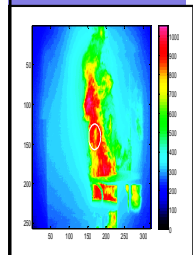
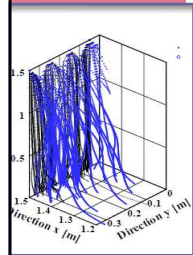
Mobilier en feu, déclenchement du B.E., analyse des csqs sur les flux rayonnés.



L'atténuation observée confirme les simulations... et l'idée de l'intérêt de pulvériser « petit »

Essais en couloir (LEMTA/CSTB)

Etude des interactions aspersion / fumée



Brassage des fumées
... comme attendu...

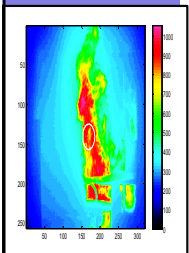
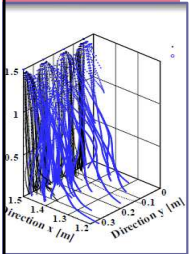
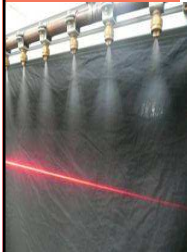
Mais quantifier les effets
en particulier pour le
retour à la stratification

+ évaluer la visibilité

La stratification et la déstratification sont observées sur le plan thermique et optique... avec des différences selon le critère retenu... à approfondir!

Travaux en cours, perspectives...

L'idée de pulvériser des petites gouttes est bonne, le principe fonctionne, reste du travail pour mieux prédire l'action sur le feu et optimiser la technique.



- Amélioration des simulations... 3 exemples...
 - modèle d'évaporation
 - modèles d'extinction
 - module de calcul de visibilité
 (mais aussi travailler sur le feu lui-même, la pyrolyse, ...)
- Poursuivre les essais
 - vers des bases de données
 - comprendre et quantifier les phénomènes
 - module de calcul de visibilité
 (mais aussi travailler sur le feu lui-même, la pyrolyse, ...)
- Optimiser les stratégies d'aspersion (déclenchement, durée, intermittence), les tailles de gouttes et débit...



Remerciements



*Travail réalisé avec le concours de Z. Acem, A. Blaise,
E. Blanchard, A. Collin, S. Gauthier, A. Jenft,
A. Kaemmerlen, S. Lechêne, R. Morlon, G. Parent, ...*



Contact : pascal.boulet@univ-lorraine.fr

