



Expert en prévention  
et en maîtrise des risques



# Etude expérimentale et numérique de l'extinction de feux d'hydrocarbures par brouillard d'eau



Comprendre



Former/Qualifier



Évaluer



Certifier



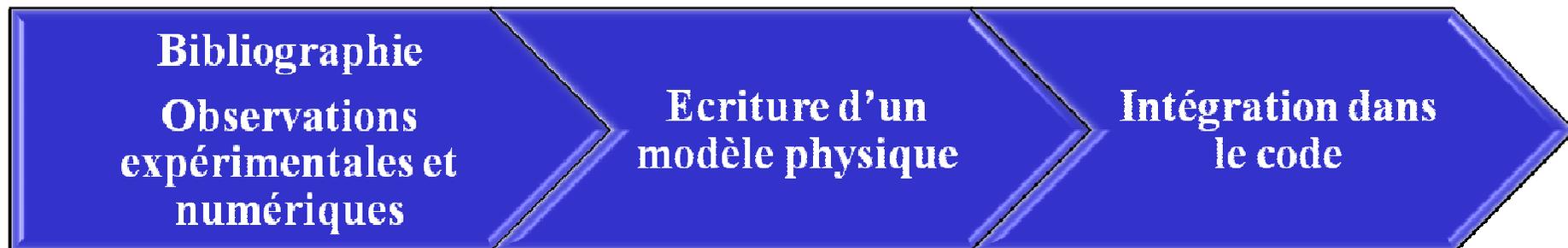
Accompagner



Informer

## Etude des interactions entre phénomènes d'incendie et systèmes d'extinction à eau. Développement d'un module d'extinction dans le logiciel FDS

- Enjeux : caractériser l'extinction par brouillard d'eau et sprinkleur au moyen de FDS
- Caractériser l'influence de chaque grandeur sur le mécanisme d'extinction
- Constituer une base de données expérimentale et numérique à analyser pour perfectionner le modèle d'extinction





## Plan de la présentation

- **Présentation du dispositif expérimental**
- **Résultats expérimentaux**
- **Simulations numériques**
- **Conclusions / perspectives**

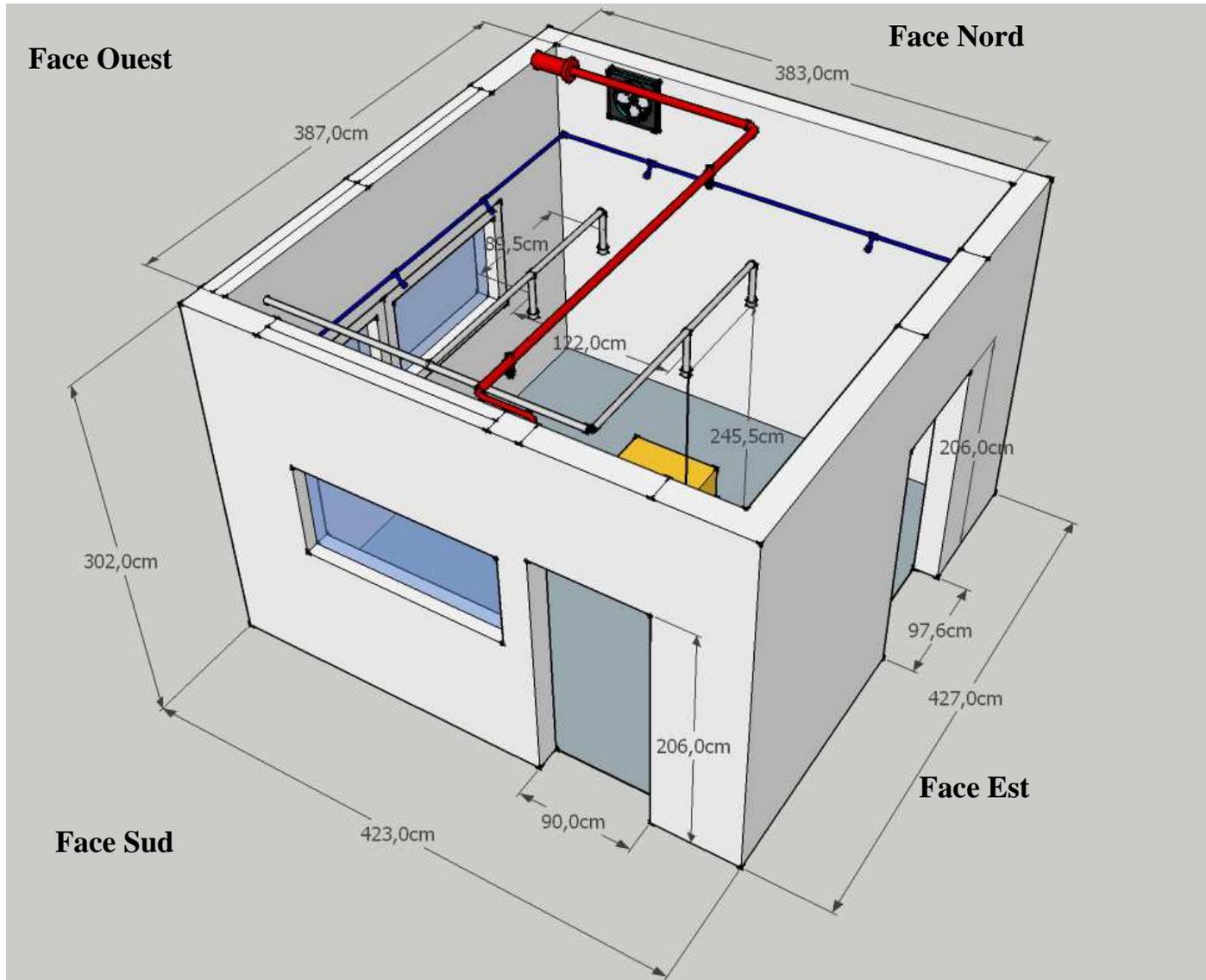


## Mécanismes d'extinction par spray d'eau

- **Refroidissement de la phase gazeuse ;**
- **Privation du foyer en oxygène et dilution des vapeurs de combustible ;**
- **Refroidissement et mouillage de la surface du combustible ;**
  
- **Atténuation du rayonnement de la flamme vers la surface du combustible ;**
- **Effets cinétiques.**

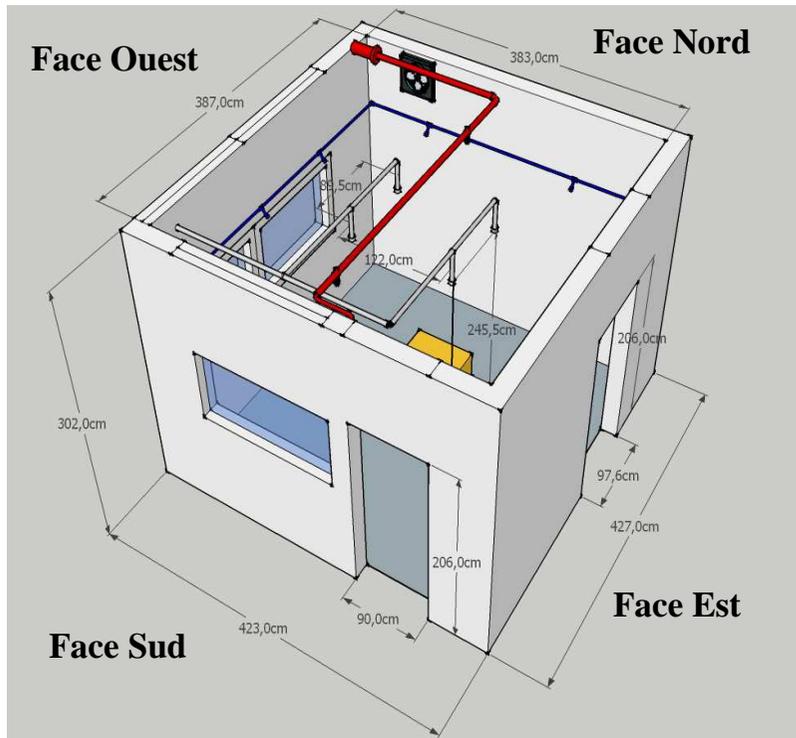


## Dispositif expérimental : local d'essais





## Dispositif expérimental : local d'essais



Murs	Béton, 20cm d'épaisseur.
Plafond	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contreplaqué, 2cm d'épaisseur.</li> <li>• Au centre, 1m<sup>2</sup> de plâtre, 2cm d'épaisseur.</li> </ul>
Autres caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Face Ouest : 2 fenêtres en verre de 1.30m x 0.80m, 5mm d'épaisseur.</li> <li>• Face Est : porte en acier, 3mm d'épaisseur. Volets en partie basse créant une ouverture sur l'extérieur.</li> <li>• Face Sud : porte en verre, 5mm d'épaisseur. Fenêtre en verre de 1.60m x 0.80m, 5mm d'épaisseur.</li> <li>• Face Nord : ventilation contrôlée, débit 0.43m<sup>3</sup>/s, soit un renouvellement horaire de 30h<sup>-1</sup>.</li> <li>• Foyer au centre. Bacs de 25, 35 et 56cm.</li> <li>Combustible : fioul.</li> </ul>



## Dispositif expérimental : instrumentation

Température	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 arbre de 4 thermocouples au dessus du foyer, hauteurs 50cm ,150cm, 250cm et 290cm ;</li><li>• 1 arbre de 4 thermocouples sur la diagonale Nord-Est, hauteurs 50cm ,150cm, 250cm et 290cm ;</li><li>• 2 thermocouples sur les vitres de la face Sud et Ouest</li><li>• 3 en couche haute ;</li><li>• 5 dans le bac à différentes hauteurs.</li></ul>
Composition des gaz	<ul style="list-style-type: none"><li>• Analyseur O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, mesures en extraction.</li></ul>
Débit de pyrolyse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Balance placée sous le bac.</li></ul>
Flux rayonné par la flamme	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fluxmètre orienté vers la flamme.</li></ul>



## Dispositif expérimental : buse de brouillard d'eau

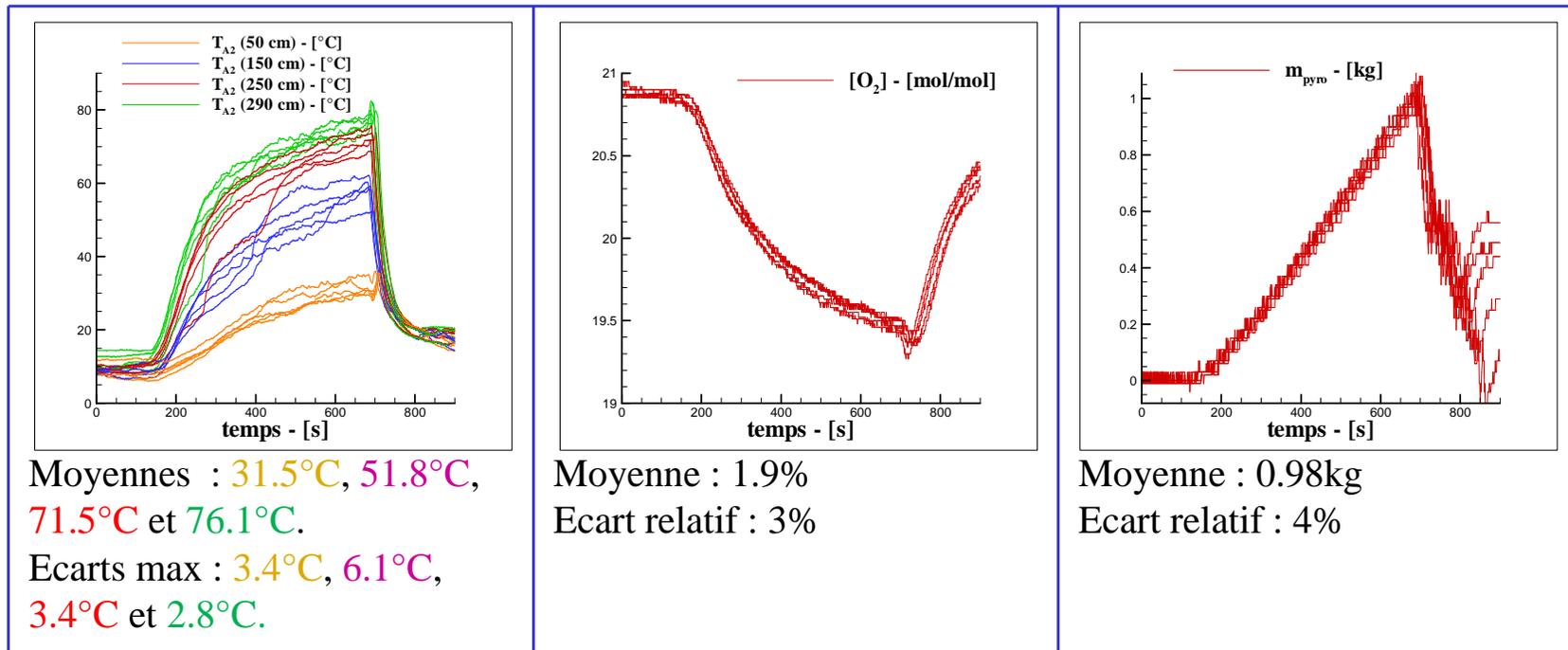
Hauteur	2.45 m
Buse	7 orifices
Pression nominale	10 bar
Débit	6.3 l/min
Angle de projection	130°
D <sub>32</sub>	112 μm
Facteur k	2 l/min/atm <sup>1/2</sup>



## Phase expérimentale : répétabilité

**Objectif :** valider la démarche expérimentale.

**Grandeurs étudiées :** températures dans la phase gazeuse, diminution du taux d'oxygène en extraction, masse totale perdue par pyrolyse.





# Mécanismes d'extinction par spray d'eau

- Cas 1 : extinction très rapide, inertage ?

Temps de déclenchement de l'aspersion :  
 $t_{asp} = 5\text{min}$



$t_0 + 10\text{s}$



$t_0 + 1\text{min}$



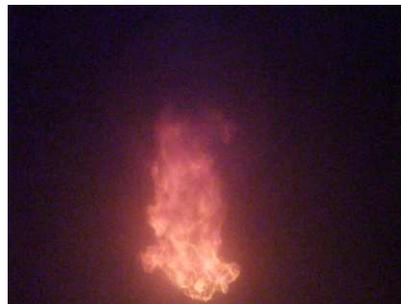
$t_0 + 2\text{min}$



$t_0 + 3\text{min}$



$t_{asp} - 1\text{s}$



$t_{asp} + 2\text{s}$



$t_{asp} + 5\text{s}$



$t_{asp} + 8\text{s}$



$t_{asp} + 10\text{s}$

# Mécanismes d'extinction par spray d'eau

- Cas 2 : processus progressif, refroidissement du combustible ?**

Temps de déclenchement de l'aspersion :  
 $t_{asp} = 1 \text{ min}$



$t_0+10s$



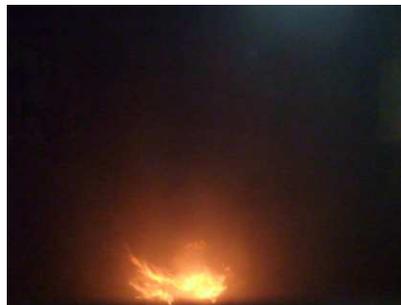
$t_{asp}-1s$



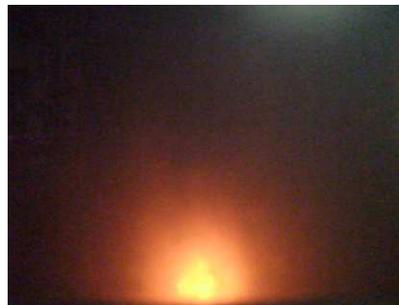
$t_{asp}+2s$



$t_{asp}+5s$



$t_{asp}+10s$



$t_{asp}+20s$



$t_{asp}+30s$



$t_{asp}+60s$



$t_{asp}+65s$



# Phase expérimentale : tableau de résultats

## FIOUL

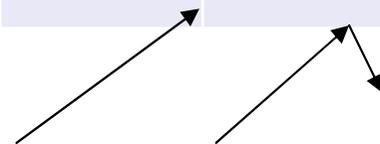
N° essai	N buses	D bac (cm)	T initiale (°C)	t <sub>aspersion</sub> (s)	HRR <sub>aspersion</sub> (kW)	dt <sub>extinction</sub> (s) video	dt <sub>extinction</sub> (s) th. gaz	dt <sub>extinction</sub> (s) th. comb.	Mécanisme d'extinction
7	4	35	8	550	64	18	25		Inertage
13	4	35	12	38	8	40	35	35	Refroid. combustible
14	4	35	11	64	14	65	61	65	Refroid. combustible
16	4	35	10	126	33	10	8	24	Inertage
17	4	35	11	183	51	16	17	61	Inertage
18	4	35	11	301	56	10	15	28	Inertage
19	4	35	10	123	33	8	10	30	Inertage
20	4	35	7	94	31	65	58	78	Refroid. combustible
21	4	35	6	126	34	70	57	78	Refroid. combustible
22	4	35	6	181	51	26	26	58	Inertage



# Phase expérimentale : tableau de résultats

## FIOUL

N° essai	N buses	D bac (cm)	T initiale (°C)	t <sub>aspersion</sub> (s)	HRR <sub>aspersion</sub> (kW)	dt <sub>extinction</sub> (s) video	dt <sub>extinction</sub> (s) th. gaz	dt <sub>extinction</sub> (s) th. comb.	Mécanisme d'extinction
31	4	25	10	38	7	31	29	35	Refroid. combustible
32	4	25	10	64	12	30	30	62	Refroid. combustible
33	4	25	10	99	15	69	71	104	Refroid. combustible
34	4	25	10	128	19	99	108	126	Refroid. combustible
35	4	25	10	186	27	106	95	126	Refroid. combustible
36	4	25	10	305	37	105	103	125	Refroid. combustible
37	4	25	10	544	41	129	131	156	Refroid. combustible
38	4	25	12	1028	42	31	32		Inertage





## Limites d'efficacité d'un brouillard d'eau

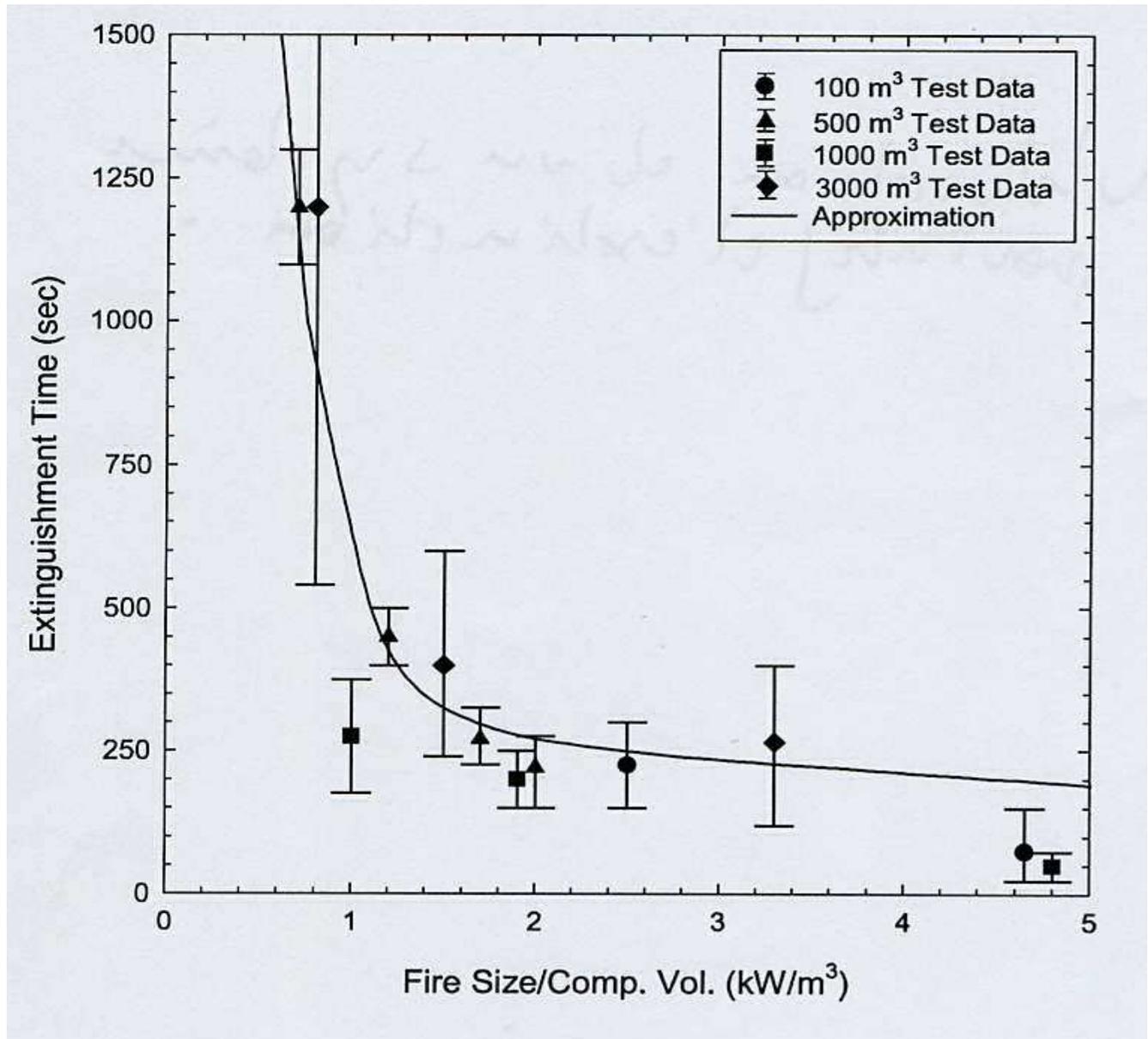
Temps d'extinction  
en fonction du  
rapport

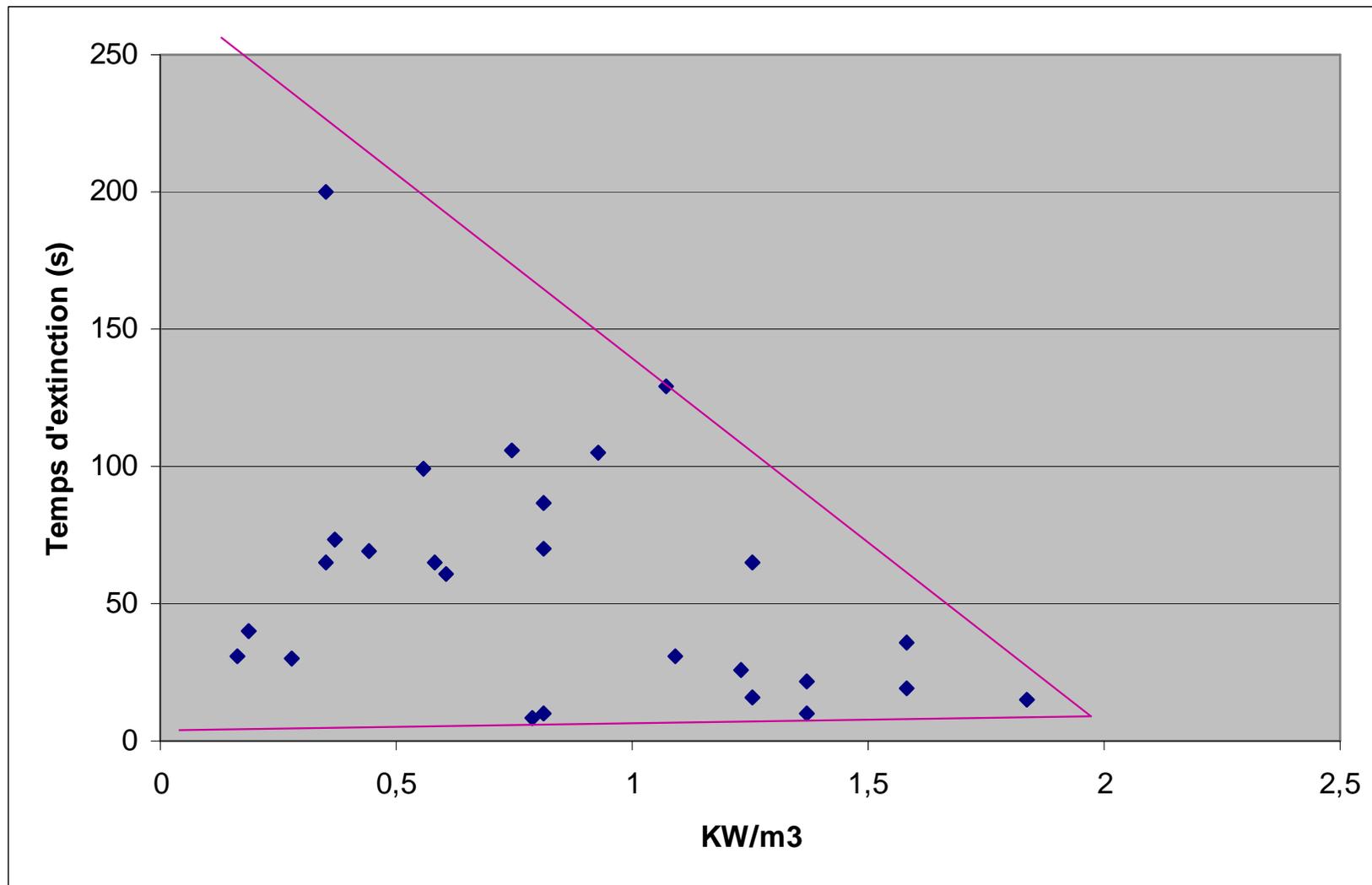
puissance du feu

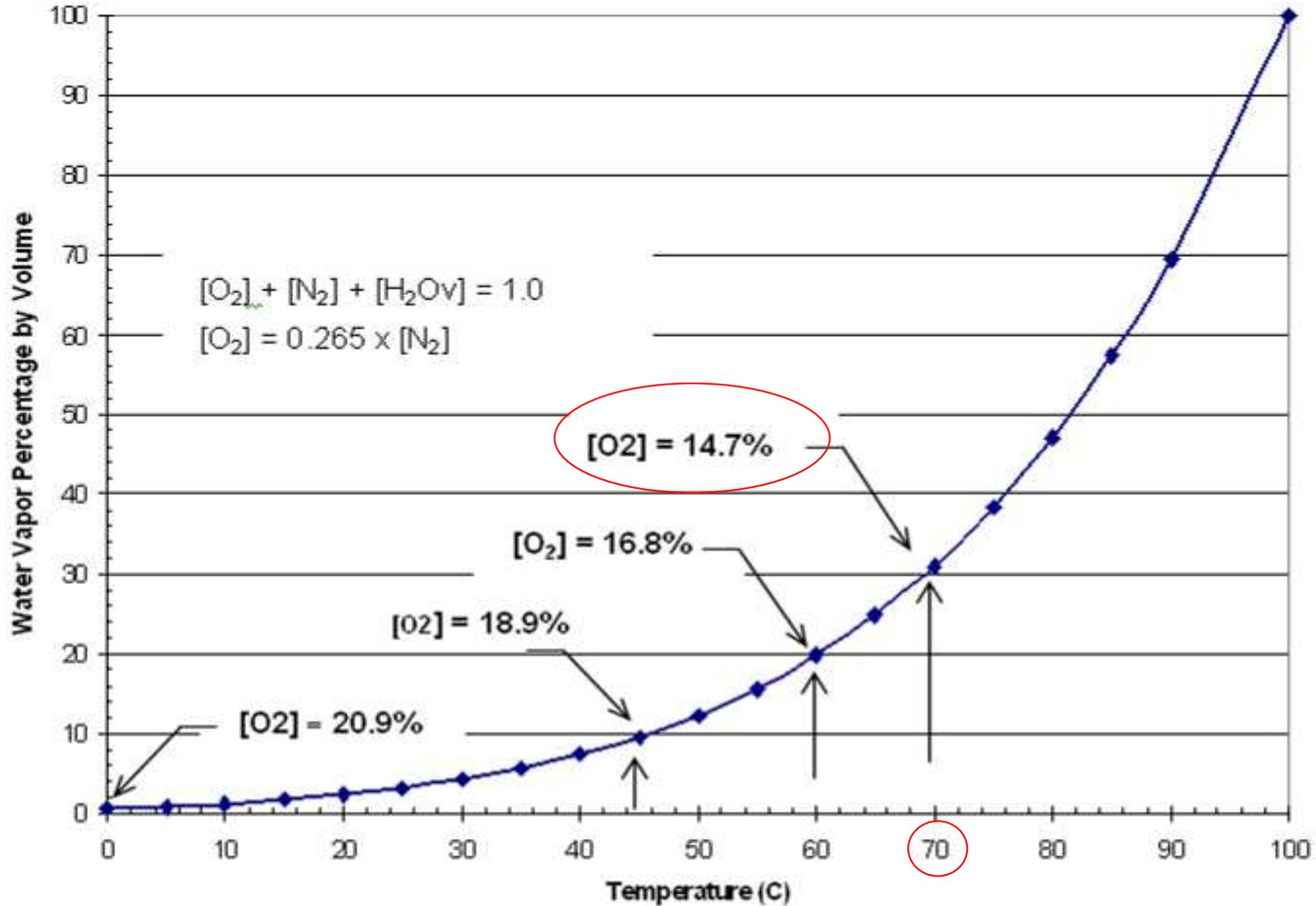
---

volume du  
compartiment

(synthèse essais US)





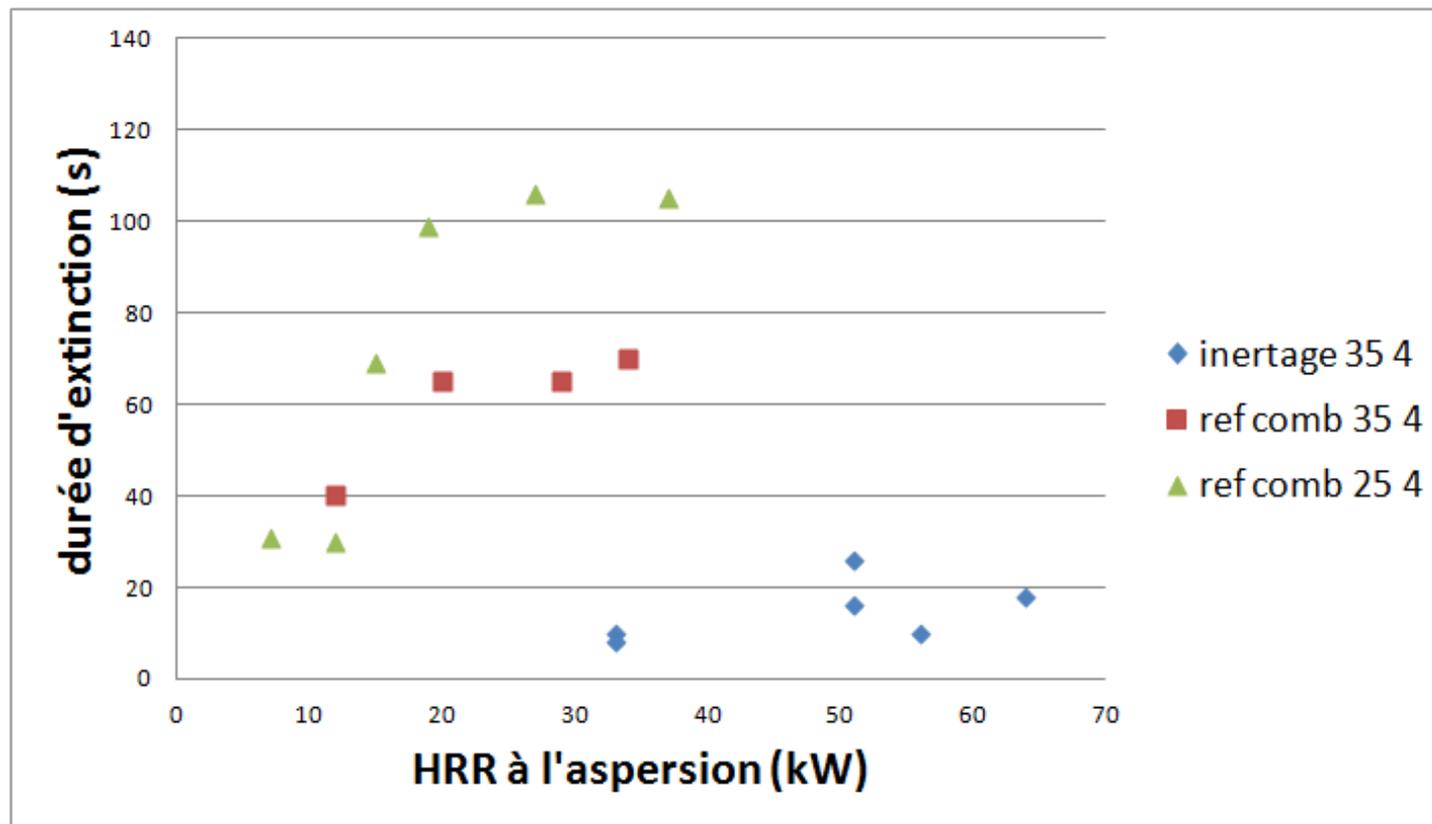


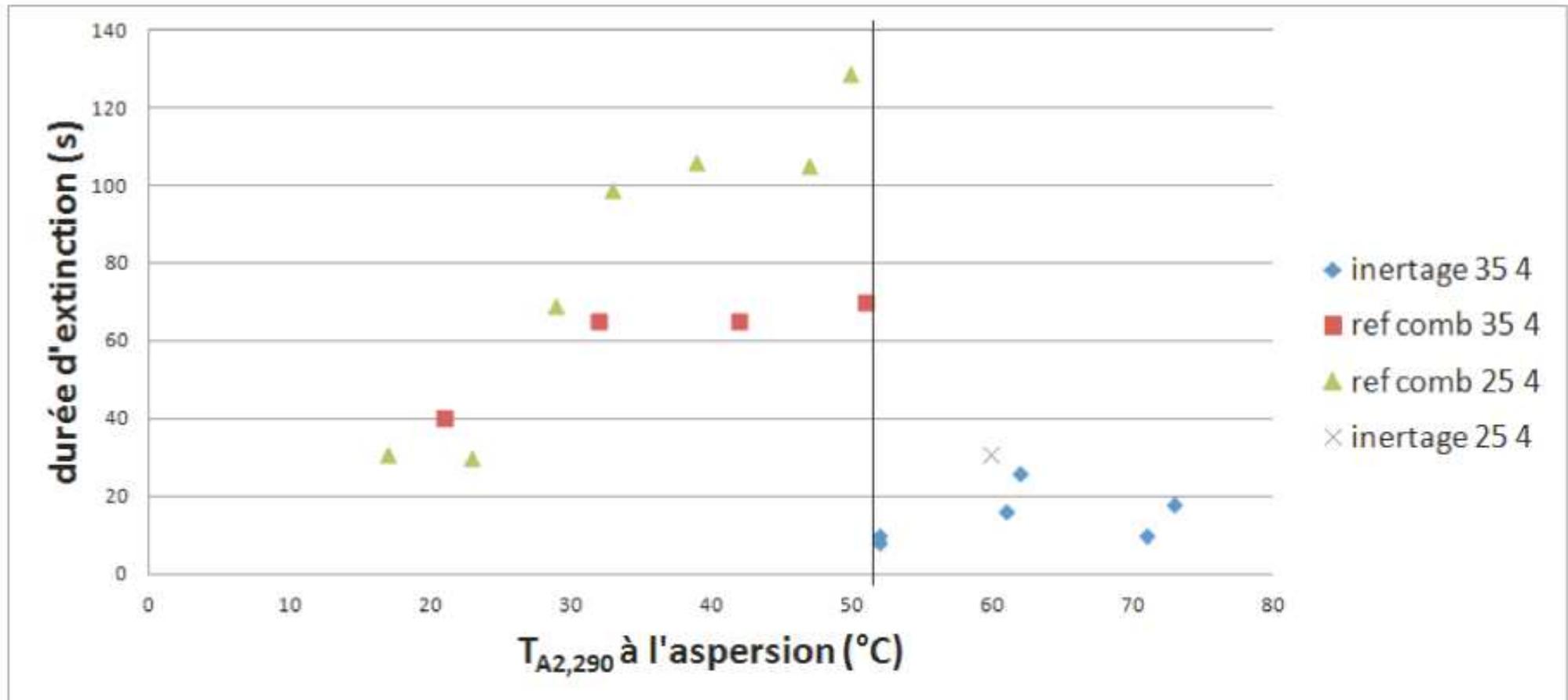


## Avancées sur l'évolution du modèle d'extinction

### Pré-étude : influence des différents termes sur l'extinction – test du modèle actuel

Le HRR à l'aspersion est proportionnel à la température du combustible, au champ de température dans la pièce et au taux d'oxygène en extraction.







# Phase expérimentale : tableau de résultats

## HEPTANE

N° essai	N buses	D bac (cm)	T initiale (°C)	t <sub>aspersion</sub> (s)	HRR <sub>aspersion</sub> (kW)	dt <sub>extinction</sub> (s) video	dt <sub>extinction</sub> (s) th. gaz
39	4	25	18	129	76	282	282
40	4	25	18	124	88	181	177
41	4	25	19	125	84	159	161
42	4	25	19	67	65	254	247
43	4	25	19	64	64	253	250
44	4	25	20	67	50	92	92
45	4	25	21	308	101	11	6
46	4	25	24	304	116	11	6
47	4	25	22	305	118	184	169
48	4	25	24	248	107	7	6
49	4	25	25	244	117	77	77
50	4	25	25	244	110	10	5
51	4	25	25	184	116	-	-
52	4	25	26	185	118	33	33
53	4	25	24	188	131	10	10



## Phase expérimentale : tableau de résultats

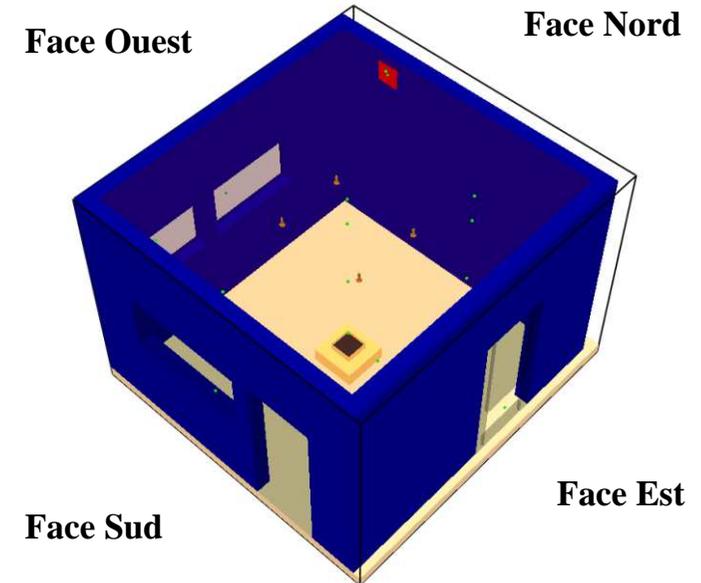
### HEPTANE

- De la même manière que pour les feux de fioul, certains essais font intervenir de manière prépondérante l'effet d'inertage local et de refroidissement de la flamme
- En revanche, certains essais mettent en lumière un mécanisme additionnel : effet dynamique
- Les temps d'extinction sont beaucoup plus dispersés, car liés à une instabilité dynamique qui revêt un caractère aléatoire.



## Phase numérique : présentation de la simulation

Domaine	4.30m x 4.50m x 3.20m. Mailles de 5cm x 5cm x 5cm, soit 495 360 mailles.
Conditions aux limites	Suivant les z inférieurs, mur infini avec continuité du flux. Suivant les autres axes, continuité du flux, l'air extérieur étant considéré à température ambiante.
Température	Initiale : 9°C. Extérieure : 8°C.
Combustion	$\Delta H_c = 42200\text{kJ/kg}$ . Combustible : fioul, identifié par $C_{12}H_{23}$ . RAMP de puissance déterminée d'après les résultats expérimentaux. Bac : 30cm x 30cm x 10cm. Contient une hauteur de 5cm de fioul. $HRRPUA = 670\text{kW/m}^2$ à l'état stationnaire.
Brouillard d'eau	Identique aux données expérimentales.
Métrologie	Identiques à la partie expérimentale.



### Modèle d'extinction

$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,0}'' e^{-\int k(t)dt}$$

$$\text{Aveck}(t) = a m_{p/f}''(t)$$

Où  $a$  est un coefficient empirique. Il est une donnée d'entrée des simulations.



## Phase numérique : bilans de masse et d'énergie

**Objectifs** : quantifier les termes de pertes afin de déduire les phénomènes d'extinction dominants. Pour prendre en compte tous les termes, il est nécessaire d'écrire les bilans pour deux systèmes.

Bilan de masse	Bilan d'énergie
<p style="text-align: center;"><b>Système « flamme + gaz »</b></p> $\dot{m}_g(t) = \dot{m}_{pyro}(t) + \dot{m}_{adv,g}(t) + \dot{m}_{evap}(t)$	<p style="text-align: center;"><b>Système « flamme + gaz »</b></p> $\begin{aligned} \dot{Q}(t) = & \dot{Q}_{conv\_g/w}(t) + \dot{Q}_{ray\_g/w}(t) + \dot{Q}_{adv,g}(t) \\ & + \dot{Q}_{conv\_p/g}(t) + \dot{Q}_{ray\_p/g}(t) + \dot{Q}_{EI,g} \end{aligned}$ <p style="text-align: left; margin-left: 10px;">  <b>HRR</b> </p>
<p style="text-align: center;"><b>Système « gouttes »</b></p> $\dot{m}_p(t) = \dot{m}_{inj}(t) + \dot{m}_{adv,p}(t) - \dot{m}_{evap}(t)$	<p style="text-align: center;"><b>Système « gouttes »</b></p> $\dot{Q}_{evap}(t) + \dot{Q}_{EI,p}(t) = \dot{Q}_{conv\_p/g}(t) + \dot{Q}_{ray\_p/g}(t) + \dot{Q}_{p/w}(t)$



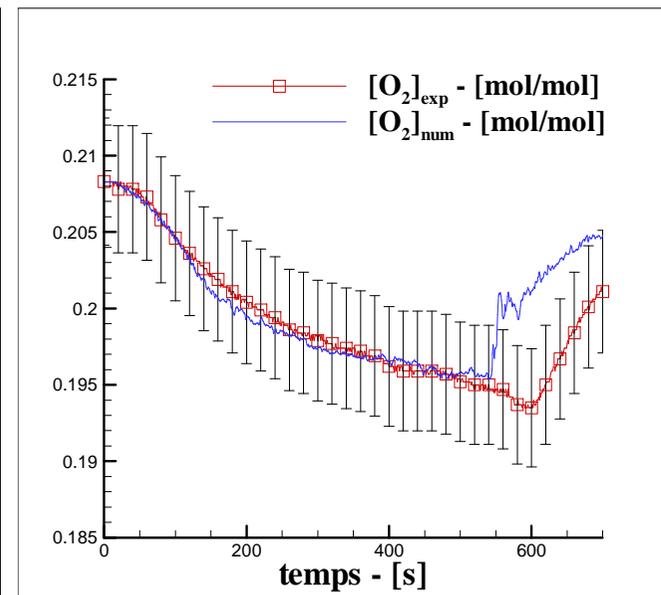
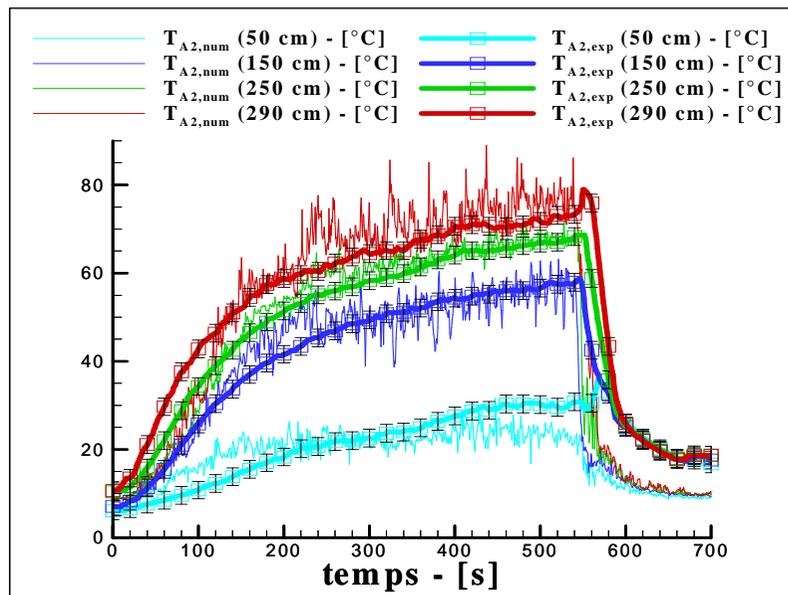
## Comparaison avec l'expérience

**Cas traité :** essai réalisé pour la répétabilité.

**Grandeurs étudiées :** température des gaz et taux d'oxygène en extraction.

**Résultats avant aspersion :**

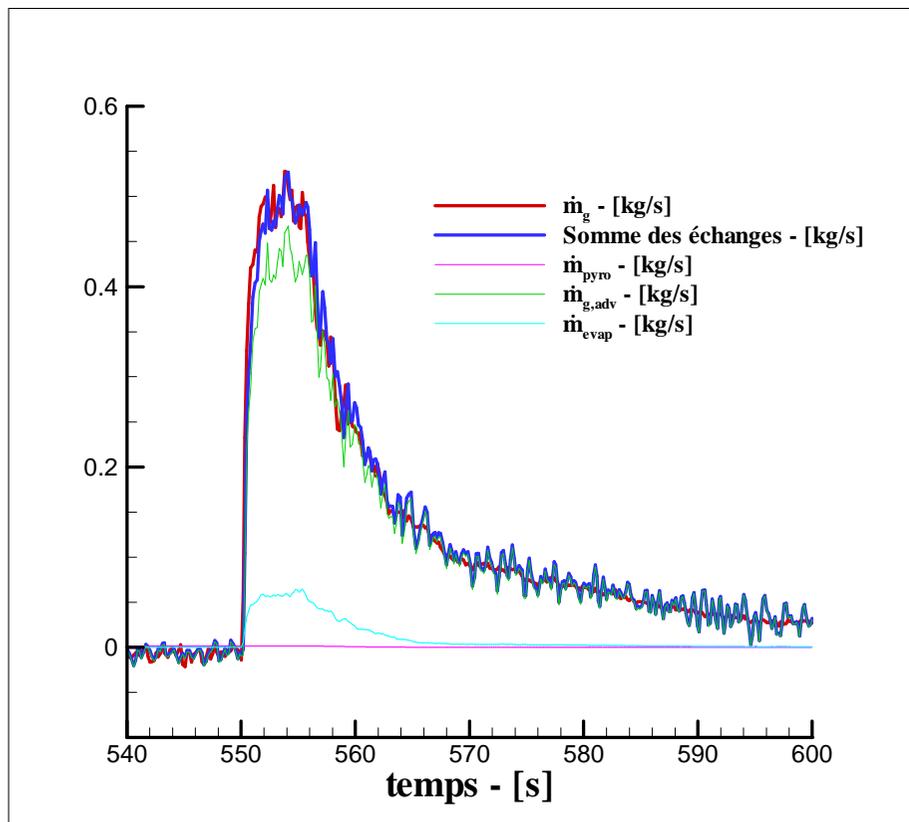
- Très bon accord expérimental/numérique pour  $T(150\text{cm})$ ,  $T(250\text{cm})$  et  $T(290\text{cm})$ , plutôt bon accord pour  $T(50\text{cm})$  ;
- Différence sur la consommation en oxygène de l'ordre de 7%.



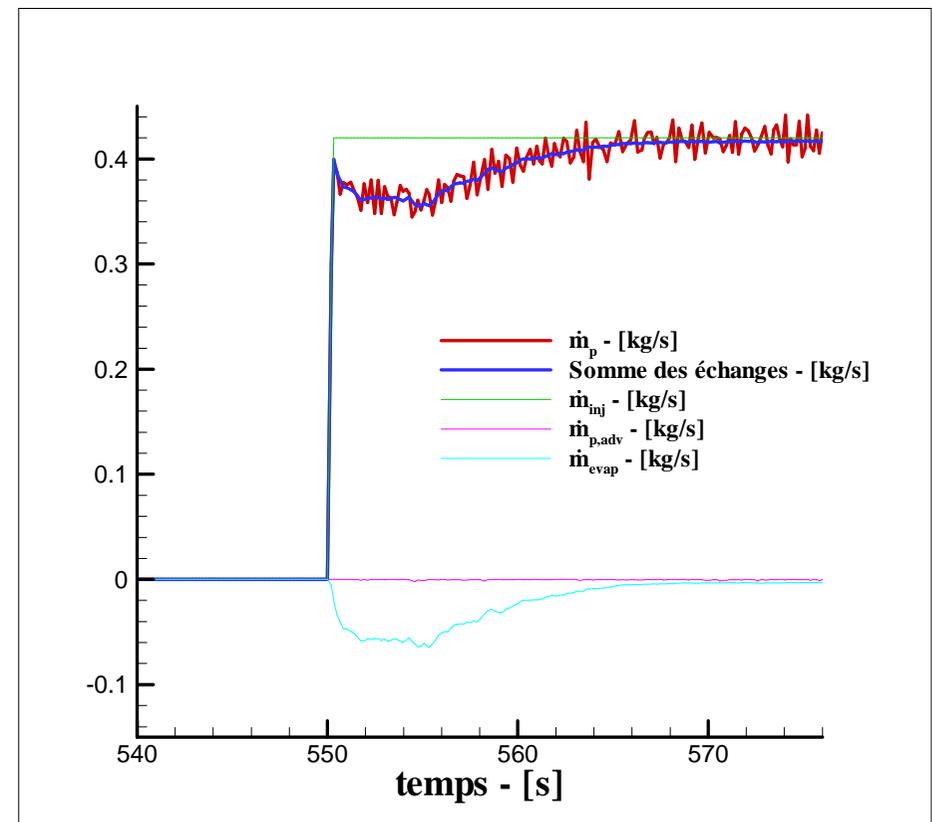


# Bilans de masse essai 7

Système « flamme + gaz »



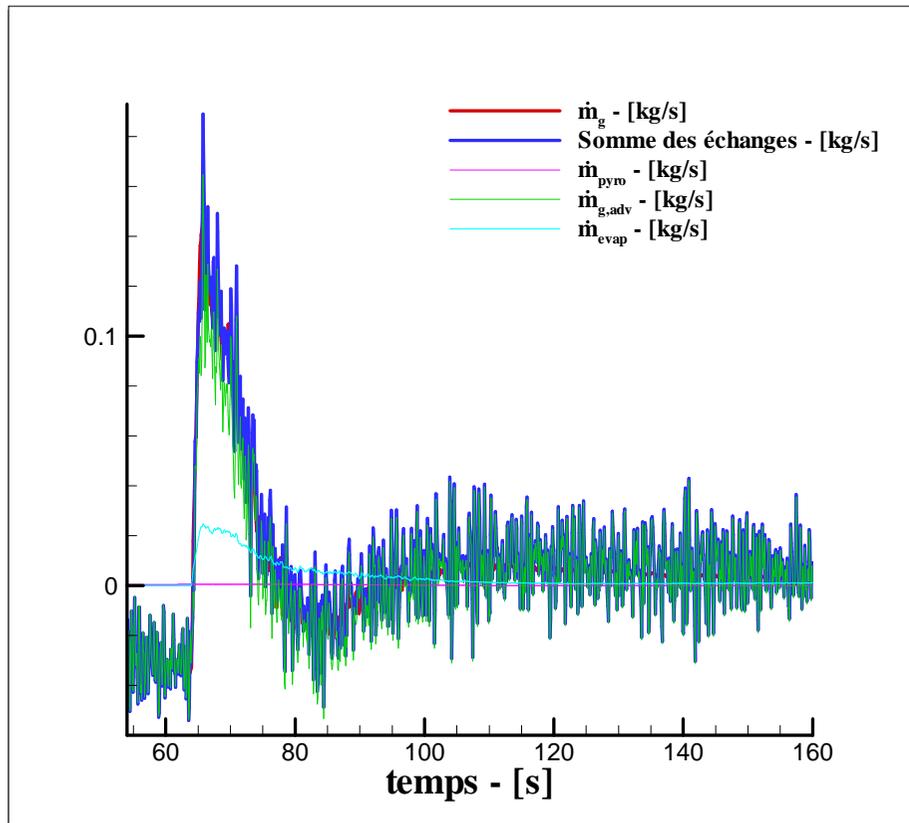
Système « gouttes »



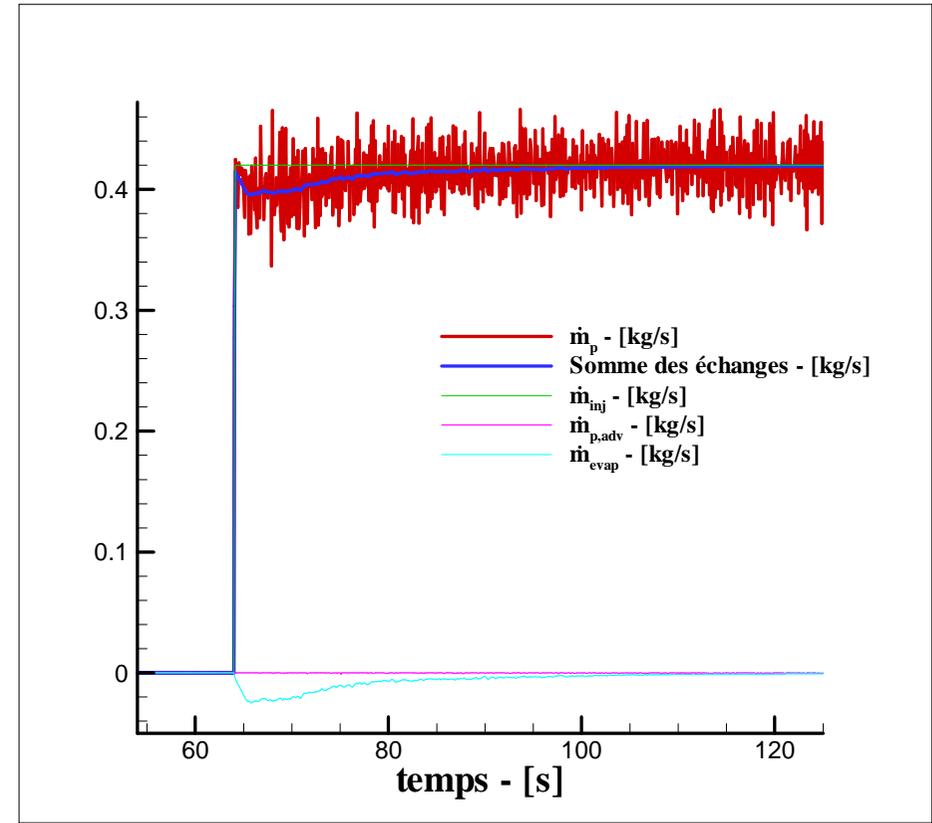


# Bilans de masse essai 14

## Système « flamme + gaz »



## Système « gouttes »

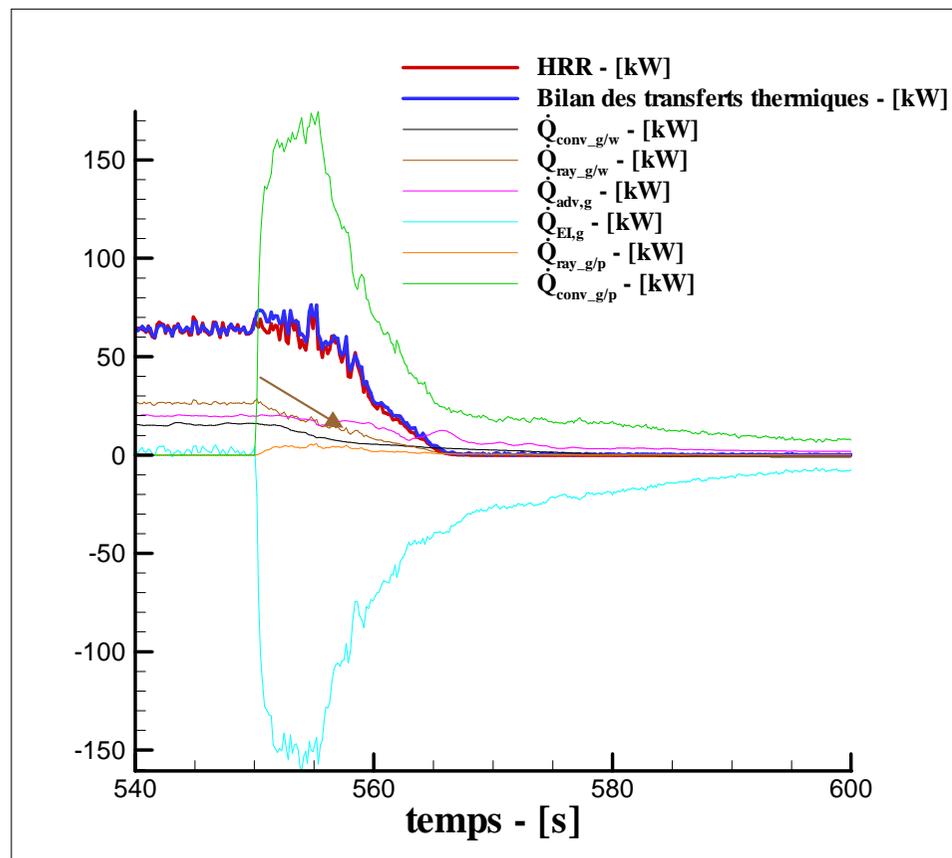




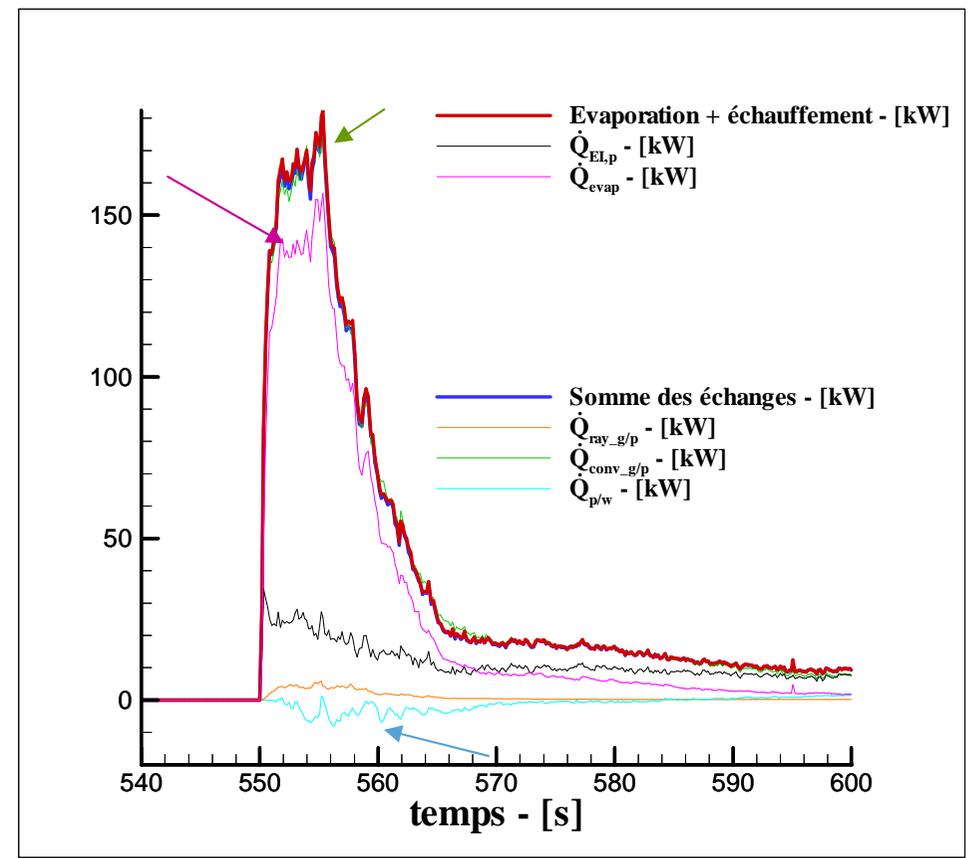
# Phase numérique : bilans d'énergie

Cas traité : ewm 7.

## Système « flamme + gaz »



## Système « gouttes »

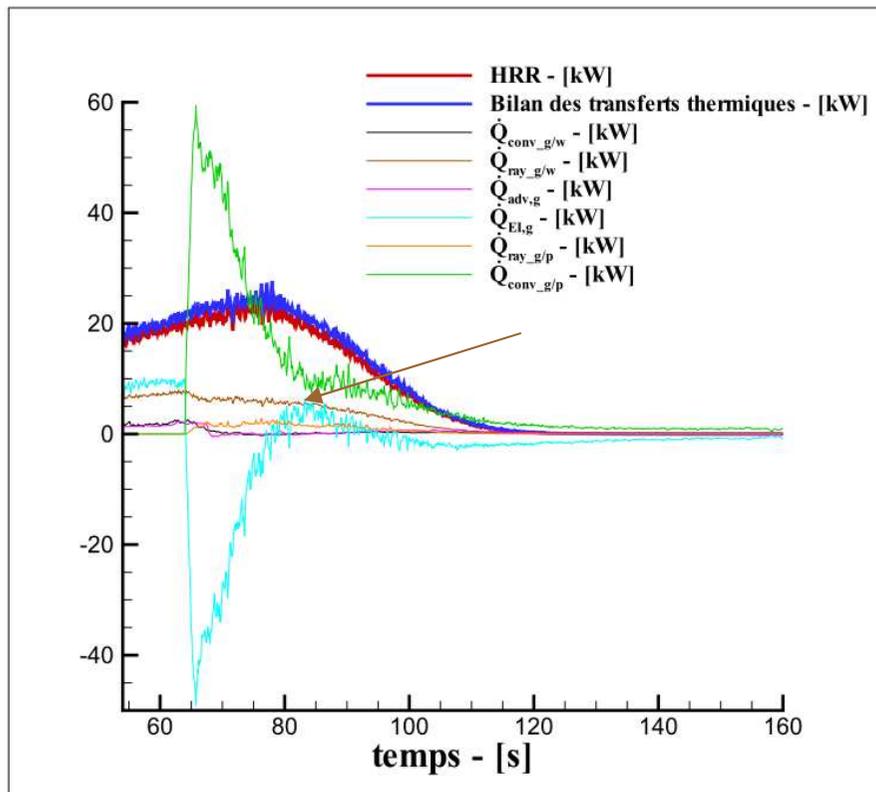




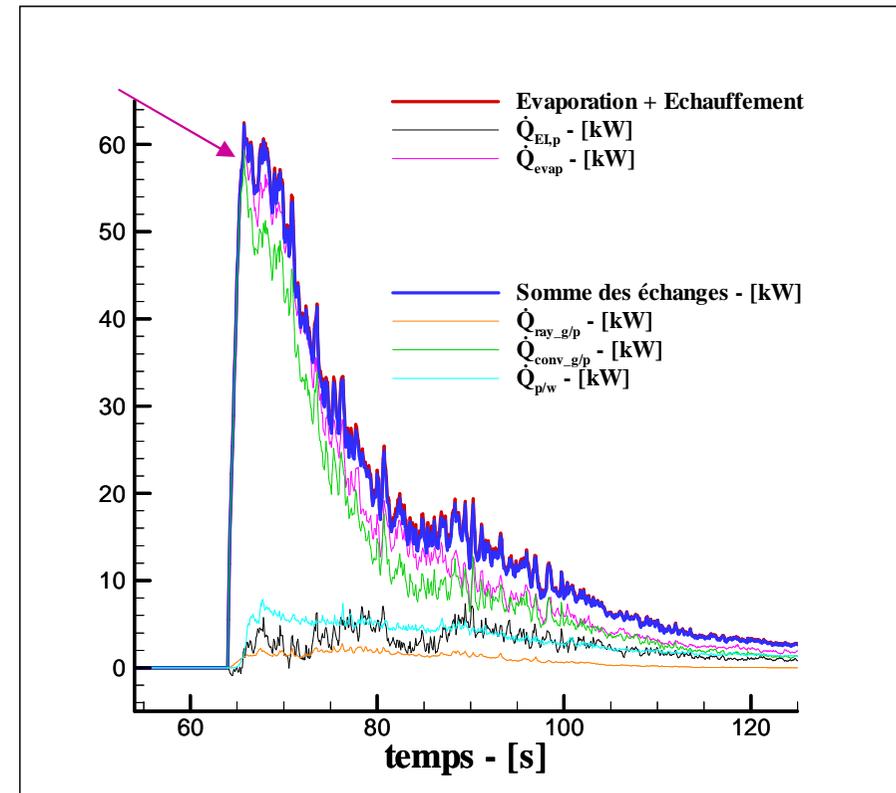
## Phase numérique : bilans d'énergie

Cas traité : ewm 14.

### Système « flamme + gaz »



### Système « gouttes »





## Conclusions

- 70 essais ont été réalisés, permettant de mettre en évidence les différents modes d'action prépondérants dans le mécanisme d'extinction (différents combustibles/différentes tailles bacs/différentes densités d'eau)
- Le dispositif expérimental a été évalué dans sa répétabilité
- L'influence de différents paramètres sur le délai d'extinction a été étudiée.
- Un bon accord a été observé entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques (modèles de combustion)



## Perspectives

- ajustements au code FDS et création d'un nouveau modèle d'extinction, apte à prendre en compte de manière satisfaisante le refroidissement de combustible.
  
- Utilisation du modèle en utilisation prédictive