



**HAL**  
open science

# Reconstruction de l'évolution temporelle de la puissance thermique dégagée par un foyer d'incendie par une méthode d'optimisation

Renato Mole-Antoniazza

## ► To cite this version:

Renato Mole-Antoniazza. Reconstruction de l'évolution temporelle de la puissance thermique dégagée par un foyer d'incendie par une méthode d'optimisation. Thermique [physics.class-ph]. Aix-Marseille Université, 2020. Français. NNT: . tel-03364892

**HAL Id: tel-03364892**

**<https://theses.hal.science/tel-03364892v1>**

Submitted on 5 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École doctorale n° 353 : Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique

## Doctorat AMU

### THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**Aix-Marseille Université**  
Spécialité doctorale "Énergétique"

*présentée et soutenue publiquement par*

**Renato MOLE-ANTONIAZZA**

le 05 Novembre 2020

## **Reconstruction de l'évolution temporelle de la puissance thermique dégagee par un foyer d'incendie par une méthode d'optimisation**

Directeur de thèse : **Fabien CANDELIER**  
Co-directeur de thèse : **Olivier VAUQUELIN**  
Co-encadrant de thèse : **Jean-Luc PAILLAT**

### **Jury**

<b>A. Collin,</b>	Professeur, Université de Lorraine	Rapporteur
<b>P. Carlotti,</b>	Directeur sécurité et prévention des risques, Artelia Bâtiment	Rapporteur
<b>B. Patte-Rouland,</b>	Professeur, Université de Rouen	Examinatrice
<b>T. Beji,</b>	Professeur, Ghent University	Examineur
<b>P. Lardet,</b>	Ingénieur R&D, CSTB	Invité

**Aix-Marseille Université**

**Institut Universitaire Des Systèmes Thermiques et Industriels (IUSTI)**

UMR 7343, Technopôle de Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille, France

---

# Remerciements

Ces travaux ne seraient pas possibles sans l'implication d'une équipe. Je ne peux donc pas débiter ces remerciements sans exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse de l'IUSTI, Fabien Candelier et Olivier Vauquelin ainsi qu'à mon tuteur, Jean-Luc Paillat du LCPP. Merci pour leur passion, leur patience et tout le temps qu'ils m'ont accordé pour ces travaux de thèse. Vous avez su m'orienter lorsque je m'égarais et me motiver en cette année difficile tant par la rédaction que par le contexte sanitaire. Je vous en remercie grandement et vous suis entièrement reconnaissant.

Je remercie Anthony Collin et Pierre Carlotti d'avoir accepté et de rapporter cette thèse. Vos remarques m'ont été utiles et le seront à l'avenir. Je remercie aussi les autres membres du jury, Béatrice Patte-Rouland, Tarek Beji et Paul Lardet de leur présence lors de la soutenance et des échanges que j'ai pu avoir avec eux sur le sujet.

Je remercie une nouvelle fois Pierre Carlotti ainsi que Hervé Bazin, respectivement ancien directeur et ancien chef de pôle MPI au LCPP, qui en 2017, m'ont permis de poursuivre en thèse alors que je n'étais que tout jeune stagiaire. Je ne pourrais être complet sans remercier Aurélien Thiry-Muller, adjoint au chef de pôle MPI et chef de la section SFE qui m'a proposé de poursuivre en thèse, avec qui j'ai pu discuter de l'orientation initiale du sujet et qui a mis à disposition les moyens techniques et humains pour ces travaux.

Ces travaux étant basés sur des données issues d'expériences, rien ne serait alors possible sans une équipe de techniciens de choc. Je veux parler de Delphine Cendra, de Nicolas Dreuille, de Sylvie Dupont et d'Adissa Traoré. Tant dans le froid, l'humidité et la suie de la Briche, ou dans la morte plaine de Saint-Yan, ils m'ont permis de réaliser les essais. Je vous remercie pour votre implication. Cette équipe ne serait pas au complet sans Eddie Faure, Mathieu Suzanne, Jean-François Texier, qui m'ont guidé pour la mise en place des expériences et ont été une oreille attentive quand j'en avais besoin. Je remercie plus largement toutes ces personnes pour leur implication dans ces travaux, leurs conseils, leur disponibilité et tous les moments que nous avons pu passer ensemble. Tout ceci a rendu cette aventure simplement géniale. Je tiens aussi à remercier les autres membres du LCPP que j'ai pu côtoyer au quotidien pour un repas, du sport ou un verre ; pour ne citer qu'eux, Nathalie Gautier, Aurélien Leroy, et Anne Thiry-Muller. Merci à Manel et Giacomo avec qui j'ai pu passer de super moments dès les premiers jours. Merci également aux doctorants de la section, Louis et Etienne. Bon courage et ne lâchez rien. Je remercie aussi tous les stagiaires que j'ai rencontré au sein de la section SFE et avec qui j'ai passé de super moments au laboratoire comme à l'extérieur. J'espère que 2021 nous sera plus clémente et qu'on pourra enfin fêter cette thèse tous ensemble.

J'aimerai remercier toutes les personnes qui ont donné de leur temps pour relire ce manuscrit, leurs commentaires et remarques m'ont guidé dans ce fastidieux travail, et mon encadrement vous le confirmera, je parlais de loin.

Je remercie aussi toutes les personnes, chercheurs, doctorants avec qui j'ai échangé au sein des rencontres du GDR Feu et particulièrement lors des réunions des doctorants.

Cette thèse ne se serait pas aussi bien déroulée sans le soutien de mes proches. Je voudrai tout d'abord commencer par celles qui m'ont supporté durant ma rédaction alors que nous étions confinés tous les trois, Juliette et Lola. On va pouvoir maintenant passer des moments sans in-

terférences rédactionnelles. Je n'oublie certainement pas Lucas, Marie, Pauline, Tom, Reda, mes anciens colocataires ainsi que Caroline et Grégoire qui n'ont pas fait directement parti de cette collocation, mais je ne pourrais les en dissocier. Un grand merci à tous car vous n'êtes pas étrangers au fait que j'ai pu mener cette thèse à son terme et dans de très bonnes conditions. Sans vous, la famille, l'aventure n'aurait pas été aussi belle.

Ma vie parisienne ne pourrait être dissociée de la course à pied et sans mes compères de la Bob Orange Foundation, Math' et Giac, merci les gars. Vous m'avez transmis votre passion pour ce sport. Nous en avons passé du temps, lors de froides journées d'hiver dans les forêts parisiennes, ou dans les cailloux brûlants des trails du Sud. Merci à Kro qui m'a vu débarquer plusieurs dimanches avec de la boue aux chaussures accompagnant Math', ainsi qu'à Adi, Nico, JL et Alann, la Run PP, on le sait entre nous, on l'a gagnée.

J'ai laissé un jour de février 2017 la Bonne Mère derrière moi et je suis monté dans le Nord mais je n'oublie pas mes amis de Marseille. Boris, Vincent, Lucas, Laetitia, Ludivine, Marion, Mehdi, Kesh, Clément, Guillaume, Aurore, Florian, Octavie, Swan, Chloé, Mathieu, les familles Lopez et Lecuziat, sans être exhaustif, merci pour tous les moments qu'on a passé ensemble sur les bancs de la fac comme en dehors. Je pense à ceux et à celles d'entre vous qui êtes encore en thèse, ne lâchez rien.

Je remonte encore en arrière dans le temps et loin dans l'espace. J'ai une pensée émue à toutes les personnes que j'ai laissé derrière moi sur mon caillou du Pacifique Sud, mes amis d'enfance, ma famille et ma marraine. Je pense aussi à tous mes professeurs, instituteurs qui m'ont guidé sur un petit bout de chemin et surtout à toute l'équipe du collège de Havila, Maylis, Michel, François, Yvan pour ne citer qu'eux.

Je ne peux pas terminer ces lignes sans parler de mes parents à qui je dédie ce manuscrit et ces travaux. Vous m'avez fait grandir dans les meilleures conditions possibles. Je vous suis éternellement reconnaissant et j'espère, de là où vous vous trouvez, que vous en êtes fiers.

Je terminerai ces remerciements par souhaiter à toutes les personnes qui entreprennent ce type d'aventure, d'être aussi bien entouré que je l'ai été tant au LCPP que dans la vie privée. Ces travaux sont finalement un travail d'équipe et c'est aussi le leur.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des acronymes</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des symboles</b>	<b>xv</b>
<b>Avant propos</b>	<b>1</b>
<b>1 État de l'art</b>	<b>3</b>
1.1 Quelques notions fondamentales sur la physique du feu . . . . .	4
1.1.1 Grandeurs physiques liées à la production d'énergie . . . . .	4
1.1.2 Mesures expérimentales du débit calorifique . . . . .	6
1.2 Modélisation numérique et pratiques en ingénierie . . . . .	8
1.2.1 Ingénierie du désenfumage . . . . .	8
1.2.2 Expertise post-incendie . . . . .	9
1.3 Résolution de problèmes d'optimisation en incendie . . . . .	10
<b>2 Algorithme itératif d'optimisation pour une reconstruction du terme source</b>	<b>15</b>
2.1 Reconstruction du terme source à partir de mesures simples . . . . .	15
2.1.1 Un problème d'optimisation . . . . .	15
2.1.2 Réduction de l'espace des paramètres . . . . .	17
2.2 Algorithme d'optimisation . . . . .	19
2.2.1 Décomposition de l'espace des paramètres . . . . .	19
2.2.2 Simulation des individus . . . . .	21
2.2.3 Estimation du modèle . . . . .	21
2.2.4 Simulation de la solution pour un intervalle . . . . .	22
2.3 Vérification de l'outil, sensibilité aux paramètres . . . . .	23
2.3.1 Définition des cas de test . . . . .	23
2.3.2 Résultats de la vérification . . . . .	25
<b>3 Application à des foyers prescrits</b>	<b>31</b>
3.1 Description des essais . . . . .	31
3.1.1 Foyers prescrits . . . . .	31
3.1.2 Mesures indirectes . . . . .	34
3.2 Modélisation numérique des essais . . . . .	36
3.2.1 Domaine et géométrie . . . . .	36
3.2.2 Conditions aux limites . . . . .	37
3.2.3 Modélisation des mesures indirectes . . . . .	37
3.3 Résultats de reconstruction du terme source . . . . .	40

3.3.1	Trois phases d'évolution du débit calorifique . . . . .	40
3.3.2	Difficultés supplémentaires . . . . .	49
3.4	Conclusion du chapitre 3 . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Exploitation sur des foyers complexes</b>	<b>61</b>
4.1	Feu d'hydrocarbure en milieu « confiné » . . . . .	61
4.1.1	Présentation de l'essai et de la simulation . . . . .	61
4.1.2	Déroulement de l'essai et résultats de la reconstruction du terme source . . . . .	62
4.2	Feux d'hydrocarbure et d'un chargement solide en milieu « libre » . . . . .	66
4.2.1	Présentation des essais . . . . .	66
4.2.2	Paramétrer le modèle CFD : Fire Dynamics Simulator (FDS) . . . . .	68
4.2.3	Résultats de l'optimisation . . . . .	70
4.3	Discussion sur la reconstruction d'un feu de véhicule . . . . .	77
4.3.1	Présentation de l'essai . . . . .	77
4.3.2	Une première application de OBIWANE . . . . .	78
4.3.3	Un problème plus complexe . . . . .	80
4.4	Conclusion du chapitre 4 . . . . .	84
	<b>Conclusion</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Présentation de deux types de codes numériques en incendie</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Résultats obtenus pour les cas test de vérification</b>	<b>III</b>
<b>C</b>	<b>Éléments techniques complémentaires des essais réalisés</b>	<b>VII</b>
C.1	Données techniques des essais en milieu confiné . . . . .	VII
C.2	Données techniques des essais en champ libre . . . . .	IX
<b>D</b>	<b>Caractéristiques et positions des moyens de mesure</b>	<b>XI</b>
D.1	Caractéristiques des capteurs . . . . .	XI
D.2	Positions des capteurs . . . . .	XII
<b>E</b>	<b>Résultats des reconstruction de terme sources des essais</b>	<b>XV</b>
E.1	Foyers confinés . . . . .	XVI
E.1.1	Foyers prescrits . . . . .	XVI
Scénario 1	. . . . .	XVII
Scénario 2	. . . . .	XIX
Scénario 3	. . . . .	XXI
Scénario 4	. . . . .	XXIII
Scénario 5	. . . . .	XXV
Scénario 6	. . . . .	XXVII
Scénario 7	. . . . .	XXIX
Scénario 8	. . . . .	XXXI
Scénario 9	. . . . .	XXXIII
Scénario 10	. . . . .	XXXV
Scénario 11	. . . . .	XXXVII
Scénario 12	. . . . .	XXXIX
E.1.2	Bac d'hydrocarbure . . . . .	XLII
E.2	Foyers en champ libre . . . . .	XLIV
E.2.1	Bac d'hydrocarbure . . . . .	XLIV
E.2.2	Chargement solide . . . . .	XLIV
E.2.3	Véhicule utilitaire . . . . .	XLV

# Liste des figures

1.1	Trois échelles de foyers . . . . .	4
1.2	Profils de débit calorifique . . . . .	5
1.3	Essai d'un feu de bac pour du diesel . . . . .	6
1.4	Schéma de principe de la calorimétrie par consommation d'oxygène . . . . .	7
1.5	Cône calorimètre et données de sortie . . . . .	7
1.6	Simulation d'un incendie dans un local avec Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) . . . . .	8
1.7	Simulation d'un incendie dans un local avec FDS . . . . .	8
1.8	Résultats d'optimisation d'un feu simulé par un code à champs . . . . .	11
1.9	Résultats d'optimisation d'un feu expérimental . . . . .	12
1.10	Résultats des travaux de [2] . . . . .	13
2.1	Deux évolutions de termes sources . . . . .	16
2.2	Interpolation linéaire du terme source . . . . .	17
2.3	Restriction temporelle du problème . . . . .	18
2.4	Algorithme de la méthode itérative d'optimisation OBIWANE . . . . .	19
2.5	Génération aléatoire sans biais de termes sources et les observables associées . . . . .	20
2.6	Génération quasi-aléatoire et dispersées de terme source et les observables associées . . . . .	20
2.7	Géométrie du cas de test . . . . .	24
2.8	Évolution du terme source . . . . .	24
2.9	Reconstitution de l'évolution du débit calorifique des scénarios de vérification . . . . .	26
2.10	Comparaison entre les cas de test <i>a</i> et <i>d</i> sur la reconstruction des températures . . . . .	27
2.11	Comparaison entre les cas de test <i>a</i> et <i>c</i> sur la reconstruction des températures . . . . .	27
2.12	Comparaison entre les cas de test <i>a</i> , <i>b</i> et <i>e</i> sur la reconstruction des températures . . . . .	28
3.1	Géométrie d'essai . . . . .	32
3.2	Schéma du brûleur au propane . . . . .	32
3.3	Consignes en débit calorifique du brûleur au propane . . . . .	33
3.4	Dispositif d'essai autour du foyer dans le plan(O, <i>x</i> , <i>y</i> ) . . . . .	34
3.5	Dispositif de mesure de la température . . . . .	35
3.6	Dispositif de mesure du flux thermique radiatif . . . . .	35
3.7	Représentation du domaine de calcul des essais calibrés . . . . .	36
3.8	Modélisation du flux thermique en fonction du nombre d'angles solides . . . . .	38
3.9	Déroulement du scénario 1 . . . . .	41
3.10	Principaux résultats obtenus pour le scénario 1 . . . . .	41
3.11	Résultats secondaires obtenus pour le scénario 1 . . . . .	43
3.12	Déroulement du scénario 2 . . . . .	44
3.13	Principaux résultats obtenus pour le scénario 2 . . . . .	45
3.14	Résultats secondaires obtenus pour le scénario 2 . . . . .	45
3.15	Déroulement du scénario 3 . . . . .	47
3.16	Principaux résultats obtenus pour le scénario 3 . . . . .	48
3.17	Résultats secondaires obtenus pour le scénario 3 . . . . .	48

3.18 Déroulement du scénario 7 . . . . .	49
3.19 Principaux résultats obtenus pour le scénario 7 . . . . .	50
3.20 Résultats secondaires obtenus pour le scénario 7 . . . . .	51
3.21 Déroulement du scénario 6 . . . . .	52
3.22 Principaux résultats obtenus pour le scénario 6 . . . . .	53
3.23 Résultats secondaires obtenus pour le scénario 6 . . . . .	54
3.24 Déroulement du scénario 12 . . . . .	55
3.25 Principaux résultats obtenus pour le scénario 12 . . . . .	56
3.26 Résultats secondaires obtenus pour le scénario 12 . . . . .	57
3.27 Profil vertical des observations et des observables sur l'arbre C . . . . .	58
4.1 Photographies du fût et de la balance de pesé du scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	62
4.2 Déroulement du scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	63
4.3 Principaux résultats obtenus pour le scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	64
4.4 Résultats secondaires obtenus pour pour le scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	65
4.5 Site d'essai et hotte calorimétrique de l'entreprise Efectis à Saint-Yan . . . . .	66
4.6 Photographies des deux foyers sous la hotte calorimétriques . . . . .	67
4.7 Représentation des foyers et des fluxmètres sous la hotte calorimétrique . . . . .	68
4.8 Représentation du domaine de calcul des essais de Saint-Yan . . . . .	69
4.9 Déroulement de l'essai du scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre . . . . .	71
4.10 Principaux résultats obtenus pour le scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre . . . . .	72
4.11 Résultats annexes obtenus pour le scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre . . . . .	72
4.12 Déroulement de l'essai du scénario de chargement solide en milieu libre . . . . .	74
4.13 Principaux résultats obtenus pour le scénario de chargement solide en milieu libre . . . . .	75
4.14 Résultats annexes obtenus pour le scénario de chargement solide en milieu libre . . . . .	75
4.15 Photographies du VUL et de son chargement . . . . .	77
4.16 Représentation du foyer de VUL et des fluxmètres dans la hotte calorimétrique . . . . .	78
4.17 Principaux résultats obtenus pour le scénario de feu d'un véhicule . . . . .	79
4.18 Déroulement de l'essai du scénario de feu de véhicule . . . . .	81
4.19 Modèle de propagation possible du feu de VUL . . . . .	82
B.1 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>a</i> . . . . .	IV
B.2 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>b</i> . . . . .	IV
B.3 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>c</i> . . . . .	V
B.4 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>d</i> . . . . .	V
B.5 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>e</i> . . . . .	VI
B.6 Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario <i>f</i> . . . . .	VI
E.1 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 1 . . . . .	XVII
E.2 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 1 . . . . .	XVIII
E.3 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 2 . . . . .	XIX
E.4 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 2 . . . . .	XX
E.5 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 3 . . . . .	XXI
E.6 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 3 . . . . .	XXII
E.7 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 4 . . . . .	XXIII
E.8 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 4 . . . . .	XXIV
E.9 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 5 . . . . .	XXV
E.10 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 5 . . . . .	XXVI
E.11 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 6 . . . . .	XXVII
E.12 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 6 . . . . .	XXVIII
E.14 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 7 . . . . .	XXIX
E.13 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 7 . . . . .	XXX

E.16 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 8 . . .	XXXI
E.15 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 8 . . . . .	XXXII
E.18 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 9 . . .	XXXIII
E.17 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 9 . . . . .	XXXIV
E.20 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 10 . .	XXXV
E.19 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 10 . . . . .	XXXVI
E.22 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 11 . .	XXXVII
E.21 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 11 . . . . .	XXXVIII
E.24 Résultat de la reconstruction du terme source par OBIWANE pour le scénario 12 . .	XXXIX
E.23 Évolution de l'ambiance thermique du scénario 12 . . . . .	XL
E.25 Évolution de l'ambiance thermique du scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	XLII
E.26 Principaux résultats obtenus pour le scénario « hydrocarbure confiné » . . . . .	XLIII
E.27 Principaux résultats obtenus pour le scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre . . . . .	XLIV
E.28 Principaux résultats obtenus pour le scénario du chargement solide en milieu libre .	XLIV
E.29 Principaux résultats obtenus pour le scénario du véhicule en milieu libre . . . . .	XLV



# Liste des tableaux

1.1	Tableaux de résumé des résultats des travaux de [2]	13
1.2	Travaux abordés en résolution des problèmes d'optimisation (sens d'apparition)	14
2.1	Paramètres principaux de la méthode OBIWANE	23
2.2	Cas de test et valeurs des paramètres de la méthode	25
2.3	Valeurs optimales des paramètres de OBIWANE	29
3.1	Plan d'expérience des essais avec le foyer prescrit	39
3.2	Résultats de la reconstitution de six scénarios des essais avec le foyer prescrit	59
4.1	Résultats de la reconstitution du scénario « hydrocarbure confiné »	65
4.2	Résultats de la reconstitution des foyers « hydrocarbure » et « solide » de Saint-Yan	76
B.1	Rappel des cas de test utilisés pour vérifier OBIWANE	III
C.1	Caractéristiques de la géométrie d'essai	VIII
C.2	Matériaux des parois du caisson	VIII
C.3	Matériaux du site d'essai de Saint Yan	IX
C.4	Compositions du foyer d'assemblage de palettes de Saint Yan	IX
C.5	Propriétés physique du diesel[14]	IX
D.1	Principales caractéristiques des appareils de mesures	XI
D.2	Coordonnées des arbres de thermocouples	XII
D.3	Coordonnées des fluxmètres autour du foyer central	XII
D.4	Coordonnées des fluxmètres autour foyer en coin	XIII
D.5	Coordonnées des fluxmètres autour du foyer « hydrocarbure »	XIII
D.6	Coordonnées des fluxmètres autour du foyer « solide » de Saint-Yan	XIII
D.7	Coordonnées des fluxmètres autour du foyer VUL de Saint-Yan	XIV
E.1	Plan d'expérience des essais avec le foyer prescrit	XVI



# Liste des acronymes

**ATG** Analyseur thermogravimétrique.

**BR** Brique réfractaire.

**BSPP** Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris.

**CFAST** Consolidated Model of Fire and Smoke Transport.

**CFD** Computational Fluid Dynamics.

**CP** Contre-plaqué.

**CTICM** Centre Technique Industriel de la Construction Métallique.

**ERP** Établissement Recevant du Public.

**FDS** Fire Dynamics Simulator.

**FS** Feutre de silice.

**HRR** Heat Release Rate.

**LCPP** Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris.

**MLR** Mass Loss Rate.

**NIST** National Institute of Standards and Technology.

**OBI** Optimisation Base Iterative Workflow for A Numerical Experiment.

**PC** Poste de contrôle.

**PCI** Pouvoir calorifique inférieur.

**PCS** Pouvoir calorifique supérieur.

**PE-hd** Polyéthylène Haute Densité.

**RCT** Room Corner Test.

**SBI** Single Burning Item.

**TI** Toile ignifugée.

**TR** Tissu réfractaire.



# Liste des symboles

- $a$  Coefficient directeur d'une droite.
- $\alpha$  Taux de croissance du débit calorifique :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-5}] \equiv [\text{kW.s}^{-2}]$ .
- $\beta$  Pas de descente.
- $\Delta$  Variation.
- $d$  Diamètre : [m].
- $D^*$  Diamètre du feu adimensionné.
- $D_m$  Débit massique :  $[\text{kg.s}^{-1}]$ .
- $D_v$  Débit volumique :  $[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$ .
- $\Delta_x$  Taille de maille : [m].
- $E$  Énergie :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}] \equiv [\text{kJ}]$ .
- $\eta$  Résidus.
- $E_{th}$  Facteur de Thornton  $\approx 13.1$   $[\text{kJ.gO}_2^{-1}]$ .
- $e$  Émissivité.
- $g$  Accélération de la pesanteur :  $[\text{m.s}^{-2}]$ .
- $h$  Coefficient convectif :  $[\text{kg.s}^{-3}.\text{K}^{-1}] \equiv [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$ .
- $\Delta H_c$  Enthalpie de combustion :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}] \equiv [\text{kJ.kg}^{-1}]$ .
- $\chi_r$  Fraction radiative.
- $L$  Longueur : [m].
- $\lambda$  Conductivité thermique :  $[\text{kg.m.s}^{-3}.\text{K}^{-1}] \equiv [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ .
- $m$  Masse : [kg].
- $\dot{m}$  Vitesse de perte de masse :  $[\text{kg.s}^{-1}]$ .
- $\nabla$  Gradient.
- $O$  À l'ordre.
- $P$  Pression :  $[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}] \equiv [\text{Pa}]$ .
- $\Phi$  Flux thermique :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}] \equiv [\text{kW}]$ .
- $\dot{Q}$  Débit calorifique :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}] \equiv [\text{kW}]$ .
- $\dot{Q}_c$  Part convectée du débit calorifique :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}] \equiv [\text{kW}]$ .
- $\dot{Q}_r$  Part rayonnée du débit calorifique :  $[\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}] \equiv [\text{kW}]$ .

$r$  Vitesse de propagation horizontale de la flamme : [m.s<sup>-1</sup>].

$r_p$  Taux de réaction : [s<sup>-1</sup>].

$S$  Surface : [m<sup>2</sup>].

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzman = 5.6710<sup>-8</sup> [kg.s<sup>-3</sup>.K<sup>-4</sup>]≡[W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>].

" Grandeur considérée par unité de surface : [m<sup>-2</sup>].

$T$  Température : [° C].

$t$  Temps : [s].

$U$  Tension électrique : [V].

$u$  Vitesse : [m.s<sup>-1</sup>].

$V$  Volume : [m<sup>3</sup>].

''' Grandeur considérée par unité de volume : [m<sup>-3</sup>].

$X$  Concentration molaire.

$x$  Position : [m].

$Y$  Fraction massique.

$y$  Position y dans le plan (x,y,z): [m].

$z$  Position z dans le plan (x,y,z): [m].

# Avant propos

Cette thèse s'inscrit dans le cadre général des recherches sur les sciences de l'incendie. L'objectif principal est de mettre en place une méthode de reconstruction du terme source d'un incendie à partir de mesures indirectes. Le manuscrit est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre de ce manuscrit se focalise sur la caractérisation et l'importance du terme source dans le domaine de l'incendie. Nous désignons comme terme source, l'évolution temporelle du débit calorifique d'un foyer. Après un aperçu des pratiques en ingénierie, nous constatons que les termes sources prescrits dans les simulations numériques ne tiennent que rarement compte de l'influence de paramètres extérieurs au foyer, telles que la géométrie du volume ou la ventilation. Par nature, les méthodes classiques de calorimétrie ne le permettant pas, il nous faut donc trouver une alternative. Une première brique de solution se situe dans les méthodes employées pour la résolution de problème d'optimisation en incendie. L'analyse des travaux déjà publiés sur le sujet constituent donc un point de départ pour notre réflexion et pour la mise en place de notre démarche.

Le deuxième chapitre présente la formulation du problème que nous souhaitons résoudre et la méthode OBIWANE que nous avons développée. Cette méthode est basée sur la reproduction d'un essai à l'aide d'un code de calcul afin de reconstruire le terme source permettant de retrouver un jeu de mesures indirectes (*i.e.* la température, le flux thermique, la vitesse d'écoulement, etc.). Avant son application à des essais réels, le bon fonctionnement de OBIWANE est vérifié à partir d'une simulation numérique de référence.

Le troisième chapitre présente les premiers résultats d'application de OBIWANE à des essais réels dont le foyer est prescrit. Ces essais se déroulent dans un couloir borgne dans lequel est positionné un brûleur au propane qui permet un ajustement du débit calorifique au cours du temps. La méthode développée doit alors reconstruire la consigne prescrite au brûleur à partir de mesures de températures en différentes positions.

Le quatrième chapitre constitue l'application de OBIWANE à des essais à la fois en intérieur pour un foyer d'hydrocarbure et en extérieur, sur des foyers d'intensité et de complexité croissantes : bacs d'hydrocarbure, chargement de matériaux solides et enfin véhicule utilitaire. La méthode doit reproduire des essais en conditions réelles à partir de mesures de flux radiatifs en différentes positions. Les résultats de la reconstruction du terme source sont comparés aux évaluations effectuées par des méthodes classiques de calorimétrie. La diversité des matériaux mis en jeu et la géométrie des foyers représentent les principales difficultés pour retrouver le terme source à l'aide de OBIWANE.



# Chapitre 1

## État de l'art

La sécurité des personnes et l'intégrité des bâtiments en cas d'incendie sont des préoccupations effectives dans notre société. Dans les études de sécurité relevant du génie civil, ces paramètres sont pris en compte de manière systématique dans la conception du bâtiment. Dans la plupart des cas, le respect de la réglementation reste suffisant pour garantir le niveau de sécurité requis. Dans certains projets dits "hors normes", la seule prescription réglementaire peut être inadaptée. Le recours à des solutions alternatives basées sur une démarche d'ingénierie se développe et apporte un niveau de performance au moins équivalent si ce n'est supérieur aux moyens réglementaires. On appelle cette approche l'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI). Lorsqu'un sinistre survient néanmoins, il est important d'en connaître les causes et les conséquences. L'enquêteur ou l'expert réalise des investigations de terrain et se pose un certain nombre de questions : Comment le feu a-t-il pu se déclarer ? Comment s'est-il propagé ? Quels sont les indices exploitables pour répondre à ces questions ? Ces aspects relèvent de l'expertise post-incendie.

Que ce soit en ISI ou en expertise post-incendie, le recours à la simulation numérique se généralise de nos jours. Dans les deux cas, pour réaliser ces simulations numériques, la prescription du terme source de l'incendie (*i.e.* ce qui a brûlé) constitue un élément crucial. En effet, en ISI, la représentation fine du terme source apporte du réalisme aux scénarios d'incendie possibles. Ce terme source doit toutefois revêtir un caractère « dimensionnant » dans ce domaine. En expertise, ces simulations permettent de valider les hypothèses émises sur le déroulement intuitif de l'incendie.

Dans cette thèse, nous proposons une méthode permettant de caractériser un terme source (évolution temporelle du dégagement de chaleur et extension spatiale) à partir de mesures physiques indirectes simples à réaliser. Cette méthode fait appel aux techniques utilisées couramment dans les problèmes d'optimisation.

L'objectif, *in fine*, sera d'être capable de reconstruire un terme source à partir de mesures obtenues *a posteriori*. Avec une telle méthode, il pourrait être envisagé de constituer, de manière assez simple, une base de données de différents termes sources exploitables en ingénierie.

Dans ce premier chapitre, nous présentons d'abord quelques notions fondamentales liées à la physique de l'incendie et au terme source en particulier. Les pratiques classiques de simulation numérique sont ensuite présentées, dans le cadre spécifique de leur utilisation dans le domaine de l'ISI et de l'expertise post-incendie. Enfin, une étude bibliographique consacrée à l'analyse des travaux récents basés sur l'utilisation de techniques d'optimisation est proposée.



FIGURE 1.1 – Malgré les différences d'échelle, le développement d'un feu de bougie, de barbecue ou de forêt fait intervenir des phénomènes physico-chimiques couplés semblables.

## 1.1 Quelques notions fondamentales sur la physique du feu

Dans le langage commun, un feu désigne une flamme visible qui surplombe un solide (ou un liquide) et d'où se dégage des fumées. De manière plus technique, un feu peut être décrit comme un ensemble de processus physico-chimiques couplés, au sein desquels la réaction de combustion constitue le moteur.

Cette réaction de combustion s'effectue entre un mélange de gaz combustible et d'oxygène activée par une énergie extérieure, appelée énergie d'activation. Comme l'illustrent les photographies de la [Figure 1.1](#), quelle que soit l'échelle, le phénomène décrit est identique. La réaction de combustion produit de l'énergie dont une fraction permet l'auto-entretien du processus. Le complément est transmis vers l'extérieur sous forme de chaleur convectée et rayonnée.

Le transfert de l'énergie vers le milieu extérieur impacte les températures de l'environnement. Ces variations de température induisent une évolution de la masse volumique du gaz ambiant et produisent des écoulements dits de convection naturelle. Par la suite, nous désignerons par « ambiance thermique » l'environnement autour du foyer caractérisé par ces champs de température et de vitesse.

Ces champs (température et vitesse) constituent des indicateurs que nous appellerons « indirects » et dont la connaissance doit permettre d'estimer l'énergie produite par le terme source. Cette approche sera au cœur des travaux de cette thèse. Cependant, cette énergie peut aussi être déterminée de façon classique, directe, par un ensemble de méthodes décrites dans la sous-section suivante.

### 1.1.1 Grandeurs physiques liées à la production d'énergie

Un solide ou un liquide combustible, sous l'effet de la chaleur, dégage respectivement des gaz de pyrolyse ou du combustible évaporé. Ce dégagement entraîne une diminution de la masse du combustible. L'évolution de la vitesse de perte de masse  $\dot{m}$ , appelée aussi taux réactionnel ([Mass Loss Rate \(MLR\)](#)), du combustible est donc liée au dégagement énergétique. Pour un combustible connu dans des conditions idéales, le débit calorifique  $\dot{Q}$  qui est exprimé en kW (communément appelé [Heat Release Rate \(HRR\)](#)) dégagé par le foyer peut être déduit de l'évolution de la perte de masse par la relation :

$$\dot{Q} = \dot{m}'' S \Delta H_c \quad (1.1)$$

où la vitesse de perte de masse par unité de surface  $\dot{m}''$  est exprimée en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , la surface qui se dégrade  $S$  en  $\text{m}^2$  et l'enthalpie de combustion  $\Delta H_c$  en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Le débit calorifique caractérise la vitesse de production de l'énergie lors de la réaction de combustion.

Un même matériau ne brûle et ne dégage pas le même débit calorifique en fonction des sollicitations extérieures. Comme illustré dans la [Figure 1.2](#) issue de [29], l'évolution temporelle du débit calorifique d'un échantillon de mousse de polyuréthane, qui brûle sous l'effet d'un flux thermique imposé, dépend de la valeur de ce dernier. On peut observer sur ces courbes les trois phases caractéristiques (croissance, plateau, décroissance) de l'évolution de l'énergie d'un foyer. L'intégrale sur

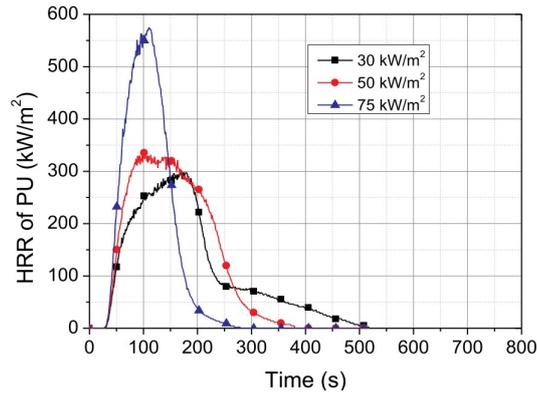


FIGURE 1.2 – Évolutions temporelles de débit calorifique d'un échantillon de mousse de polyuréthane ( $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ ), issues de ([29]), obtenues à partir de trois sollicitations thermiques différentes ( $\Phi''=30, 50, 75 \text{ kW.m}^{-2}$ ).

la durée totale de l'essai du débit calorifique représente ainsi l'énergie totale dégagée par l'échantillon. Elle est sensiblement équivalente pour les trois configurations bien qu'associées chacune à une sollicitation thermique différente. Ce constat peut s'étendre à d'autres types de foyers plus complexes qu'un simple échantillon de mousse. Chaque courbe renseigne sur la façon dont l'énergie est libérée au cours du temps par le foyer. Une telle courbe représente la signature de ce que nous appellerons par la suite le « terme source ».

Dans le cas d'un assemblage de matériaux se décomposant, il n'est pas possible de mesurer séparément la perte de masse de chaque matériau constitutif. On accède à une perte de masse globale. En conséquence, l'estimation du débit calorifique par la relation 1.1 nécessiterait d'évaluer une enthalpie de combustion équivalente, représentative de l'assemblage et variable en cours de l'essai. Une telle approche serait forcément entachée d'une erreur.

Alternativement à la mesure de la puissance *via* la perte de masse, il est aussi possible d'estimer un débit calorifique à partir de la connaissance de la quantité d'oxygène consommée par le foyer. Cette technique s'appelle la calorimétrie par consommation d'oxygène. En effet, Thornton [28] établit la relation entre l'énergie produite  $\dot{Q}$  par la combustion d'un gaz (ou d'un liquide) organique et la quantité d'oxygène  $\dot{m}_{\text{O}_2}$  nécessaire à cette production. À partir d'essais sur les solides organiques, Hugget [13] vérifie la relation :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{O}_2} E_{th} \quad (1.2)$$

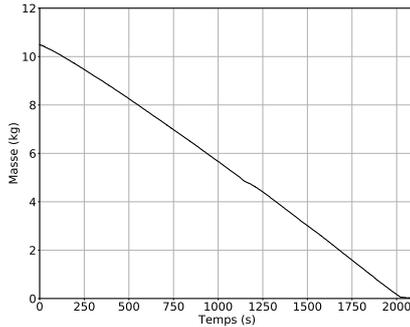
et estime le facteur de Thornton  $E_{th} \approx 13.1 \text{ kJ.kg}^{-1}_{\text{O}_2}$ . Cette valeur est confirmée par la suite par d'autres auteurs pour des combustibles différents avec une incertitude relativement faible de  $\pm 10\%$ . La calorimétrie par consommation d'oxygène permet donc d'évaluer le terme source sans connaître précisément la nature des constituants d'un foyer.



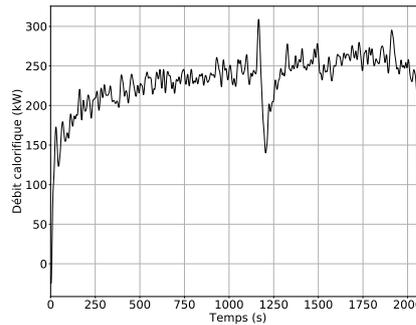
(a) Photo du foyer et de la balance



(b) Photo prise au cours de l'essai



(c) Évolution temporelle de la masse



(d) Évolution temporelle du débit calorifique

FIGURE 1.3 – Essai d'un feu de bac pour du diesel

### 1.1.2 Mesures expérimentales du débit calorifique

La vitesse de perte de masse résulte du calcul de la dérivée de l'évolution temporelle de la masse mesurée par une balance lors de la combustion d'un matériau. Le débit calorifique est ensuite calculé suivant la relation 1.1 si l'enthalpie de combustion est connue. À titre d'exemple, la Figure 1.3 présente un feu expérimental d'un bac d'hydrocarbure réalisé au Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris (LCPP). Pour cet essai, la balance utilisée est une Metler Toledo MCC150 précise en pesage à 9 g près. L'évolution temporelle de la masse (1.3c) permet, par dérivation, de calculer l'évolution temporelle du débit calorifique (1.3d). Ce type de pesage est classique pour les liquides. Néanmoins, pour les solides qui génèrent d'importants résidus carbonneux, cette méthode peut s'avérer être inadaptée.

Alternativement à la méthode de pesage, la calorimétrie par consommation d'oxygène utilise généralement une hotte qui coiffe le foyer et collecte l'intégralité des fumées produites par ce dernier (voir Figure 1.4). La concentration d'oxygène est mesurée directement au sein des fumées collectées en aval de la hotte. Le décalage temporel induit par ce cheminement doit être maîtrisé. Le débit calorifique est ensuite calculé par la relation :

$$\dot{Q} = 1.10 E_{th} C \sqrt{\frac{\Delta P}{T}} \left( \frac{X_{O_2}^{amb} - X_{O_2}^{fumee}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}^{fumee}} \right) \quad (1.3)$$

$$\text{où } \left\{ \begin{array}{l} E_{th} : \text{Facteur de Thornton (kJ.kg}_{O_2}^{-1}) \\ C : \text{coefficient d'étalonnage (m}^{1/2} \cdot \text{kg}^{1/2} \cdot \text{K}^{1/2}) \\ \Delta P : \text{différence de pression (Pa)} \\ T : \text{température des fumées (K)} \\ X_{O_2}^{amb} : \text{concentration molaire } O_2 \text{ dans l'air ambiant (mol.l}^{-1}) \\ X_{O_2}^{fumee} : \text{concentration molaire } O_2 \text{ dans les fumées (mol.l}^{-1}) \end{array} \right.$$

Généralement, le débit calorifique est calculé en considérant aussi la production de monoxyde et de dioxyde de carbone. Cette technique se retrouve dans les laboratoires pour des tests à petite

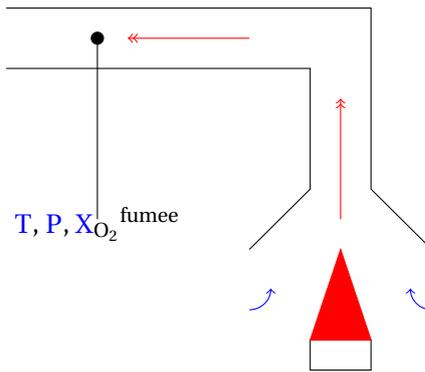
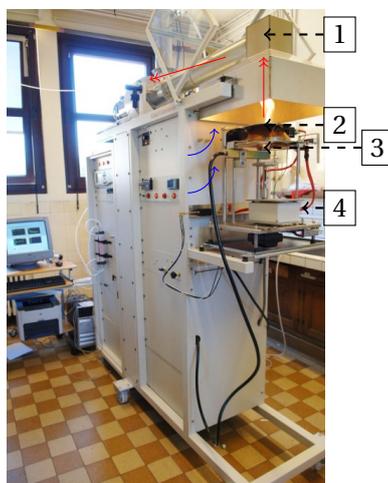
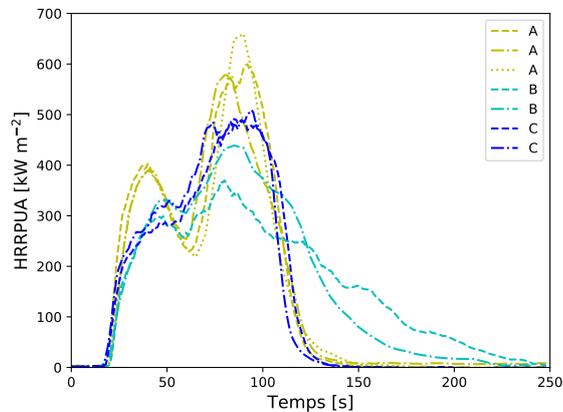


FIGURE 1.4 – Le foyer, au centre du dispositif, est alimenté en air (↺) et brûle en dégageant des fumées (↗) collectées par le système d'aspiration dans lequel des mesures de température de gaz  $T$ , de pression  $P$  et de concentration molaire d'oxygène  $X_{O_2}$  sont réalisées.



(a) Vue d'ensemble



(b) Données de sortie du cône

FIGURE 1.5 – Le cône calorimètre se compose d'une gaine d'aspiration et d'analyse des gaz (1, ↗) produits par l'échantillon (3) alimenté en air frais (↺). La résistance chauffante (2) rayonne vers la surface de l'échantillon (3). Une balance (4) complète généralement le système. Dans 1.5b, une mousse polyuréthane, étudiée lors de [7], disposée dans trois porte-échantillons différents (A, B, C) est soumise à  $\Phi'' = 35 \text{ kW.m}^{-2}$ . Le débit calorifique surfacique de l'échantillon est évalué par calorimétrie par consommation d'oxygène, à trois reprises en configuration A et à deux en B et C.

échelle sur des échantillons normés soumis à un flux dans un dispositif appelé cône calorimètre. Sur la Figure 1.5a, on présente ce dispositif et des courbes d'évolution de la puissance estimée montrant une assez bonne reproductibilité de la technique. Cette méthode de mesure fonctionne aussi à grande échelle pour des feux réalistes par exemple des feux de bagages.

Toutes ces données sont régulièrement utilisées comme terme source dans les simulations numériques pour estimer les conséquences d'un incendie dans un bâtiment.

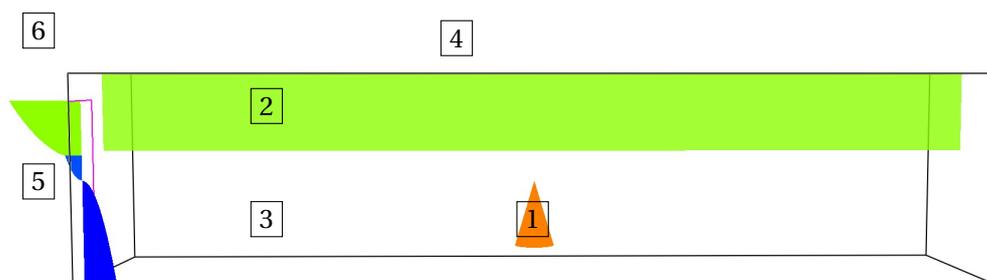
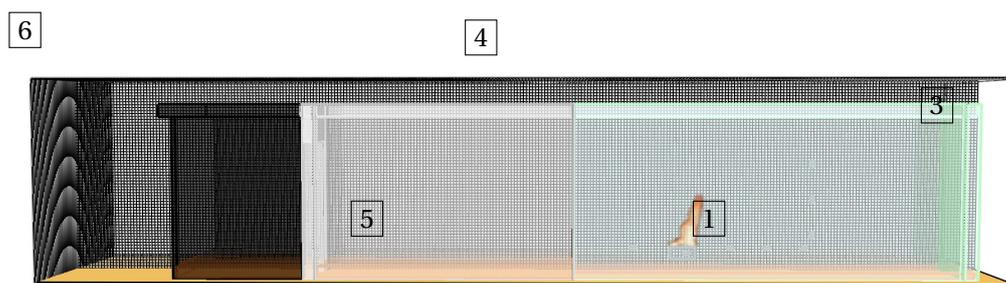
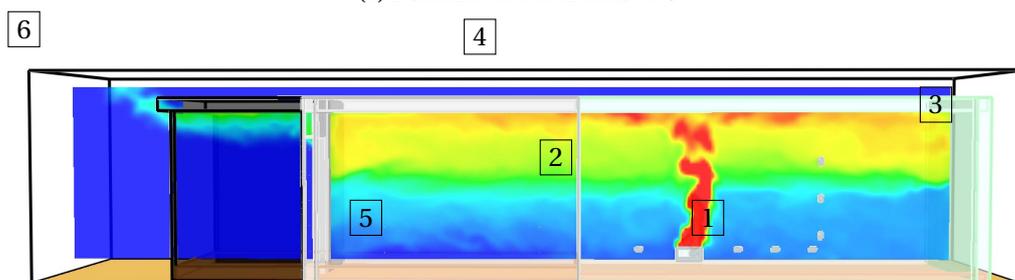


FIGURE 1.6 – Dans **CFAST**, la source (1) constitue la modélisation d'un foyer positionnée au centre d'un local (4) stratifié thermiquement en une zone chaude (2), contenant les fumées, et une zone froide (3), l'air frais. Une porte (5) fait office de communication avec l'extérieur (6).



(a) Domaine de calcul dans **FDS**



(b) Champ de températures dans **FDS**

FIGURE 1.7 – Basé sur l'utilisation d'un maillage, **FDS** modélise un foyer (1) produisant des fumées chaudes (2) dans un local (3). En provenant de l'environnement extérieur (6), l'air frais entre dans le local par une porte (5) qui permet également la sortie des fumées.

## 1.2 Modélisation numérique et pratiques en ingénierie

L'objectif de cette section est de faire apparaître l'importance d'un terme source dans deux pratiques d'ingénierie en incendie, celle du désenfumage et celle de l'expertise post-incendie. Entre ces deux domaines, la précision des termes sources nécessaires aux études n'est pas comparable. D'un côté le terme source doit être dimensionnant, alors qu'en expertise il est généralement spécifique à chaque affaire. Dans ces deux pratiques, des codes numériques sont utilisés et nécessitent un terme source pour modéliser un incendie. Deux familles de codes peuvent être distinguées, le code à zones (voir [Figure 1.6](#)) et le code à champs ([Figure 1.7](#)). Des précisions supplémentaires sur l'une et l'autre de ses familles sont à retrouver en annexes [A](#).

### 1.2.1 Ingénierie du désenfumage

En France, une étude d'ingénierie du désenfumage ([1]) peut être effectuée par un organisme reconnu compétent par le Ministère de l'Intérieur, à la demande d'un des acteurs (maîtrise d'ouvrage, commission de sécurité, ...) impliqués dans la vie d'un bâtiment recevant du public. Au cours de cette étude, l'organisme évalue la réponse du système de désenfumage du bâtiment en

situation d'incendie. L'objectif du système est de préserver les chemins d'évacuations libres de fumées. L'approche est basée sur la définition de scénarios d'incendie dit « de dimensionnement » comprenant un ou plusieurs termes sources différents. La constitution des scénarios, donc des termes sources, repose sur une étude préliminaire, où l'activité du bâtiment, les lieux de départ probables d'un incendie et les potentiels calorifiques sont examinés. Dans la bibliographie [14], des exemples de termes sources d'objets combustibles sont disponibles. Par exemple, le feu d'une chaise dégage en moyenne entre 30 et 200 kW ou celui du mobilier d'une chambre entre 3 et 10 MW. En l'absence d'informations précises sur ce qui est susceptible de brûler, le LCPP propose dans le *Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage : établissements recevant du public* [3] des termes sources standards assurant une représentation « enveloppe » de la réalité. Historiquement, les caractéristiques de ces termes sources proviennent de la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC) et de l'Instruction Technique 246 [1] relative au désenfumage dans les établissements recevant du public.

Une fois le terme source défini, les simulations numériques sont réalisées et exploitées par comparaison des données de sortie (température, flux, coefficient d'extinction, ...) à des valeurs seuil, considérées comme acceptables en terme de sécurité. Dans [3] du LCPP, une méthodologie de post traitement des données numériques ainsi qu'un certain nombre de valeurs seuil sont proposées.

La faiblesse principale de la simulation numérique pour l'ingénierie du désenfumage est très souvent l'absence de la connaissance fine du comportement d'un terme source spécifique. La méthode présentée dans cette thèse vise à combler ce manque.

### 1.2.2 Expertise post-incendie

Lors d'une enquête judiciaire, l'expert doit être précis dans la détermination du terme source. Ainsi, l'expertise débute par la recherche des zones de dépôts possibles de l'incendie. Pour ce faire, l'enquêteur base sa réflexion sur des observations de la scène après sinistre, sur des témoignages et bien entendu sur son expérience. Ce travail d'investigation est décrit dans l'ouvrage [16] qui définit la méthodologie d'investigation post-incendie. L'enquêteur émet une hypothèse sur ce qui a brûlé initialement (*i.e.* le foyer primaire) puis imagine la propagation du sinistre (*i.e.* les foyers secondaires) en élargissant ainsi progressivement sa zone de recherche. Tout au long de son enquête, il étudie et prélève des matériaux et des objets (bois carbonisé, rideaux, ...) qui lui serviront à étayer son scénario. Le recours à la simulation numérique n'est utile que lorsque plusieurs scénarios sont établis et que les données de l'investigation de terrain ne permettent pas d'en privilégier un plutôt qu'un autre.

En ce sens, les travaux de thèse de Mathieu Suzanne [27] constituent, au sein du LCPP, une première brique dans l'utilisation de la simulation numérique en expertise post-incendie. La méthode mise en place lors de ces travaux est basée sur l'analyse d'un certain nombre de points de comparaison entre la scène après sinistre et les simulations numériques des scénarios envisagés. Ces points de comparaison correspondent à des objets dont la sollicitation thermique (température, flux thermique et une durée d'exposition) est estimée en fonction de leur état de dégradation. Par cette méthode, les scénarios d'incendie peuvent être validés ou non sur un critère plus quantitatif que de simples observations. La robustesse de la méthode dépend bien évidemment du nombre de points de comparaison sur lesquels elle se base.

Les travaux présentés dans ce manuscrit viennent compléter cette méthodologie en ne visant non plus à se recaler à un état final mais en tentant de reconstituer l'évolution temporelle d'un sinistre sur la base d'informations collectées au cours du temps. Pour ce faire, nous nous inspirons de travaux effectués dans le domaine de l'incendie sur la détermination de paramètre d'un incendie et de terme source à partir de données discrètes ou continues.

### 1.3 Résolution de problèmes d'optimisation en incendie

Dans [26], les auteurs tentent de détecter et de prévoir la phase de développement d'un incendie en se basant sur l'information transmise par des détecteurs de température au plafond d'un local. Les paramètres d'optimisation, autrement dit les inconnues du problème composent le vecteur  $q$  tel que :

$$q = [x \quad \alpha] \quad (1.4)$$

La position  $x$  définit les coordonnées du foyer dans le plan du local.  $\alpha$  caractérise le taux de croissance du débit calorifique du foyer. L'évaluation de ces deux paramètres est effectuée en fonction des observations suivantes :

$$y_c = (x_c, t_c) \quad \text{avec} \quad c \in [1, \dots, C] \quad (1.5)$$

où  $x_c$  définit la position d'un détecteur de température noté  $c$  sur un nombre total  $C$  de capteurs.  $t_c$  désigne l'instant auquel un capteur détecte de la fumée, appelé aussi temps d'activation. La position et la phase de développement sont déterminées par la comparaison de ces observations avec les observables  $e_c(q)$  :

$$e_c(q) = (x_c, t_c) \quad \text{avec} \quad c \in [1, \dots, C] \quad (1.6)$$

où les paires de paramètres  $(x_c, t_c)$  caractérisant l'état des  $C$  capteurs en fonction des valeurs de  $q$ . Ces données sont issues de simulations réalisées par un code à zones nommé LAVENT [4]. Ce code est utilisé pour simuler de multiples scénarios d'incendie caractérisés par des valeurs de  $q$  différentes. Ces scénarios et les observables associées sont regroupés dans un vecteur noté  $E$  tel que :

$$E = [e_c(q) \quad q] \quad \text{avec} \quad c \in [1, \dots, C] \quad (1.7)$$

Le problème est alors défini tel que :

$$\min_q f(q) \quad \text{avec} \quad f(q) = \sum_{i=1}^N (y_i - e_i(q))^2 \quad \forall q \in E \quad (1.8)$$

Le scénario dont la valeur de  $q$  minimise cette fonction  $f$ , si celle-ci est unique, constitue alors la solution du problème. Dans la situation où plusieurs scénarios sont solutions, une moyenne sur les valeurs de  $q$  respectives est calculée.

Ces travaux n'utilisent pas d'algorithmes d'optimisation pour minimiser  $f$ . Avant d'aborder les travaux qui le font, il est à noter que deux types d'algorithmes peuvent être distingués ; ceux basés sur calcul du gradient<sup>1</sup> et ceux qui ne sont pas. Nous abordons maintenant les exemples basés sur le premier type.

Dans [17] l'auteur propose de prédire la phase de croissance d'un incendie dans un local en minimisant les écarts entre des observations issues de simulations numériques d'un code à champs (FDS) et les résultats d'un code à zones (CFAST). Les paramètres d'optimisation sont notés :

$$q = [\alpha \quad C \quad t_0] \quad (1.9)$$

correspondant respectivement au taux de croissance du débit calorifique  $\alpha$ , au coefficient d'entraînement du panache  $C$  et au temps de transition des gaz de la flamme vers la couche chaude  $t_0$ . Les observations sont définies telles que :

$$y^z = [T^z_{chaude} \quad h^z_{chaude}] \quad z \in [1, Z] \quad (1.10)$$

représentant respectivement la température de couche chaude et la hauteur libre de fumées. La particularité de ces travaux se situe dans la limitation dans le temps des observations disponibles. Cette limitation est définie par un intervalle, appelé fenêtre d'assimilation. Dans cet intervalle, seul un nombre  $Z$  de valeurs d'observations est considéré. L'algorithme d'optimisation « Algorithmic

1. Outil caractérisant les variations d'une fonction autour d'un point donné

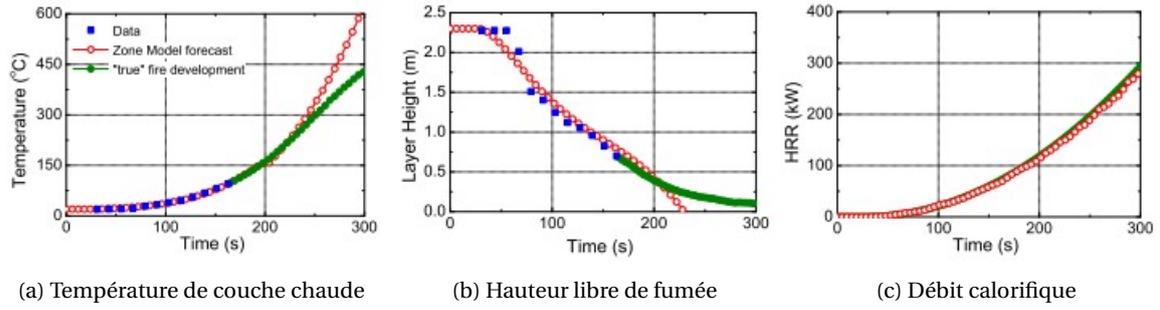


FIGURE 1.8 – La température de couche chaude, la hauteur libre de fumée et le débit calorifique ([17, p 68]) sont déterminés par la méthode.

Differentiation » [11] génère des valeurs de  $q$  qui sont ensuite simulées par le code à zone CFAST. Les observables issues de ces simulations  $e^z(q)$  sont par la suite comparées aux observations  $y^z$ .

$$e^z(q) = [T_{\text{chaude}} \quad h_{\text{chaude}}] \quad z \in [1, Z] \quad (1.11)$$

Le problème est donc défini par la relation :

$$\min_q f(q) \quad \text{avec} \quad f(q) = \sum_{z=1}^Z (y^z - e^z(q))^2 \quad (1.12)$$

L'algorithme d'optimisation génère des valeurs de  $q$  en se basant sur le gradient de la fonction  $f$ . Le jeu de paramètre  $q$  minimisant la fonction  $f$  constitue la solution noté  $q_*$ .

La fenêtre d'assimilation passée, le modèle numérique CFAST continue sa simulation sans autre intervention et est programmé avec la valeur de  $q_*$ .

L'auteur propose, pour valider cette méthode, de la soumettre à des observations  $y_i$  (voir courbe en ● Figure 1.8) issues d'une simulation FDS d'un feu de débit calorifique maximal  $\dot{Q} = 300$  kW. La fenêtre d'assimilation est représentée par ■ et la simulation CFAST avec les solutions  $q$ , courbe en ●. L'évolution du débit calorifique est reconstituée par la méthode. Nous constatons que les observations sont surévaluées après la fenêtre d'assimilation.

Dans la continuité des travaux précédents, l'auteur [17] propose maintenant d'appliquer la méthode développée cette fois-ci à un essai réel. Il tente de prédire la dynamique d'un feu expérimental de canapé dans un local en minimisant les écarts entre les observations et les observables issues du code à champs FDS. Le paramètre d'optimisation est :

$$q = [r] \quad (1.13)$$

où  $r$  représentant la vitesse de propagation<sup>2</sup> est ajustée en fonction des observations :

$$y^z = \left[ T_j^z \right] \quad \text{avec} \quad j = [1, 6], \quad z \in [1, Z] \quad (1.14)$$

Le vecteur  $y^z$  est composé de six positions de mesures de la température dans le local. La fonction objectif identique aux travaux précédents est minimisée par l'algorithme « Tangeant Linear Model » [8]. Le changement d'algorithme intervient avec la montée en complexité du problème, du fait de l'utilisation du code à champs FDS.

Une partie des résultats est présentée dans la Figure 1.9, les températures modélisées par FDS dans la fenêtre d'assimilation (illustrées en ●) et celles modélisées en dehors de cette fenêtre (▲) correspondent avec les mesures de température (■).

Nous abordons maintenant les travaux basés sur les algorithmes sans calcul du gradient. Ces méthodes s'appliquent généralement à des fonctions caractérisées par de nombreux minima.

2. La vitesse de propagation quantifie le déplacement d'une flamme à la surface d'un objet.

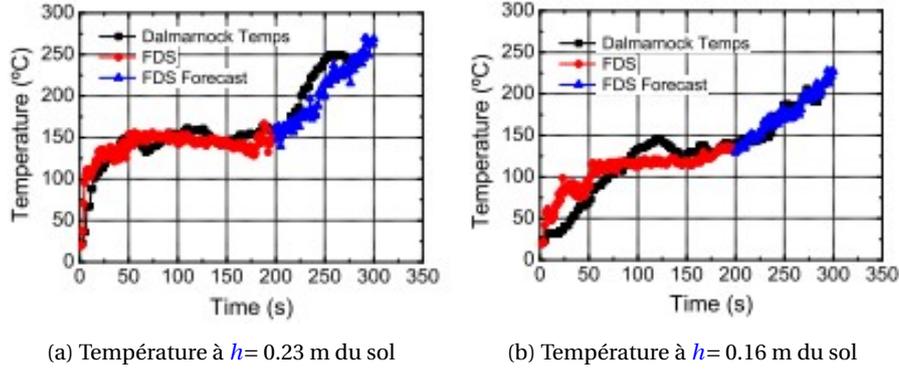


FIGURE 1.9 – L'évolution de températures ([17, p 117]) à deux hauteurs différentes sont déterminés par la méthode.

Les auteurs de [2] construisent un code numérique contrôlant l'ensemble des tâches de résolution d'un problème d'optimisation. La méthode n'est ici pas appliquée à un essai réel mais à trois modélisations FDS. Chacune modélise la dégradation d'un matériau, constitué de deux composants noté  $j$ , dans un Analyseur Thermo-Gravimétrique (ATG)<sup>3</sup>. La vitesse de chauffe<sup>4</sup>, paramètre central dans un ATG, varie d'une simulation à l'autre. Les paramètres d'optimisation sont notés :

$$q = [T_j \quad r_{pj}] \text{ avec } j = 1, 2 \quad (1.15)$$

avec  $T_j$  et  $r_{pj}$  respectivement la température de début de réaction et le taux de réaction<sup>5</sup> du composant  $i$ . Les observations sont :

$$y = [\dot{m}] \quad (1.16)$$

$\dot{m}$  la vitesse de perte de masse est liée au matériau. Le problème de la détermination des constantes cinétiques  $q$  d'un matériau à deux composants  $j$  est défini tel que :

$$\min_q f(q) \text{ avec } f(q) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(y - e(q))^2}{N} \right]^{1/2} \quad (1.17)$$

$N$  représente le nombre de jeux de paramètres  $q$  générés par l'algorithme génétique, « Shuffled Complex Evolution » [6].

Les vitesses de pertes de masses sont reconstituées pour les trois vitesses de chauffes; résultats appuyés par le calcul des paramètres cinétiques de chaque composant, inscrits dans le [Tableau 1.1](#).

Les algorithmes génétiques comme « Shuffled Complex Evolution » présentent une flexibilité dans la résolution des problèmes mais nécessitent de nombreux calculs.

3. Appareil permettant la caractérisation de la cinétique de décomposition d'un matériau en fonction de la température

4. La consigne de montée en température à l'intérieur de l'ATG, exprimée en  $K \cdot \text{min}^{-1}$

5. Paramètre relatif à la cinétique de réaction

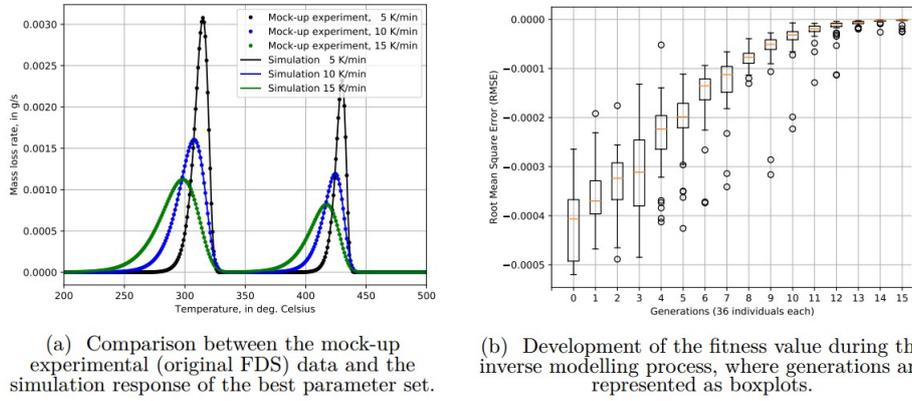


FIGURE 1.10 – Résultats de la résolution d'un problème de modélisation FDS d'un ATG à trois vitesses de chauffe décomposant un matériau à deux composants ([2, p 7])

$q$	Valeur référence	Valeur solution
$T_1$	315.0	315.008
$r_{p1}$	0.0056	0.00559759
$T_2$	430.0	430.007
$r_{p2}$	0.0075	0.00749932

TABLEAU 1.1 – Résultats de la résolution d'un problème de modélisation FDS de la décomposition d'un matériau à deux composants caractérisés par les paramètres cinétiques ( $T_j$  la température de déclenchement de la réaction et  $r_{pj}$  le taux de réaction).

Articles	But des travaux	Phénomènes physiques	Paramètres d'optimisation $q$	Observations $y$	Méthodes d'optimisation
R.F. Richards[26]	Situer et prévoir la croissance d'un incendie dans un local	Modéliser la phase de développement	Positions $x$ , Taux de croissance du débit calorifique $\alpha$	$x_c$ , $t_c$ instant de détection par un capteur	Recherche dans une base de données de $q$ minimisant la fonction objectif
W. Jahn[17, p 58-71]	Reconstituer la phase de croissance d'un incendie	Modéliser l'évolution du débit calorifique	$\alpha$ , Coefficient d'entraînement du panache $C$ , Temps initiale d'assimilation $t_0$	Température $T_{chaude}$ , Hauteur libre de fumée $h_{chaude}$	Algorithme avec calcul du gradient de la fonction objectif et simulation par code à zones
W. Jahn[17, p 82-120]	Reconstituer la dynamique d'un feu de canapé	Modéliser l'évolution du débit calorifique	Vitesse de propagation flamme $r$	Multiplés températures de gaz $T$	Algorithme avec calcul du gradient de la fonction objectif et simulation par code à champs
L. Arnold[2]	Automatiser la résolution du problème d'optimisation	Modéliser la décomposition d'un matériau bi-couche dans un ATG	Température de déclenchement de la réaction $T_j$ , Taux de réaction $r_{p_j}$	Vitesse de perte de masse $\dot{m}$	Algorithmes génétiques et simulation par un code à champs

TABLERAU 1.2 – Travaux abordés en résolution des problèmes d'optimisation (sens d'apparition )

## Chapitre 2

# Algorithme itératif d'optimisation pour une reconstruction du terme source

Dans le chapitre 1, nous avons décrit les phénomènes liés à la production d'énergie d'un foyer d'incendie, ce que nous définissons comme étant le terme source. La connaissance précise de cette grandeur est primordiale pour simuler numériquement un incendie, tant en expertise après sinistre qu'en prévention des risques.

Expérimentalement, des moyens de mesure permettent d'évaluer le terme source mais restent limités dans leur champ d'application d'un point de vue technique et matériel. Afin de palier ce fait, nous souhaitons proposer une démarche alternative basée sur des méthodes proposées dans les travaux de la [section 1.3](#). Les auteurs y démontrent la faisabilité de l'évaluation du terme source à l'aide la simulation numérique et à partir de mesures indirectement liées à la production d'énergie du foyer.

Dans ce chapitre, nous nous efforcerons de présenter une démarche de reconstruction d'un terme source utilisant la simulation numérique pour exploiter des mesures indirectes. Le bon fonctionnement de cette démarche est ensuite vérifié à partir de cas de test et de données issues de simulations numériques.

### 2.1 Reconstruction du terme source à partir de mesures simples

L'idée générale de la méthode, que nous nommons OBIWANE (*i.e.* Optimisation Based Iterative Workflow for A Numerical Experiment) dans la suite de ce manuscrit, consiste à reproduire un essai via l'utilisation de la simulation numérique.

En effet, pour un terme source donné, maîtrisé et connu, un outil comme [FDS](#) est en mesure de prévoir assez fidèlement les effets d'un incendie (températures, flux, écoulements de fumées etc.). Ainsi, il est possible de formuler l'hypothèse que, si les différences sont minimales entre des mesures réalisées lors d'un essai et les données de sortie d'une simulation numérique de ce même essai, alors le terme source prescrit numériquement est proche de celui que l'on pourrait évaluer par les moyens de mesures classiques.

Cette hypothèse permet d'envisager le problème de recherche d'un terme source numérique, qui minimise les écarts entre des mesures réelles et leurs équivalents numériques, comme une démarche globale d'optimisation. Cela implique d'utiliser un certain formalisme mathématique que nous proposons de détailler dans le début de ce chapitre.

#### 2.1.1 Un problème d'optimisation

Initialement, nous disposons uniquement de données issues d'un essai d'une durée de  $\Delta t_{\text{feu}}$  et délimité par les instants  $t_0$  et  $t_{\text{fin}}$ , qui en marquent respectivement le commencement et la fin. Autour d'un foyer, des mesures de température  $T$  et de flux thermique  $\Phi$  sont effectuées à pas régulier, généralement toutes les secondes. Ces données constituent ce que nous appelons des

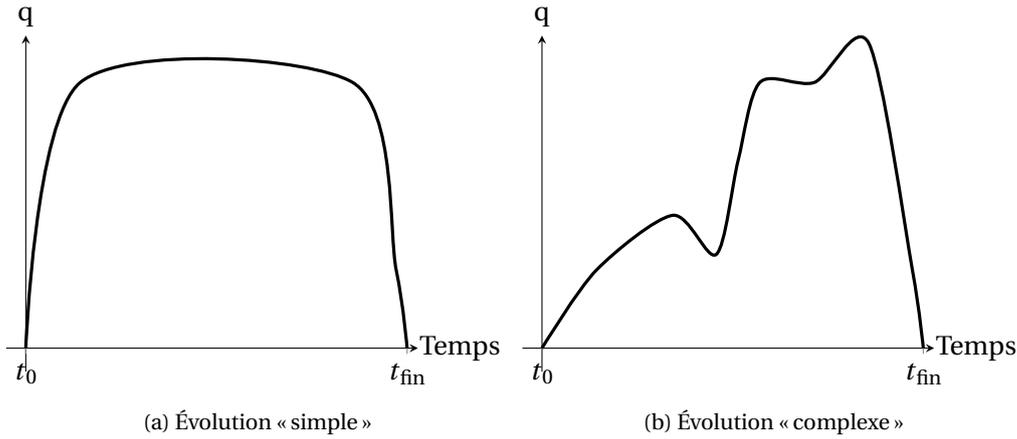


FIGURE 2.1 – Deux évolutions de termes sources

« observations » et sont regroupées dans un vecteur noté  $y^k$  tel que :

$$y^k = (\mathbf{T}^k, \Phi^k) \quad k \in [0, \dots, N-1] \quad (2.1)$$

Le vecteur des températures est noté  $\mathbf{T}^k$  et celui des flux thermiques radiatifs,  $\Phi^k$ .  $N$  représente le nombre de mesures effectuées dans l'intervalle  $[t_0, t_{\text{fin}}]$  aux instants définis par l'exposant  $k$ .

Comme indiqué dans l'introduction de cette section, la méthode est basée sur la reproduction numérique de l'essai. Ainsi, le vecteur des observations peut être directement comparé à ce que nous appelons le vecteur des « observables » noté  $e^k$ . Ce dernier contient les données de sortie d'une simulation numérique tel que :

$$e^k(q) = (\hat{\mathbf{T}}^k, \hat{\Phi}^k) \quad k \in [0, \dots, N-1] \quad (2.2)$$

Le vecteur des températures calculées lors de la simulation est noté  $\hat{\mathbf{T}}^k$  et celui des flux,  $\hat{\Phi}^k$ . Dans la suite de ces travaux, nous simplifions cette notation et définissons que  $\mathbf{T}^k$  et  $\Phi^k$  représentent les observables. Notons que ces derniers dépendent du vecteur  $q$ .

Le vecteur  $q$  contient les valeurs des paramètres qui induisent un terme source. L'ensemble des valeurs admissibles forme l'espace des paramètres  $\mathcal{Q}$  défini comme  $\mathcal{Q} \subset \mathbb{R}^p$ , où  $p$  représente le nombre de paramètres différents, et donc la dimension de  $\mathcal{Q}$  :

$$q = (q_1, \dots, q_p) \quad \text{avec} \quad q \in \mathcal{Q} \quad (2.3)$$

L'estimation numérique du terme source expérimental consiste donc à déterminer le vecteur  $q$  particulier qui, en tant que donnée d'entrée d'une simulation numérique de l'essai, permet la minimisation des différences entre les vecteurs  $e^k(q)$  et  $y^k$ . Afin d'évaluer cet écart, nous nous dotons d'une fonction dite « objectif » notée  $f^k$  et dépendante de  $q$ . Le minimum de cette fonction  $f^k$  constitue la solution au problème notée  $q_*^k$  définie telle que :

$$\text{solution} \quad : \quad q_*^k = \operatorname{argmin}(f^k(q)) \quad \forall q \in \mathcal{Q} \quad (2.4)$$

$$\text{fonction objectif} \quad : \quad f^k = \|y^k - e^k(q)\| \quad (2.5)$$

Dans le chapitre 1, nous avons défini le terme source comme étant l'évolution du débit calorifique d'un foyer. Cette évolution peut être plus ou moins complexe. Comme illustré dans la Figure 2.1a, le graphe d'un terme source, qualifié de « simple », est divisé en trois phases (*i.e.* une croissance, un plateau et une décroissance). Dans 2.1b, le terme source peut être qualifié de « complexe ». Ce type d'évolution représente généralement un terme source caractérisé par de nombreux paramètres (*i.e.* dimension  $p$  grand).

Les algorithmes classiques d'optimisation calculent une solution au problème par évaluation de nombreux jeux de paramètres. Une évaluation consiste à simuler numériquement un jeu de

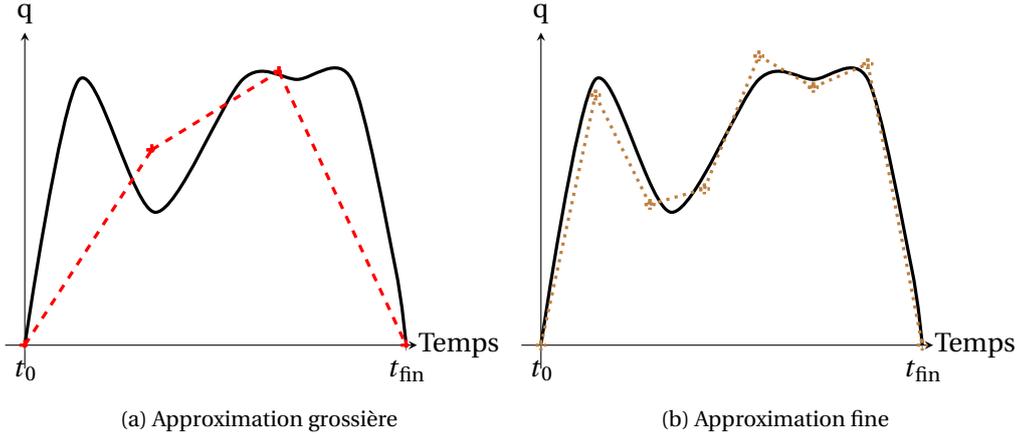


FIGURE 2.2 – Interpolation linéaire du terme source

valeurs. Généralement, une simulation d'un incendie nécessite quelques heures de calcul d'un code à champs pour quelques secondes de feu simulé. Par conséquent, dans le cas d'un terme source complexe avec un vecteur  $q$  dont les dimensions sont importantes, la résolution du problème devient prohibitive en temps de calcul. Dans notre cas, les ressources de calcul disponibles (*i.e.* un nombre de processeurs de calcul, la mémoire vive, ...) ne permettent une résolution dans un temps raisonnable. Il est donc primordial de réduire la dimension de l'espace des paramètres  $\mathcal{Q}$ .

### 2.1.2 Réduction de l'espace des paramètres

Afin de réduire l'espace des paramètres, nous repartons de l'observation de l'évolution du débit calorifique d'un foyer. Dans la Figure 2.1b, en dehors de la complexité de l'évolution temporelle, nous observons une dynamique lente. Il est alors envisageable d'estimer la courbe d'un terme source, comme illustré dans la Figure 2.2, par une succession de droites, autrement dit, d'effectuer une interpolation linéaire. Comme c'est le cas pour les graphes de cette figure, l'opération est effectuée entre deux points séparés par un intervalle de temps. Il est d'ailleurs notable que la précision de l'interpolation est liée à la largeur de cet intervalle. Dans 2.2a, l'estimation est grossière. Dans ce cas, l'intervalle considéré est plus important que les temps caractéristiques d'évolution du terme source. Dans 2.2b, l'estimation est plus fine étant donné les intervalles plus courts. L'évolution non linéaire d'une grandeur constitue le marqueur d'une physique complexe. L'estimation qui en est faite réduit cette complexité aux paramètres d'une droite.

L'interpolation linéaire est appliquée au problème afin de le simplifier. Une attention particulière doit toutefois être portée à l'intervalle de temps considéré. Nous faisons donc l'hypothèse simplificatrice, que dans un intervalle petit devant le temps total du feu  $\Delta t_{\text{feu}}$ , les évolutions du terme source sont suffisamment lentes pour que celles-ci soient quasi-linéarisées dans ce même intervalle.

Le temps total de feu est alors divisé en un nombre  $M$  d'intervalles notés  $I_i$  et de dimension unitaire  $\Delta t_{\text{est}}$  (voir Figure 2.3) tel que :

$$M = \frac{\Delta t_{\text{feu}}}{\Delta t_{\text{est}}} \in \mathbb{N} \quad (2.6)$$

Un intervalle  $I_i$  est composé de  $Z = N/M$  valeurs de terme source, d'observations et d'observables. Nous supposons que le terme source peut être discrétisé par la droite d'interpolation :

$$q^{iZ} = q^{(i-1)Z} + a^i \Delta t_{\text{est}} \quad i \in [1, M] \quad (2.7)$$

Le terme source est ainsi reconstruit aux points de bord de l'intervalle  $I_i$ , soit en  $q^{i-1M}$  et  $q^{iM}$ .  $a^i$  constitue alors l'unique inconnue du problème à chaque intervalle. La succession de ces droites permet la reconstruction de l'évolution entre  $t_0$  et  $t_{\text{fin}}$  (Figure 2.3a) de l'essai.

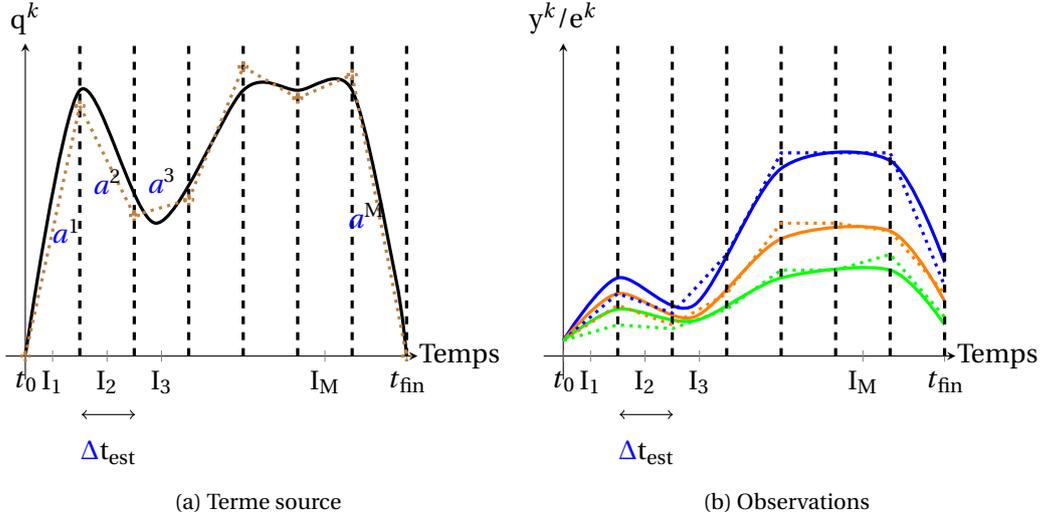


FIGURE 2.3 – Restriction temporelle du problème

Comme illustré dans la Figure 2.3b, la définition du problème en  $M$  intervalles s'applique aux observations et aux observables. En effet, nous supposons que l'estimation d'un terme source dans un intervalle  $I_i$  est uniquement basée sur les observations et les observables de ce même intervalle. Cette restriction induit des modifications sur le vecteur des observations  $y^k$  :

$$y_i^k = (\mathbf{T}^k, \Phi^k) \quad k \in I_i \quad (2.8)$$

et celui des observables  $e^k$  :

$$e_i^k(q^k) = (\mathbf{T}^k, \Phi^k) \quad k \in I_i \quad (2.9)$$

Dans un intervalle  $I_i$ , le problème est résolu par l'estimation du vecteur  $q_*^k$  tel que :

$$\text{paramètre} : q^k = (q_1^k, \dots, q_p^k) \quad k \in I_i \quad (2.10)$$

$$\text{solution} : q_* = \operatorname{argmin}(f^k(q)) \quad \forall q \in \mathcal{Q} \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

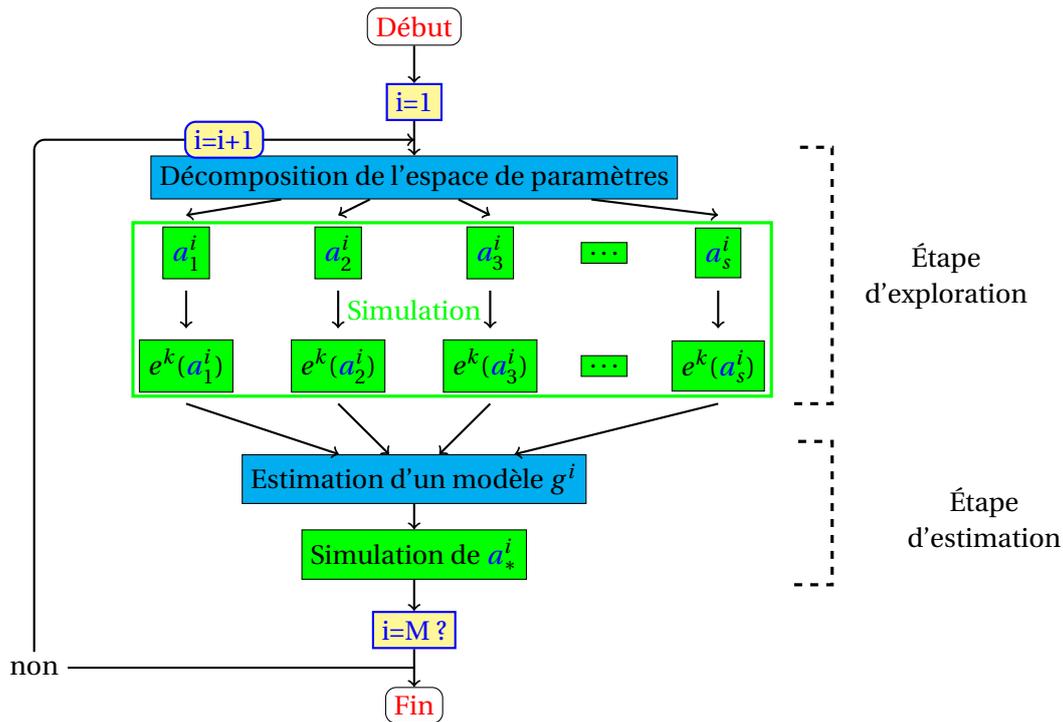


FIGURE 2.4 – L’algorithme de OBIWANE, se décompose en trois étapes. Deux types de bloc d’opérations sont distingués. Le programme principal est représenté par   et les simulations numériques par  . Les trois étapes sont répétées à M reprises.

## 2.2 Algorithme d’optimisation

Le découpage proposé dans la section précédente permet de réduire les dimensions du problème. Bien que cette réduction de la dimension du vecteur  $q$  et donc de l’espace des paramètres, soit nécessaire, le problème ne peut être résolu sans prendre en compte le coût de calcul à la fois en temps et en ressources. Dans la [section 1.3](#), certains algorithmes d’optimisation employés pour la résolution nécessitent un nombre important de simulations. Dans notre cas, nous souhaitons résoudre le problème en limitant justement ce nombre de simulations.

Ce principe oriente les choix à la fois de l’algorithme d’optimisation et plus globalement dans la méthode de reconstruction du terme source.

La méthode d’optimisation itérative OBIWANE, représentée succinctement dans la [Figure 2.4](#), est organisée en plusieurs blocs d’opérations répétés pour chaque intervalle  $I_i$  dans l’ordre suivant :

- Décomposition de l’espace de paramètres,
- Simulation des individus,
- Estimation d’un modèle à partir des données de simulations,

La démarche générale est basée sur la réalisation, en parallèle, de plusieurs simulations numériques qui représentent des termes sources différents notés  $a_s^i$ . À l’issue de ces simulations, un modèle  $g^i$  est établi et permet d’estimer la solution notée  $a_*^i$  dans un intervalle donné.

### 2.2.1 Décomposition de l’espace des paramètres

Avant de lancer les simulations, il convient d’explorer efficacement l’espace des paramètres. L’objectif de l’opération est de générer des termes sources et donc des observables qui puissent être comparées aux observations de l’essai reproduit.

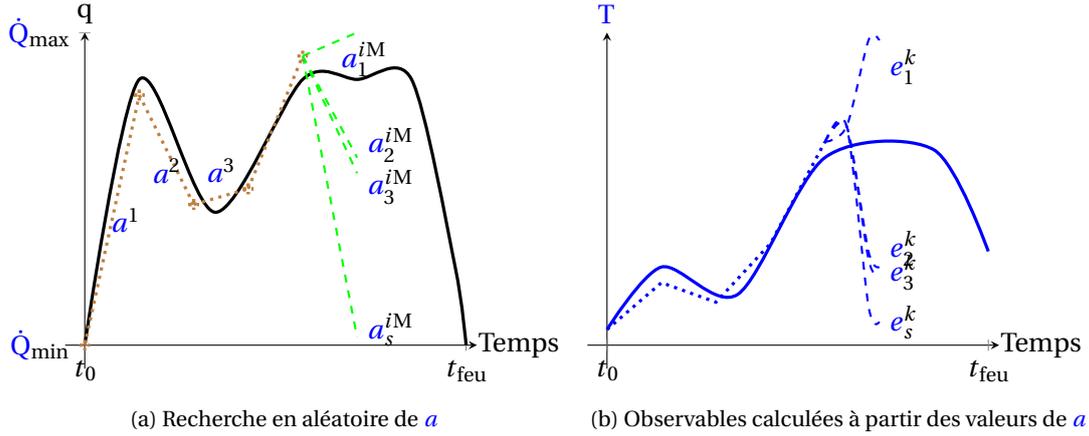


FIGURE 2.5 – Génération aléatoire sans biais de termes sources et les observables associées

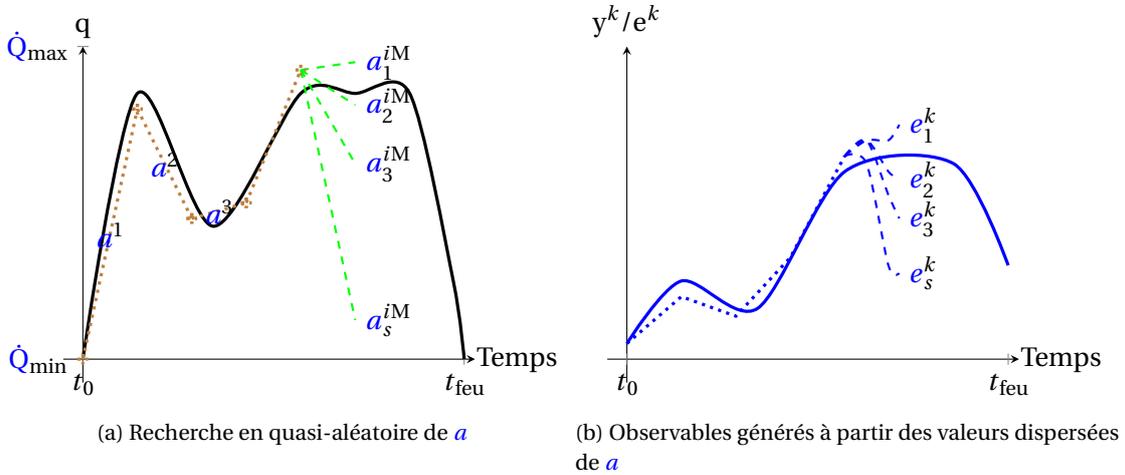


FIGURE 2.6 – Génération quasi-aléatoire et dispersées de terme source et les observables associées

L'espace des paramètres est constitué d'un ensemble de valeurs possibles du terme source telles que :

$$a^i \in [a_{\min}, a_{\max}] \quad i \in [1, M] \quad (2.13)$$

Les bornes  $a_{\min}$  et  $a_{\max}$ , respectivement la valeur minimale et la valeur maximale de la pente du débit calorifique, sont invariables tout au long de la résolution. Au début d'un intervalle  $I_i$ , la valeur du débit calorifique  $a^{i-1}$  est connue et fixée. Elle est issue de la solution à l'intervalle précédent. Notons que cette valeur est initialisée à  $a^0 = 0$  kW.

Ainsi, si  $S$  valeurs possibles de  $a^i$  sont sélectionnées, l'exploration de ces solutions consiste à simuler un ensemble de pentes de débit calorifique  $a_s^i$ . Ces pentes sont appelées « individus » dans ce qui suit. Notons que ce vocabulaire est inspiré des algorithmes méta-heuristiques.

La génération peut être aléatoire sans biais. Dans ce cas, le risque est de définir des individus très éloignés de la solution. La Figure 2.5a illustre des valeurs inégalement réparties et dont les observables (2.5b) sont éloignées de l'observation. Dans ce cas, aucun individu ne peut être satisfaisant. La génération d'un nombre  $S$  important de valeurs pourrait permettre d'éviter cette situation ce qui, en contre-partie, représenterait un coût de calcul trop important.

Une seconde solution, qualifiée de génération aléatoire uniforme, basée sur un biais selon lequel, les individus sélectionnés sont répartis de telle sorte que toutes les régions soient occupées par au moins un individu (voir Figure 2.6). Cette approche permet une exploration localisée tout en garantissant un individu proche de la solution. La proximité d'un individu avec la solution du problème, se fait à condition que les bornes de l'espace soient cohérentes, *a priori*, avec les valeurs possibles du terme source et le nombre  $S$  d'individus.

### 2.2.2 Simulation des individus

Dans OBIWANE, nous exploitons la fonction `RESTART` programmée dans le code à champs `FDS`. Cette fonction permet de stopper une simulation numérique à un instant précis et de la reprendre sans impact sur les données de sorties. Notons qu'après l'arrêt de la simulation, il est possible d'en modifier certains paramètres, dont le débit calorifique, avant de relancer le calcul qui se poursuit avec les nouvelles valeurs.

Il est donc possible d'utiliser les observables  $e^k$  issues de la simulation de la solution  $q_*^k$  à un intervalle donné  $I_i$  pour l'évaluation des individus à l'intervalle  $I_{i+1}$ . Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de simuler les individus depuis  $t_0$ , ce qui constitue un gain de temps important.

Par ailleurs, les individus sont complètement indépendants. En conséquence, il devient facile de paralléliser les calculs dans le but de gagner du temps sur la résolution du problème. Ainsi, un « cluster » de calcul regroupant plusieurs serveurs ou ordinateurs d'une centaine de coeurs au total, pourra être en mesure d'évaluer une vingtaine d'individus en parallèle.

### 2.2.3 Estimation du modèle

À partir des simulations de ces individus effectuées et des résultats obtenus, l'enjeu est ici d'estimer un modèle  $g^k$  tel que :

$$a^i = g^k(y^k) \quad k \in I_i, \quad i \in [1, M] \quad (2.14)$$

Ce modèle est fonction d'un paramètre d'entrée ici une observation  $y^k$ , et estime la valeur d'un paramètre de sortie, la pente  $a^i$ .

Ce modèle est obtenu par une méthode de régression linéaire appelée Gradient Tree Boosting[9] basée sur l'établissement d'arbres de décisions et une descente de gradient. Généralement utilisé dans le domaine de l'apprentissage supervisé, ce type de méthode fonctionne en deux phases. La première, appelé apprentissage, consiste à estimer le modèle, à partir d'un jeu de données constitué de couples de valeurs d'entrée et de sortie. Ce jeu de données appelé ensemble d'apprentissage permet à l'algorithme d'estimer et d'améliorer par itération successive un modèle. La seconde correspond à la vérification du modèle. Ce dernier devrait être en capacité d'estimer la valeur d'une sortie de l'ensemble d'apprentissage en fonction de l'entrée qui lui est associée. À la sortie de la méthode, le modèle est appliqué pour estimer une valeur de sortie en fonction d'une entrée de même nature que dans le jeu de données initiale.

La fonction objectif employée correspond à l'erreur quadratique telle que :

$$\text{Erreur quadratique : } f = \frac{1}{2} (a^i - g^k(y^k))^2 \quad k \in I_i, \quad i \in [1, M] \quad (2.15)$$

Le modèle est ainsi ajusté par minimisation de cette fonction  $f$ . Dans notre cas, les données utilisées pour l'apprentissage correspondent aux observables obtenues à partir de la simulation de  $N$  individus sur un intervalle  $I_i$ .

Pour que cet ajustement soit efficace il est cependant nécessaire, en amont de l'algorithme de régression linéaire, de réduire les observations effectuées sur un intervalle à un scalaire décrivant ces observations. Notons que cette procédure, que nous appelons « notation », peut se révéler assez complexe et prendre des formes très différentes. En effet, lors d'un essai, plusieurs grandeurs physiques différentes (températures, flux, vitesses d'écoulement, ...) sont mesurées. La fonction de notation devra normaliser ces différences. En effet, une différence de  $10^\circ \text{C}$  sur une mesure à  $300^\circ \text{C}$  ou de  $1 \text{ kW.m}^{-1}$  sur une mesure de  $10 \text{ kW.m}^{-1}$ , ne doit évidemment pas avoir le même impact sur la notation. Les codes numériques comme `FDS` ont certaines limites et ne constituent pas une exacte reproduction de l'essai. Ainsi il est possible qu'entre un essai et la simulation numérique, les températures soient très proches alors que les flux ne le sont pas. Ainsi, d'un essai à l'autre, le choix de la fonction de notation notée  $w$  et des points de mesures considérés doivent être adaptés pour tenir compte des limites de `FDS`. Nous pourrions, par exemple, être amenés à utiliser une fonction  $w^k$  différente pour les températures et pour les flux.

En effet, si l'objet de la reconstruction de l'ambiance thermique implique de reproduire des tendances, alors ce type de notation peut par exemple être utilisé :

$$w^k = \frac{y^k - y^{(k-1)}}{k - (k-1)}, \quad (2.16)$$

si nous considérons la dérivée à un instant  $k$ . Quel que soit le critère de notation utilisé, ces données seront utilisées pour construire un modèle mettant en lien les valeurs des critères pour chaque observable et les valeurs possibles de  $a$ . Ainsi, la recherche de la solution la plus adaptée consiste à utiliser le modèle avec les valeurs obtenues si les observations sont évaluées selon les mêmes critères :

$$a_*^i = g(w^k(y^k)) \quad (2.17)$$

#### 2.2.4 Simulation de la solution pour un intervalle

Certains phénomènes physiques, tels que la stratification thermique au sein d'un local, peuvent ne pas être correctement reproduits par FDS. Le débit calorifique peut alors être augmenté (ou au contraire diminué) afin de reproduire le phénomène en question. Si ce phénomène est très sensible aux modifications du terme source, les observables peuvent alors osciller autour des valeurs des observations sans que le phénomène ne soit reproduit.

Afin de réduire l'occurrence de ce type d'événements, une solution simple est envisagée. Si la taille d'un intervalle  $I_i$  d'exploration est notée  $\Delta t_{\text{exp}}$ , nous introduisons une seconde variable notée  $\Delta t_{\text{est}}$  telle que :

$$\Delta t_{\text{est}} \leq \Delta t_{\text{exp}} \quad (2.18)$$

À chaque itération, le domaine des solutions sera exploré sur un intervalle d'une taille  $\Delta t_{\text{exp}}$ , alors que la solution choisie à l'issue sera simulée sur un intervalle plus court noté  $\Delta t_{\text{est}}$ .

Prenons par exemple les valeurs de 60 s pour  $\Delta t_{\text{exp}}$  et 30 s pour  $\Delta t_{\text{est}}$ . Sur l'intervalle  $I_0$ , les individus seront évalués et notés entre 0 et 60 s, alors que la solution choisie sera utilisée uniquement sur l'intervalle  $[0,30]$  s. Le second jeu d'individus sera alors évalué entre 30 et 90 s pour une solution utilisée entre 30 et 60 s etc.

Ce principe permet d'avoir un comportement prédictif sur certains phénomènes, et d'éviter qu'une solution non optimale (due aux erreurs de la modélisation numérique, ou à une fonction de notation peu adaptée à la situation) entraîne un dégagement d'énergie trop important et difficile à rattraper lors des itérations suivantes.

La méthode est régie par un ensemble de paramètres reporté dans le [Tableau 2.1](#). Les valeurs de chaque paramètre et leurs influences sur la résolution du problème sont le sujet de la section suivante.

Paramètre	Signification
$\Delta t_{\text{exp}}$ (s)	Intervalle d’exploration
$\Delta t_{\text{est}}$ (s)	Intervalle d’estimation
C	Nombre de grandeurs physiques permettant de déterminer $q$
S	Nombre de valeurs différentes de $q$ simulées en estimation
$\dot{Q}''_{\text{max}}$ (kW.m <sup>-2</sup> )	Borne supérieure de l’espace de recherche

TABLEAU 2.1 – Paramètres principaux de la méthode OBIWANE

## 2.3 Vérification de l’outil, sensibilité aux paramètres

Cette première étape de vérification a pour objet de valider le fonctionnement de OBIWANE ainsi que les hypothèses formulées lors de la phase de développement. Pour cela l’algorithme OBIWANE est implémenté en Python 3.5, et est paramétré pour fonctionner sur le cluster<sup>1</sup> de calcul du LCPP.

Avant d’appliquer OBIWANE à des essais et des données réelles, une première démarche consiste à vérifier la capacité de la méthode à reconstruire le terme source à partir de données numériques issues d’une simulation. Cette simulation met en œuvre une géométrie choisie qui sert de référence. Des températures sont enregistrées à différentes positions. Spécifiquement pour ce processus de vérification, ces données constituent les observations et sont, à ce titre, employées pour la reconstruction du terme source.

Étant donné que les observations et les observables proviennent de FDS, les écarts sont attribués à la méthode OBIWANE et à ses réglages de paramètres. La sensibilité aux différentes valeurs de ces paramètres peut être étudiée et des plages de valeurs admissibles déduites, en vue de l’application de la méthode à des essais réels.

### 2.3.1 Définition des cas de test

#### Simulation numérique de référence

Des exemples de géométries programmées par les développeurs de FDS version 6[20, 19, 22, 21] sont fournis avec le programme. Parmi ces exemples, la géométrie COUCH.FDS est intéressante puisqu’elle représente un canapé adossé au mur d’une pièce (voir Figure 2.7). Cette géométrie constitue une étude « type » où la méthode OBIWANE peut être appliquée.

Le canapé est modélisé dans un domaine de calcul dont les dimensions sont plus importantes que cette dernière. Le domaine est ouvert (*i.e.* condition OPEN dans FDS) à ses parois avant et latérales, ce qui assure une bonne alimentation en air du foyer. À l’intérieur de ce domaine, le canapé est modélisé par cinq solides (*i.e.* OBST). Ce domaine est discrétisé par des mailles  $\Delta_x$  de 0.10 m de côté, valeur définie par les développeurs.

N’étant pas en possession d’un terme source expérimental de canapé, nous nous inspirons de données issues de [14] pour définir un terme source de référence. Ce terme source est prescrit à une surface, représentée par la zone ■ dans 2.7. Après la simulation, l’évolution du débit calorifique finalement calculé par FDS est représentée dans la Figure 2.8.

---

1. Serveur composé de 100 processeurs de calcul

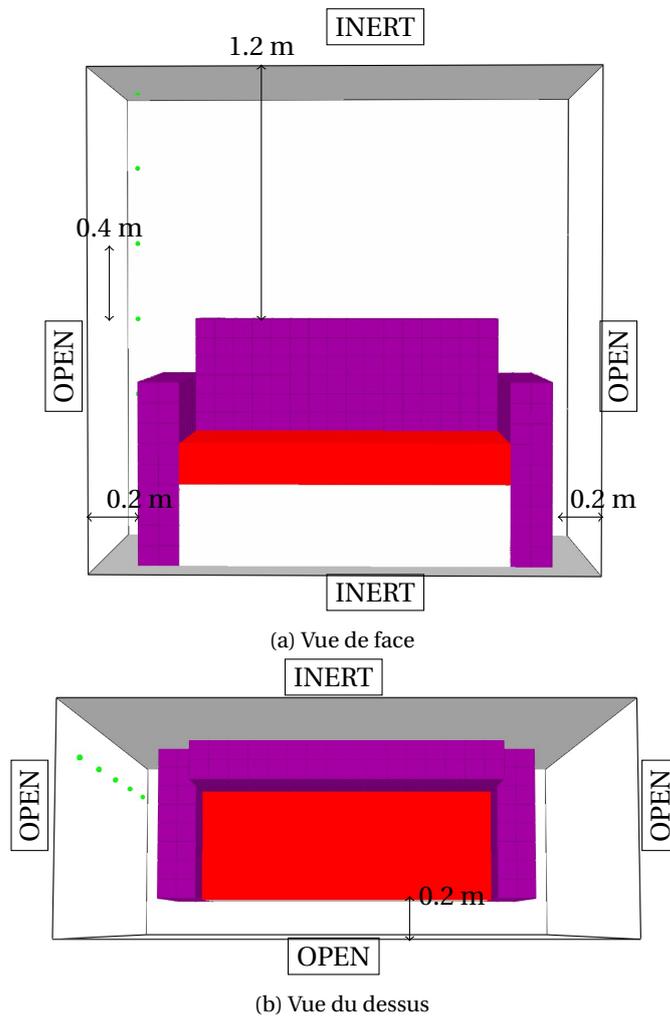


FIGURE 2.7 – Géométrie des cas de test

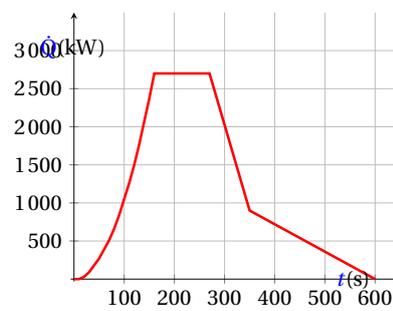


FIGURE 2.8 – Évolution du terme source

Cas de test	Paramètres				
	$\Delta t_{\text{exp}}$ s	$\Delta t_{\text{est}}$ s	C	S	$\dot{Q}''_{\text{max}}$ kW.m <sup>-2</sup>
Cas test <i>a</i>	60	30	5	20	3000
Cas test <i>b</i>	60	30	5	10	3000
Cas test <i>c</i>	240	120	5	20	3000
Cas test <i>d</i>	60	30	1	20	3000
Cas test <i>e</i>	60	30	5	20	6000
Cas test <i>f</i>	60	60	5	20	3000

TABLEAU 2.2 – Cas de test et valeurs des paramètres de la méthode.  $\Delta t_{\text{exp}}$  : temps d'exploration,  $\Delta t_{\text{est}}$  : temps d'estimation, C : nombre d'observations, S : nombre d'individus,  $\dot{Q}''_{\text{max}}$  : valeur maximale du débit calorifique

Nous modélisons, comme observations autour de ce foyer, cinq températures (voir ● 2.7) à 0.2 m du bord du canapé et espacées d'une hauteur de 0.4 m.

### Paramètres évalués de la méthode

La simulation numérique de la géométrie COUCH.FDS permet de générer les observations à partir desquelles le terme source prescrit est reconstruit. Intéressons nous maintenant aux valeurs étudiées pour cette vérification qui sont reportées dans le [Tableau 2.2](#).

Les temps  $\Delta t_{\text{exp}}$  et  $\Delta t_{\text{est}}$  sont fixés respectivement à 60 et 30 s. Ces valeurs conviennent à la dynamique des phénomènes rencontrés généralement en incendie, de l'ordre de la minute. Dans une situation où les phénomènes évoluent plus lentement, les valeurs  $\Delta t_{\text{exp}}=240$  s et  $\Delta t_{\text{est}}=120$  s sont aussi étudiées. Le nombre d'observations (et d'observables) fixé à C = 5, est justifié par une pratique en essai, où dans la hauteur cinq températures sont généralement mesurées. Le nombre d'individus fixé à S=20 correspond à une valeur d'équilibre entre le temps de calcul et une exploration correcte de la plage de variation du débit calorifique. La diminution de cette valeur permet de comprendre le lien entre une exploration plus ou moins fine de l'espace des paramètres et la qualité de la reconstruction. L'espace des paramètres est justement borné par une valeur maximale à  $\dot{Q}''_{\text{max}}=3000$  kW/m<sup>2</sup> ou 6000 kW/m<sup>2</sup>.

### 2.3.2 Résultats de la vérification

Globalement, les cas de test *a*, *b* et *e* semblent les plus proches de la consigne à reconstruire, sur les 6 jeux de paramètres de cette vérification. À l'opposé, les réglages du cas de test *c* entraînent une sous évaluation de la valeur du plateau de débit calorifique. La [Figure 2.9](#) présente les courbes d'évolution de la puissance obtenues avec OBIWANE pour ces six cas de test. Notons que la qualité d'une reconstruction n'est pas évaluée seulement en fonction des écarts entre la consigne et sa reconstitution. En effet, dans certaines conditions, notamment lorsque les mesures sont effectuées proche de la source de chaleur, les températures calculées par FDS sont bruitées. De plus, une différence d'une centaine de kilowatt sur le terme source peut avoir un impact négligeable sur les mesures de température. Le choix de la position et de la nature des observations est primordial, ce qui dans ce cas n'est pas des plus judicieux. Il convient de considérer également les écarts entre les températures observées (issues de la simulation de référence) et les températures observables (issues des reconstruction) pour qualifier les résultats.

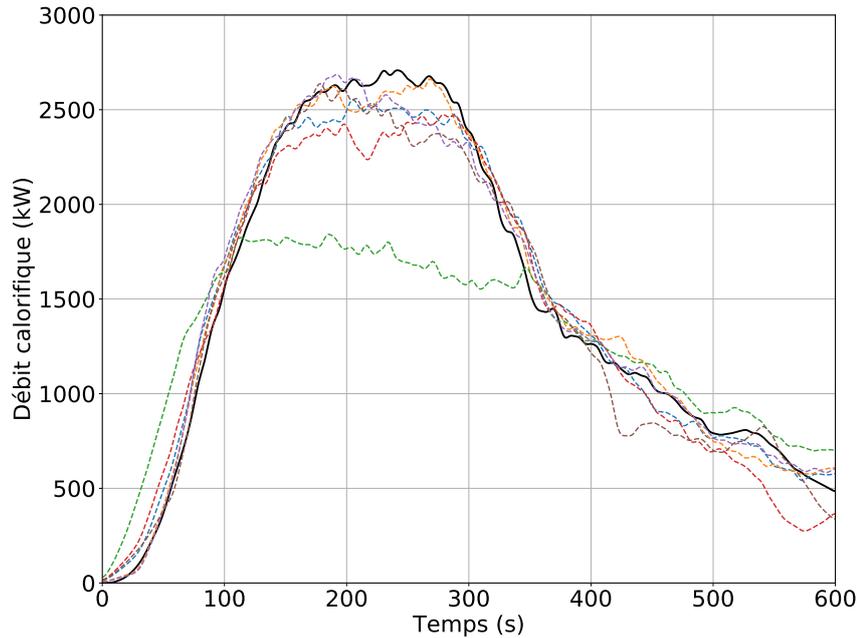


FIGURE 2.9 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique des scénarios de vérification. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par —. La reconstitution de l'évolution du débit calorifique calculée lors du scénario *a* : —, scénario *b* : —, scénario *c* : —, scénario *d* : —, scénario *e* : —, scénario *f* : —.

Nous proposons ici d'étudier avant tout l'impact de chaque paramètre sur les résultats obtenus. À l'issue, des plages de valeurs, retenues pour la suite de ces travaux, sont définies. Notons que la notation utilisée est basée sur la différence entre les observations et les observables pour chaque capteur  $c$  au dernier instant  $k$  d'un intervalle  $I_i$  :

$$w_c = \left( y_c^{iZ} - e_c^{iZ}(a_s^k) \right) \quad i \in [1, M] \quad (2.19)$$

Notons que nous considérons ici uniquement les températures comme observations et comme observables.

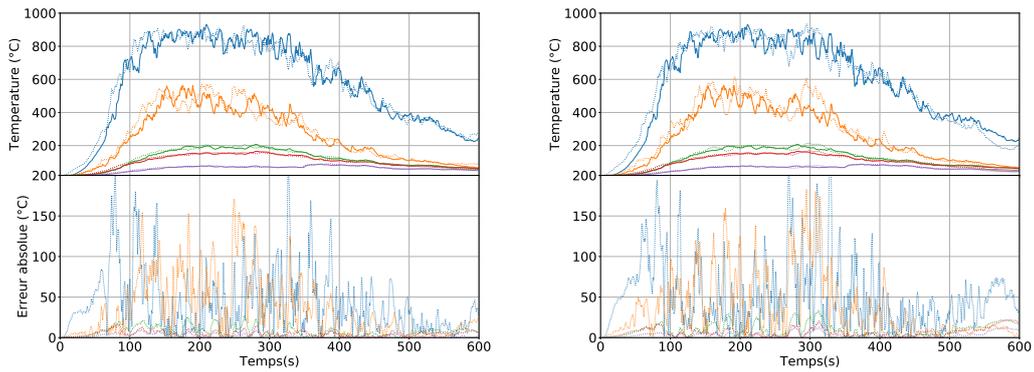
### Impact du nombre d'observations

L'impact du nombre d'observations  $C$  est évalué à partir des résultats obtenus pour les cas de test *a* et *d*. Dans le premier, 5 températures sont employées pour caractériser le terme source. Dans le second, seule la température la plus haute est utilisée.

Les graphes des débits calorifiques reconstruits lors de ces deux cas de test sont représentés dans la Figure 2.9. Il apparaît clairement que la dynamique de la consigne est mieux reproduite en utilisant les jeux de paramètres du cas de test *a*. Ce résultat est confirmé lorsque la moyenne des erreurs absolues entre le débit calorifique reconstruit et celui de référence est calculée. L'erreur est de 90 kW pour le cas de test *a* contre 150 kW pour le *d*.

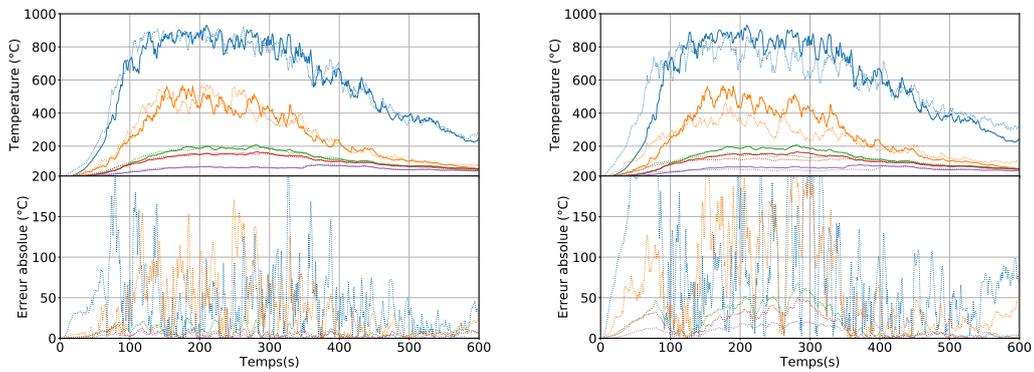
En calculant maintenant la moyenne des erreurs absolues sur les températures en partie haute, le jeu de paramètres du cas de test *a* permet une meilleure reconstruction de ces grandeurs. La moyenne de l'erreur obtenue est de 40 °C contre 50 °C pour le cas de test *d* (voir Figure 2.10). Aux autres points de mesures, les erreurs sont du même ordre de grandeur.

Ces premiers résultats indiquent que sur ce type de cas de test, une meilleure estimation du terme source et des températures observées est obtenue en utilisant 5 points de mesure contre un. Par ailleurs cela n'a aucun impact sur le temps de calcul global de la méthode.



(a) Reconstruction des températures au cas de test *a* (b) Reconstruction de la température au cas de test *d*

FIGURE 2.10 – Comparaison entre les cas de test *a* et *d* sur la reconstruction des températures : TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —.



(a) Reconstruction des températures au cas de test *a* (b) Reconstruction de la température au cas de test *c*

FIGURE 2.11 – Comparaison entre les cas de test *a* et *c* sur la reconstruction des températures : TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —.

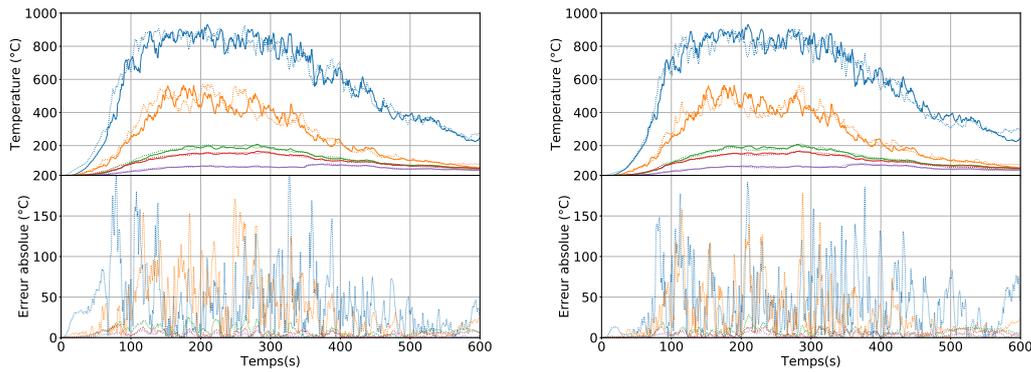
### Impact des temps d'explorations et d'estimation

L'impact de la valeur des temps d'exploration  $\Delta t_{\text{exp}}$  et  $\Delta t_{\text{est}}$  est étudié en comparant les résultats obtenus avec les cas de test *a* et *c*. Entre le premier et le second, les temps d'exploration et d'estimation sont multipliés par 4.

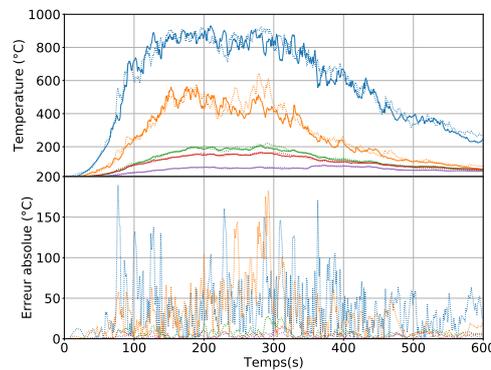
La courbe de reconstruction du débit calorifique du cas de test *c* se trouve également dans la Figure 2.9. Nous observons que pour ce dernier cas, la valeur du plateau de puissance est très largement sous estimée. Ce résultat est confirmé lorsque la moyenne des erreurs absolues calculée entre *a* et *c*, augmente de 90 kW à 360 kW.

La tendance est semblable sur les températures où les erreurs absolues sont alors doublées sur la majorité des instants considérés (voir Figure 2.11). Ce résultat s'explique, comme indiqué précédemment par une sous estimation de la valeur du plateau de puissance. En effet, dans le cas de test *c*, OBIWANE est paramétré avec  $\Delta t_{\text{exp}}=240$  s. Or, le plateau de puissance ne dure que 150 s environ. Si nous nous plaçons après une itération (*i.e.* 120 s) et un temps d'exploration à  $t=360$  s (*i.e.* au delà du plateau de puissance), les températures diminuent. Par conséquent, le débit calorifique est alors évalué à la baisse.

Le paramétrage des temps d'estimation et d'exploration est directement lié à la dynamique du foyer observé. Si celui-ci évolue avec des temps caractéristiques inférieurs au temps d'exploration, certaines de ses évolutions peuvent alors ne pas être détectées. Il conviendra donc de régler ce paramètre de manière cohérente avec les évolutions du foyer et des phénomènes observés. Notons



(a) Reconstruction des températures au cas de test *a* (b) Reconstruction de la température au cas de test *b*



(c) Reconstruction des températures au cas de test *e*

FIGURE 2.12 – Comparaison entre les cas de test *a*, *b* et *e* sur la reconstruction des températures : TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —.

que, le réglage proposé au cas de test *a* semble pertinent pour un grand nombre de dynamiques rencontrées en incendie.

### Impacts du nombre d'individus et de la valeur maximale du débit calorifique

Les deux derniers paramètres, le nombre d'individus  $S$  et la valeur maximale du débit calorifique  $\dot{Q}''_{\max}$ , ne peuvent pas être dissociés. L'association de ces deux paramètres influe sur la dispersion des individus dans l'espace des paramètres. Dans les cas de test *b* et *e*, si nous admettons que la plage de variation du débit calorifique (*i.e.* de  $0 \text{ kW.m}^{-2}$  à  $\dot{Q}''_{\max} \text{ kW.m}^{-2}$ ) est divisée de manière uniforme en fonction du nombre d'individus  $S$ , dans les deux cas, une puissance de  $300 \text{ kW.m}^{-2}$  sépare les individus. Dans le cas de test *a*, cette séparation n'est que de  $150 \text{ kW.m}^{-2}$ .

Pour ces trois scénarios, les termes sources sont bien reproduits, les moyennes des erreurs sont toutes inférieures à  $90 \text{ kW}$ . Les températures en partie haute sont également reproduites de manière équivalente, avec une erreur moyenne de  $40 \text{ °C}$  pour chaque scénario (voir Figure 2.12). Cette erreur est cependant moins importante sur les autres points de mesure avec le scénario *a*.

Les valeurs utilisées dans ces tests pour ces paramètres semblent donc relativement pertinentes. Notons cependant que l'augmentation du nombre d'individu impacte de manière non négligeable le temps de calcul. Il convient donc de choisir ces deux paramètres en fonction de la capacité des serveurs de calcul à disposition.

### Paramètres optimaux de OBIWANE

Compte tenu des résultats obtenus pour les cas de test a, b, e et les ressources de calcul disponibles, nous fixons pour la suite de ces travaux, les paramètres de la méthode OBIWANE aux valeurs reportées dans le [Tableau 2.3](#).

	Paramètres				
	$\Delta t_{\text{exp}}$ s	$\Delta t_{\text{est}}$ s	C	S	$\dot{Q}''_{\text{max}}$ kW.m <sup>-2</sup>
Optimales	60	30	5	20	3000

TABLEAU 2.3 – Valeurs optimales des paramètres de OBIWANE



## Chapitre 3

# Application à des foyers prescrits

Dans le chapitre 2, la méthode itérative d'optimisation, appelée OBIWANE, a été mise en œuvre pour reconstruire l'évolution temporelle de la puissance thermique du foyer d'un incendie (i.e. le terme source). Elle s'appuie sur des mesures indirectes telles que, par exemple, la température en certains points de l'espace.

Avant d'appliquer cette méthode pour caractériser le foyer d'un incendie en conditions réelles, il est nécessaire de procéder à sa validation. Pour cela, nous allons la confronter à des essais expérimentaux dont les caractéristiques sont entièrement connues. En particulier dans ces essais, l'évolution temporelle de la puissance du terme source suit une loi horaire imposée. Dans ce cas, nous parlons de foyers « prescrits ».

L'objectif dans ce chapitre est de parvenir à reconstruire cette loi horaire à partir des mesures indirectes utilisées dans l'approche.

### 3.1 Description des essais

#### 3.1.1 Foyers prescrits

Les essais, dont il sera question dans ce chapitre, sont réalisés sur le site expérimental dit du « Fort de la Briche » dont dispose le LCPP. Il est à noter que ce site héberge également la 26<sup>ème</sup> compagnie d'incendie et le centre de formation des cadres de la Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris (BSPP).

La structure d'essai du LCPP se compose de plusieurs caissons de transport maritime et est élevée d'un étage sur rez-de-chaussée (voir Figure 3.1). Les volumes impliqués peuvent être divisés en différents locaux à l'aide de cloisons. Cette flexibilité a notamment permis au LCPP de réaliser de nombreuses expertises en incendie.

Dans le cadre de notre étude, les essais sont réalisés dans un local situé au rez-de-chaussée, que nous appellerons par la suite « caisson », qui est représenté en Figure 3.1b. Ce local reproduit un couloir dont les dimensions sont reportées en annexe C.1.

Au sein de ce caisson, deux volumes (intérieur et extérieur) sont connectés par une cloison munie d'une porte (voir à nouveau Figure 3.1b). Trois zones caractéristiques peuvent être distinguées : la zone dite « feu » et la zone « de transition » dans le volume intérieur, et la zone « extérieure ».

La première de ces trois zones délimite les positions possibles du foyer et de ce fait, elle est pourvue d'une isolation thermique adéquate. La zone de transition assure le tampon entre le foyer et la zone extérieure qui est, elle, dépourvue d'isolation.

Intéressons nous maintenant au terme source. Pour représenter un foyer d'incendie dont la puissance thermique suit une loi horaire, nous avons fait l'acquisition d'un brûleur au propane. Le système (représenté schématiquement Figure 3.2) se compose d'un panneau de configuration, d'un débitmètre et d'un foyer de forme carré, constitué d'une rampe de gaz en serpentin. L'utilisateur ordonne, via le panneau, une consigne de débit de gaz  $D_m$ . L'électro-vanne régule en consé-

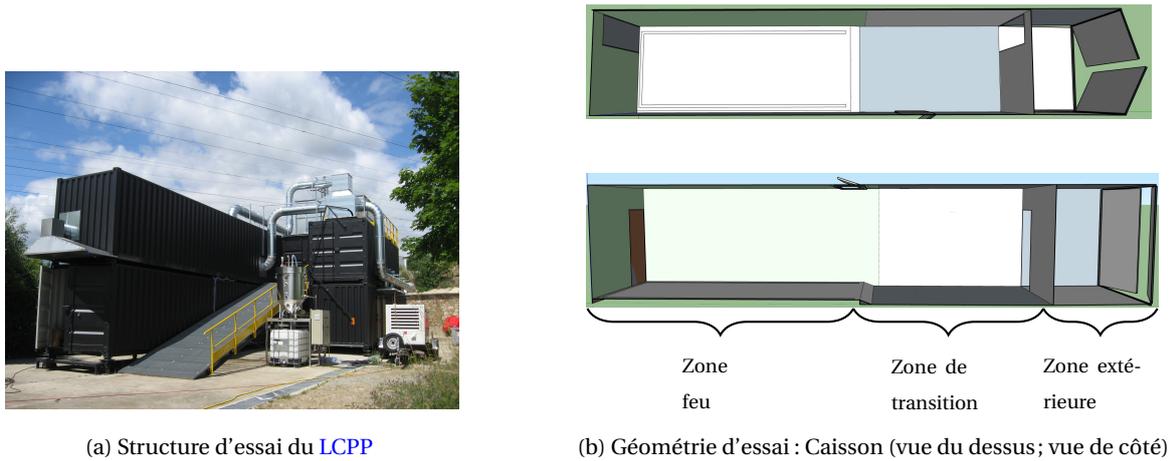


FIGURE 3.1 – Géométrie d'essai

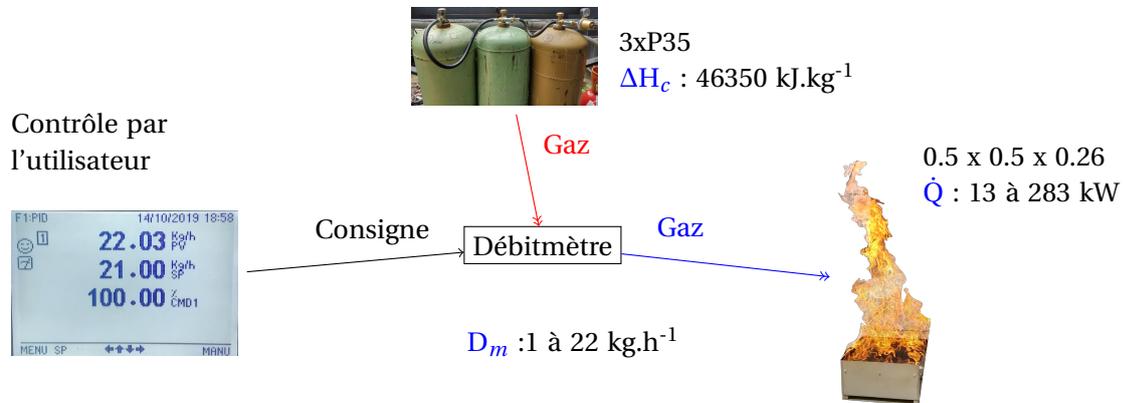


FIGURE 3.2 – Depuis le panneau de contrôle, l'utilisateur prescrit une consigne (→) de débit  $D_m$  en  $\text{kg.h}^{-1}$  au débitmètre alimenté (→) par trois bouteilles de propane P35 d'une contenance de 35 kg en moyenne transmettant (→) à la rampe de gaz d'un bac de  $0.5 \times 0.5 \times 0.26$  m.

quence le débit massique de gaz transmis au brûleur. L'ensemble est alimenté en propane par trois bouteilles P35<sup>1</sup>. Dans ce type d'installation, l'évolution en temps de la puissance thermique dépend de celle du débit de gaz suivant la relation :

$$\dot{Q}(t) = D_m(t) \Delta H_c. \quad (3.1)$$

Dans l'équation 3.1,  $\dot{Q}$  correspond à la puissance thermique en kW,  $D_m$  au débit massique en  $\text{kg.s}^{-1}$  et  $\Delta H_c$  est l'enthalpie massique du propane qui vaut  $46350 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (valeur issue de [14]). Compte tenu de la plage de variation du débit, qui va de 1 à  $22 \text{ kg.h}^{-1}$ , la puissance thermique disponible du brûleur est comprise entre 13 et 283 kW.

Au cours d'un essai, l'utilisateur a la possibilité de faire varier manuellement le débit de gaz et ainsi piloter l'évolution de la puissance thermique. Il est à noter que le temps de réponse du dispositif à la variation de la consigne est très court et peut donc être négligé. Dans l'incendie, l'évolution temporelle typique d'un foyer se caractérise par trois phases : croissance, stagnation et décroissance. Dans nos essais, nous nous sommes inspirés de ces trois phases, en les considérant cependant de manière distincte (voir Figure 3.3). De ce fait, nous avons défini trois familles d'essais pour lesquelles nous avons imposé soit une consigne dite "en plateaux croissants" (i.e. suivant une courbe en escalier), soit une consigne "en plateau simple", soit une consigne dite "en plateaux décroissants".

Le brûleur est positionné à même le sol dans la zone feu. Deux positions dites "centrale" et "en coin" (voir Figure 3.4) sont utilisées. D'un point de vue expérimental, la position centrale est idéale

1. Bouteille de gaz contenant en moyenne 35 kg de propane

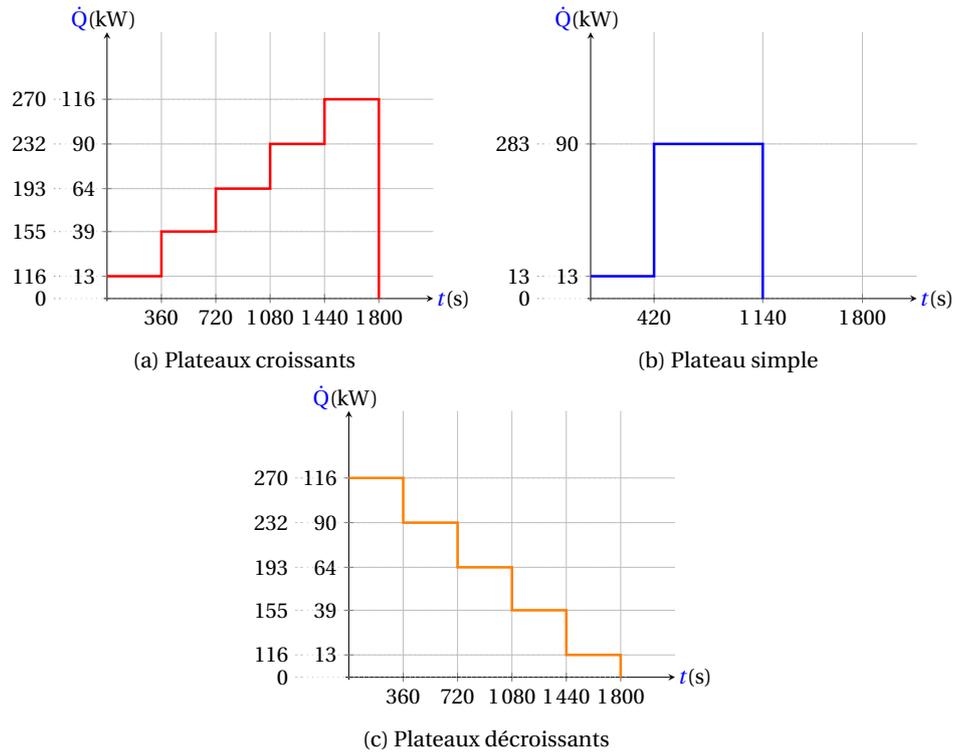


FIGURE 3.3 – Les consignes en débit calorifique sont prescrites au brûleur. En ordonnée, les puissances du foyer doivent être lues en colonne séparées. La colonne de gauche correspond aux consignes les plus puissantes et la colonne de droite, les plus faibles. Le pas de modification des consignes en plateaux croissants et décroissants est défini par  $\frac{\dot{Q}^{max} - \dot{Q}^{min}}{4}$ .

car de nombreuses mesures indirectes (température et flux thermique) peuvent être réalisées tout autour du foyer. Lorsque le foyer est positionné dans un des coins de la zone feu, les mesures ne peuvent être réalisées que sur les deux côtés apparents du foyer. Il est à noter que dans une telle situation, l'aérodynamique du foyer est nettement différente de celle observée en position centrale. Dans nos essais, nous considérons les deux positions afin de tester la robustesse de l'algorithme OBIWANE.

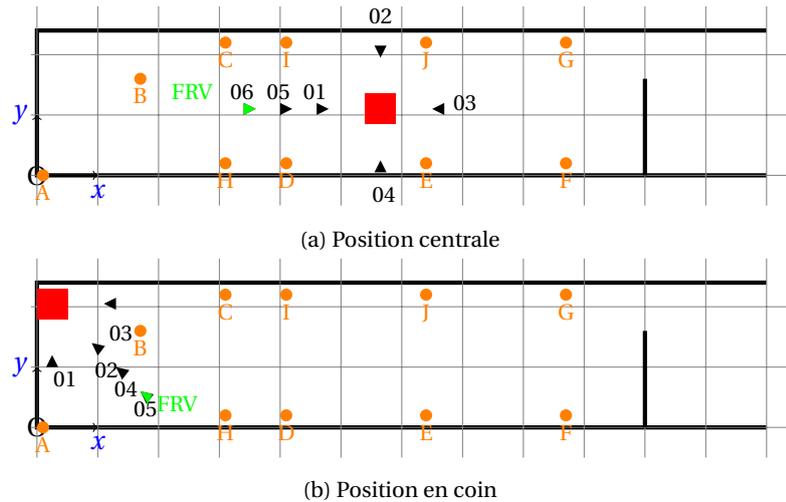


FIGURE 3.4 – En position coin, le foyer (■) se situe dans le plan  $(O,x,y)$  aux coordonnées  $(0.25,2.2)$  et à  $(5.6,1.1)$  en position centrale. Le dispositif d’essai comporte des arbres de thermocouples (●), des flux horizontaux (▶) et des flux verticaux (►).

### 3.1.2 Mesures indirectes

Les mesures indirectes, que nous réalisons lors de ces essais, portent sur la température et le flux thermique en différents points du caisson. Ces données constituent, ce que nous avons appelé dans les chapitres précédents, les observations.

Les températures sont mesurées à l’aide d’arbres de thermocouples (type K  $d=0.0015$  m, voir Figure 3.5a). Chaque thermocouple a une plage d’utilisation en température de  $T=0$  à  $1100$  °C (plage suffisante dans ces essais). Dans le caisson, nous disposons de dix arbres de thermocouples (voir Figure 3.4) dont les positions exactes sont mentionnées en annexe D.2.

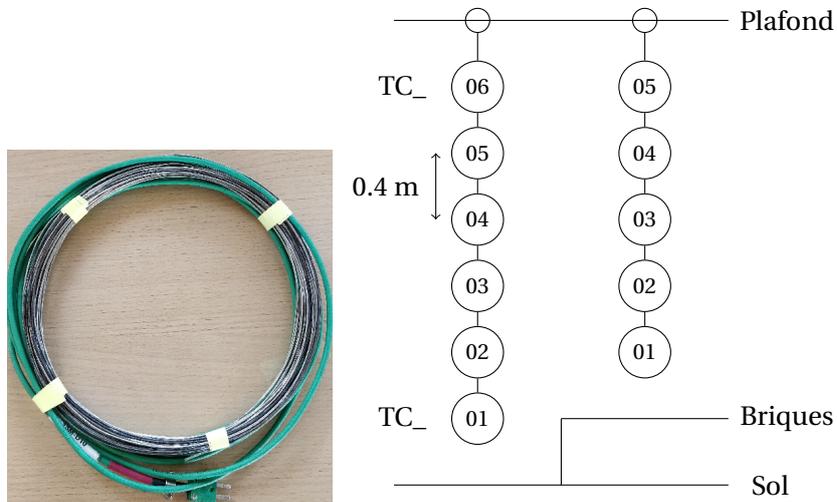
Les flux thermiques sont mesurés par des fluxmètres radiatifs non refroidis (voir Figure 3.6a). Dans le cadre de ces essais, nous nous intéressons particulièrement à la composante incidente du flux thermique, notée  $\Phi''_{inc}$  ( $\text{kW.m}^{-2}$ ). Cependant expérimentalement, un fluxmètre radiatif ne donne pas directement accès à cette mesure car ce capteur mesure le flux net. Cela ne représente pas une difficulté, car ces deux grandeurs sont liées par la relation suivante :

$$\Phi''_{inc} = \Phi''_{net} + \Phi''_{emis} \quad (3.2)$$

où le flux émis  $\Phi''_{emis}$  peut être estimé par la loi de rayonnement des corps noirs (i.e. Stefan-Boltzmann) :  $\Phi''_{emis} = \sigma T^4$  où  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ . Cette dernière composante du flux dépend de la température interne du capteur qui est aussi mesurée.

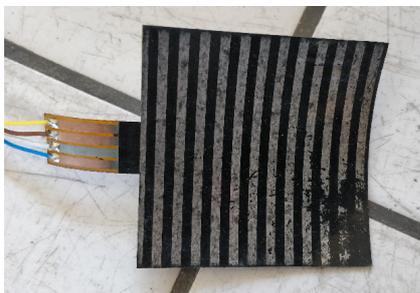
Ces capteurs sont positionnés soit à l’horizontal, soit à la verticale sur un arbre (voir Figure 3.6b). Lorsque le foyer est positionné au centre de la pièce, nous disposons quatre fluxmètres horizontaux, équidistants de 0.6 m des quatre faces du foyer. À ces quatre fluxmètres, nous ajoutons deux fluxmètres horizontaux plus lointains (situés à 1.2 et à 1.8 m d’une des faces du foyer) et trois fluxmètres verticaux situés à 1.8 m du foyer. Lorsque le foyer est positionné "en coin", nous disposons deux fluxmètres horizontaux équidistants de 0.6 m des deux faces apparentes du foyer et un troisième dans la diagonale. Comme précédemment, nous ajoutons deux fluxmètres horizontaux dans le prolongement de cette diagonale et les trois fluxmètres verticaux (voir Figure 3.4). Les positions exactes des fluxmètres figurent dans les annexes D.3 et D.4.

L’objectif dans ce chapitre étant de comparer les résultats des essais aux résultats issus de OBI-WANE, nous nous intéressons dans ce qui suit à la partie modélisation numérique.

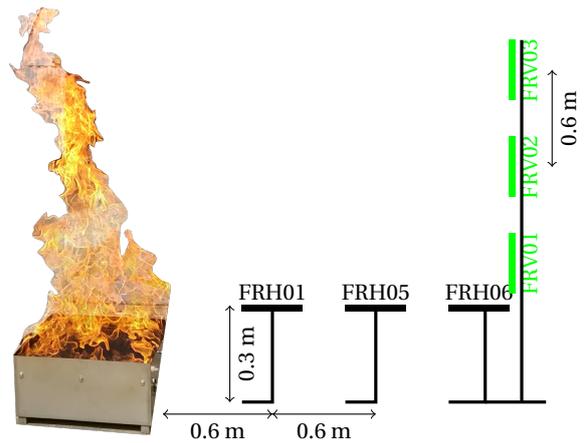


(a) Photo d'un thermocouple (b) Constitution d'arbres de six et cinq thermocouples

FIGURE 3.5 – Les thermocouples de type K de diamètre  $d = 0.0015$  m sont regroupés en arbres soit de cinq thermocouples dans la zone feu, soit de six en dehors.



(a) Photo d'un fluxmètre radiatif non refroidi



(b) Orientation et dispositions des fluxmètres par rapport au foyer

FIGURE 3.6 – Entre six et cinq fluxmètres radiatifs non refroidis (3.6a) sont positionnés horizontalement à une distance minimale de 0.6 m du bord du brûleur. À une distance de 1.8 m, se trouve un arbre de trois fluxmètres verticaux distancés de 0.6 m.

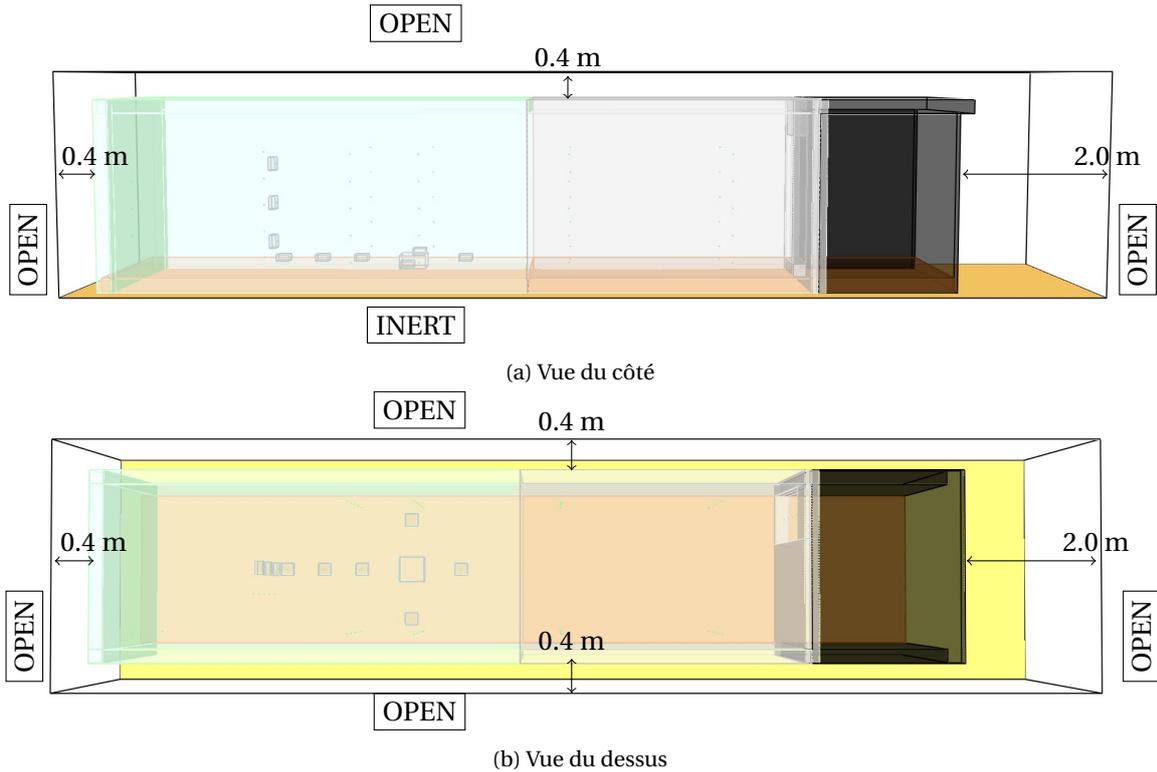


FIGURE 3.7 – Représentation du domaine de calcul au sein duquel se trouve le caisson modélisé à l'aide de cloisons.

## 3.2 Modélisation numérique des essais

### 3.2.1 Domaine et géométrie

Pour réaliser les simulations numériques qui sont impliquées dans la méthode d'optimisation itérative, nous reproduisons le "caisson", décrit dans la section précédente, avec FDS version 6 [20, 19, 22, 21] (voir Figure 3.7). Il est à noter que pour pouvoir tenir compte dans nos simulations de paramètres extérieurs (en particulier la température ambiante) les simulations sont réalisées dans un domaine numérique dont les dimensions sont supérieures à celles du caisson.

Les parois latérales et supérieures de ce domaine sont ouvertes à l'atmosphère. La paroi inférieure (i.e. le sol) est un solide inerte. À l'intérieur du domaine numérique, nous reconstruisons le "caisson" à l'aide de cloisons (i.e. OBST dans FDS) dont nous pouvons préciser la composition et l'épaisseur.

La distance entre les cloisons qui définissent le caisson et les frontières du domaine numérique est de 0.4 m sur les côtés, sur le dessus, et à l'arrière du caisson. La distance entre l'extrémité de la zone extérieure et la frontière du domaine de calcul est de 2.0 m (voir Figure 3.7). Cette distance entre la zone extérieure et la frontière du domaine a été choisie suffisamment grande pour que l'écoulement des fumées au niveau de la porte ne soit pas perturbé par les conditions aux limites.

En ce qui concerne maintenant la discrétisation du domaine numérique, il est préconisé dans le User's Guide [20] et dans le Validation Guide [21] de FDS d'utiliser une taille de maille  $\Delta_x$  (en m) qui satisfait la relation  $D^*/\Delta_x$  compris entre 5 et 20 où  $D^*$  correspond au diamètre caractéristique du foyer numérique. Ce diamètre caractéristique peut être estimé en fonction de la puissance du foyer  $\dot{Q}$  selon la relation suivante :

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty T_\infty C_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} . \quad (3.3)$$

Ce paramètre dépend aussi de la masse volumique  $\rho_\infty$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), de la température  $T_\infty$  (K), de la capacité thermique isobare massique  $C_p$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) et de l'accélération de la pesanteur  $g$  ( $\text{m.s}^{-2}$ ).

Cependant, dans le cadre de nos simulations, les dimensions du foyer restent inchangées quelle que soit la puissance qu'il dégage. En effet, ce dernier est représenté par un carré de 0.4 m de côté ( $S = 0.16 \text{ m}^2$ , surface utile hors armature). La taille de maille est fixée à 10 cm de côté ce qui correspond à un rapport  $D^* / \Delta_x$  égale à 4. Bien que cette valeur soit légèrement en dehors de celles préconisées, ce choix a été validé par une étude de sensibilité au maillage réalisée avec des mailles de 20, 10 et 5 cm, respectivement.

Dans les simulations numériques, nous faisons l'hypothèse que le combustible correspond à du propane pur. Cela implique une l'enthalpie de combustion de  $\Delta H_c = 46350 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Par défaut dans FDS, la fraction radiative du propane est définie à  $\chi_r = 0.3$  (voir [20]). Cette valeur signifie qu'environ un tiers de l'énergie produite par le foyer est rayonnée.

### 3.2.2 Conditions aux limites

L'utilisation de OBIWANE nécessite que l'ambiance thermique soit modélisée le plus finement possible. L'ambiance thermique résulte des transferts d'énergie par convection et par rayonnement au sein du domaine numérique. Dans ce contexte, le choix du modèle de turbulence qui est utilisé dans les modélisations numériques s'avère être un paramètre important.

Compte tenu de la plage de variation relativement large du débit calorifique du foyer (de 13 à 283 kW), nous nous attendons à ce que les niveaux de turbulence des écoulements produits soient assez différents d'une simulation à l'autre. De ce fait, nous avons réalisé une étude de sensibilité aux différents modèles de turbulence disponibles dans FDS. Pour ce faire, nous avons comparé l'évolution de la température en différents points de l'espace, obtenue avec différents modèles de turbulence aux résultats expérimentaux. Le modèle dit "Dynamic Smagorinsky" [10] nous a permis de reconstruire le plus finement ces températures. Il est à noter que celui-ci n'est pas le modèle par défaut dans FDS (modèle "Deardorff" [5]).

La précision avec laquelle le rayonnement est simulé dépend en grande partie du nombre d'angles solides défini par l'utilisateur. Un angle solide est une portion de l'espace, habituellement délimitée par un cône et une direction vers laquelle le foyer numérique émet une fraction du flux radiatif. Naturellement, plus le nombre d'angles solides est important et plus la répartition de cette énergie est précise. À titre d'illustration, nous comparons, sur la Figure 3.8, la modélisation numérique du flux rayonné autour de notre foyer lorsque ce nombre d'angles solides est fixé à 100 (voir Figure 3.8a), 500 (voir 3.8b) puis à 900 (3.8c). Lorsque nous comparons ces résultats, nous observons que pour 100 angles solides, le rayonnement est très anisotrope. En particulier, l'alternance entre les zones claires et sombres est très marquée. Inversement, lorsque ce nombre est fixé à 900, le rayonnement semble mieux réparti. Afin de fixer ce paramètre, nous effectuons une étude de sensibilité basée sur la comparaison du flux thermique en différentes positions pour 100, 300, 500, 700 et 900 angles solides. Une convergence de la valeur du flux radiatif est obtenue à 500, 700 et 900 angles solides. Nous optons finalement pour 500 qui semble être un bon compromis entre précision et temps de calcul. Pour indication, le temps de calcul varie, pour une même simulation, de la manière suivante : 26 h pour 500 angles solides, 33 h pour 700 angles solides, 39 h pour 900 angles solides.

### 3.2.3 Modélisation des mesures indirectes

Nous nous intéressons maintenant aux observables, les équivalents numériques des observations. Expérimentalement, les mesures indirectes s'appliquent à la température de gaz et au flux thermique, grandeurs mesurées respectivement par un thermocouple et un fluxmètre radiatif non refroidi. En pratique, la mesure de température délivrée par un thermocouple ne correspond pas

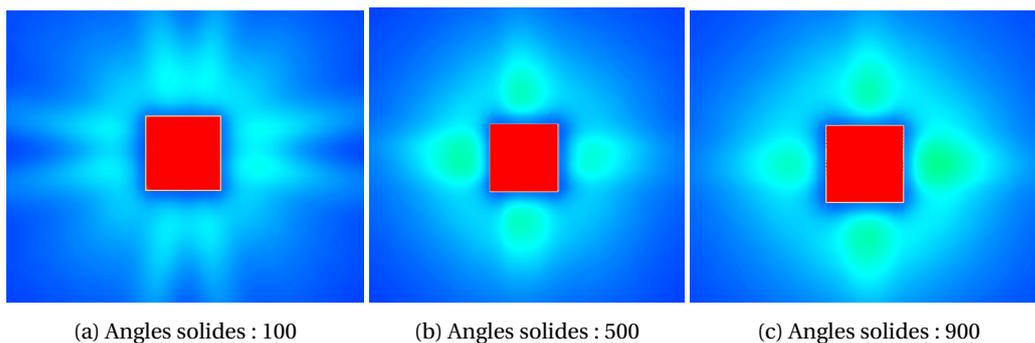


FIGURE 3.8 – La modélisation du flux thermique est plus précise avec 900 ou 500 angles solides où l'énergie est répartie quasi uniformément autour du foyer (zone très clair), au contraire du cas avec 100 angles solides pour lequel des zones sombres sont observées.

exactement à la température de gaz. Welsh démontre dans ses travaux [30] que la mesure de température issue d'un thermocouple dépend d'un équilibre thermique entre le transfert conducto-convectif et le rayonnement qui s'établit au point de soudure du thermocouple.

Dans `FDS`, la température peut être obtenue en utilisant la fonction `THERMOCOUPLE` qui tient compte alors du bilan thermique que nous venons de mentionner. Afin de faciliter la comparaison avec les résultats expérimentaux, nous définissons la fonction `THERMOCOUPLE` avec des caractéristiques semblables à celles du type des thermocouples utilisés dans les expériences.

Dans `FDS`, il existe également une fonction `INCIDENT HEAT FLUX` qui nous donne la composante du flux incident. Nous sélectionnons également cette fonction.

Dans les deux sections précédentes, nous avons présenté le dispositif expérimental, le protocole et le paramétrage du code numérique. Nous pouvons maintenant appliquer la méthode `OBI-WANE` en vue de déterminer l'évolution du débit calorifique en fonction de l'ambiance thermique des essais. Les résultats sont présentés dans la prochaine section.

Scénarios	Positions	Profils de débit $q = [\dot{Q}(t)]$	$\dot{Q}_{\max}$ kW	Phénomènes clés	Observations $y$
Scénario 1*	Centrale	Plateau simple	116	Faible gradient Phase croissante	[T]
Scénario 2*	Centrale	Plateaux croissants	116	Faible gradient Phase stationnaire	[T]
Scénario 3*	Centrale	Plateaux décroissants	116	Faible gradient Phase décroissante	[T]
Scénario 4	Centrale	Plateau simple	283	Phase stationnaire	[T]
Scénario 5	Centrale	Plateaux croissants	270	Phase croissante	[T]
Scénario 6*	Centrale	Plateaux décroissants	270	Phase décroissante	[T]
Scénario 7*	Coin	Plateau simple	116	Aéraulique Perturbée Phase stationnaire	[T]
Scénario 8	Coin	Plateaux croissants	116	Phase croissante	[T]
Scénario 9	Coin	Plateaux décroissants	116	Aéraulique Perturbée Phase décroissante	[T]
Scénario 10	Coin	Plateau simple	283	Aéraulique Perturbée Phase stationnaire	[T]
Scénario 11	Coin	Plateaux croissants	270	Aéraulique Perturbée Phase croissante	[T]
Scénario 12*	Coin	Plateaux décroissants	270	Aéraulique Perturbée Phase décroissante	[T]

TABLEAU 3.1 – Plan d'expérience des essais avec le foyer prescrit : les scénarios marqués par « \* » sont commentés précisément dans la [section 3.3](#).

### 3.3 Résultats de reconstruction du terme source

Aux cours de nos expériences, nous avons défini 12 scénarios (voir [Tableau E.1](#)). Parmi ces 12, nous en avons ici sélectionné 5 qui nous ont semblé être les plus représentatifs des essais réalisés. Les scénarios 1, 2 et 3 sont exposés afin de présenter la reconstruction des trois phases (i.e. croissante, stationnaire, décroissante) de l'évolution du débit calorifique d'un foyer d'incendie. Ensuite, dans les deux scénarios suivants, soit la position du brûleur est modifiée, soit la puissance est augmentée. Dans le scénario 7, le brûleur est déplacé de la position « centrale » vers « en coin ». Dans le scénario 5, les débits calorifiques sont plus importants que dans les quatre scénarios précédents. L'étude se poursuit avec le scénario 12 qui cumulent ces deux changements. Enfin, nous tirons les premières conclusions de l'application de la méthode OBIWANE à des essais réels.

Dans la suite, les résultats de la reconstruction des essais se présentent toujours de la manière suivante. Une étude de la vidéo de l'essai, des différentes phases et des événements importants permet d'en comprendre le déroulement. Ensuite, les principaux résultats sont commentés, à savoir la reproduction de l'évolution des observations qui permettent la reconstruction du terme source. Enfin, ces résultats sont complétés par l'analyse de la reproduction d'observations à deux autres positions dans le caisson.

#### 3.3.1 Trois phases d'évolution du débit calorifique

##### Scénario 1

Dans le scénario 1, le brûleur est en position « centrale » dans la zone feu. L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite en « plateau simple » avec un maximum fixé à 90 kW. Pour information, cet essai, qui a duré 1140 s, a été réalisé le 05 septembre 2019 par temps sec avec une température ambiante de l'ordre de 20 °C.

L'essai s'est déroulé sans incident. L'allumage du brûleur avec un débit massique  $D_m = 1 \text{ kg.h}^{-1}$  (i.e.  $\dot{Q} = 13 \text{ kW}$ ) marque le début de l'essai. Cette phase est représentée [Figure 3.9a](#). Pour une puissance aussi faible, la flamme du brûleur n'est pas stable et ne couvre pas l'ensemble de sa surface. La [Figure 3.9b](#), nous montre le dispositif expérimental lorsque le débit  $D_m$  passe à 7  $\text{kg.h}^{-1}$  soit 90 kW. Dans cette configuration, la flamme est nettement plus haute. La mise à zéro de ce même débit du brûleur définit la fin de l'essai ([Figure 3.9c](#)). Après quelques secondes, la flamme disparaît totalement ([Figure 3.9d](#)).

Les températures relevées par les arbres de thermocouples (voir en annexe [Figure E.2](#)) permettent de révéler les variations temporelles du débit calorifique. Les valeurs des flux thermiques sont très faibles (i.e.  $\Phi'' < 1 \text{ kW.m}^{-2}$ ) pour les faibles puissances. Nous privilégions donc pour ce scénario l'utilisation des températures comme observations. Parmi ces données, nous sélectionnons les 5 températures issues de l'arbre D ([Figure E.1b](#)) comme observations de référence pour la méthode OBIWANE. Ces données nous permettent de reconstruire l'évolution du débit calorifique du brûleur impliquée dans le scénario 1 en approximativement 8 jours de calculs. Cette durée relativement importante s'explique par le maillage fin utilisé dans FDS et par le nombre d'itérations du processus (i.e. 38 itérations de 30 s qui impliquent chacune 20 simulations).

Les observations sur l'arbre D ([Figure E.1b](#)) sont assez bien reproduites avec des écarts de l'ordre de 10 °C à l'exception du thermocouple TC\_D\_05. Pour ce dernier, les écarts sont plus importants, jusqu'à 35 °C pour des températures de l'ordre de 160 °C. Ce thermocouple TC\_D\_05 se trouve être le point le plus haut sur l'arbre D et par conséquent, le plus près du plafond. Expérimentalement, ce point de mesure se situe dans une zone où le gradient de température est fort et n'est pas forcément très bien reproduit par la simulation numérique, en particulier pendant la phase transitoire qui succède le changement de consigne (à  $t = 440 \text{ s}$ ). Nous reviendrons sur ce point lorsque nous discuterons les résultats des scénarios avec des foyers à plus forte puissance.

Nous nous intéressons maintenant à l'évolution du débit calorifique ([Figure E.1a](#)). La première

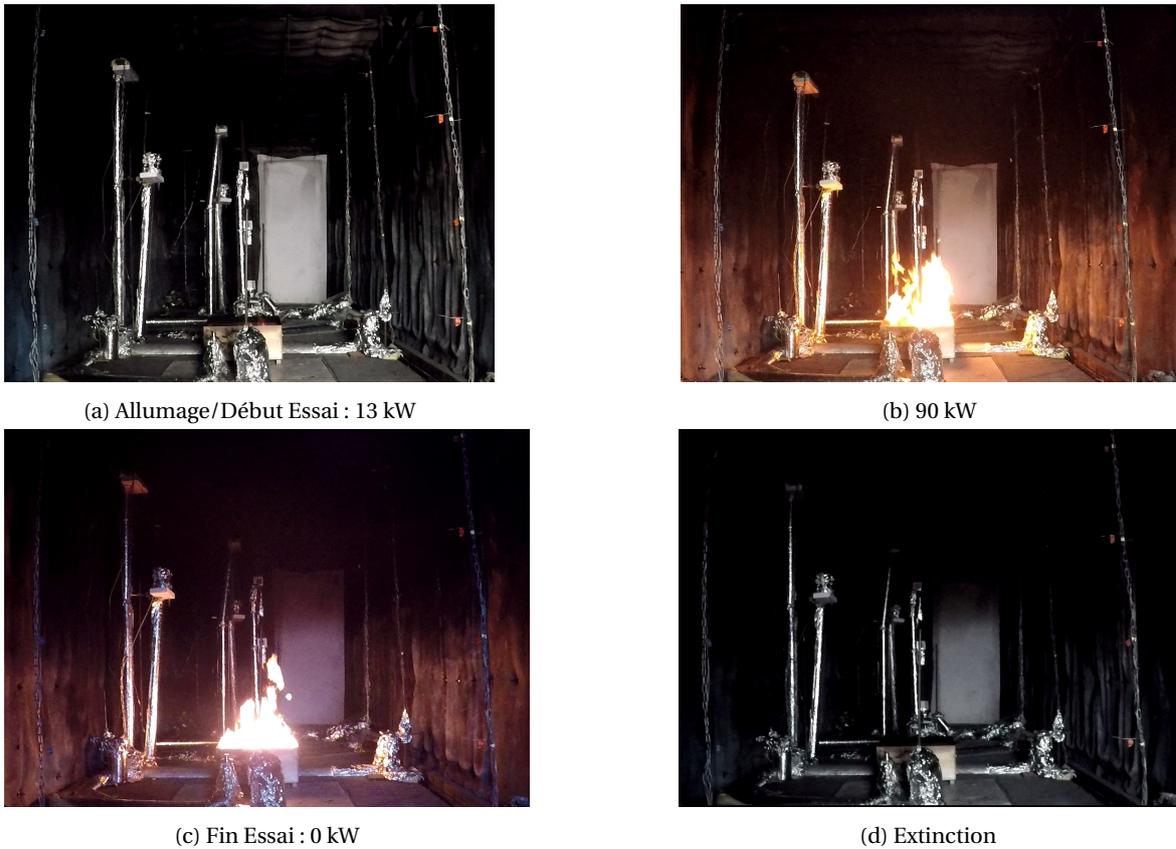
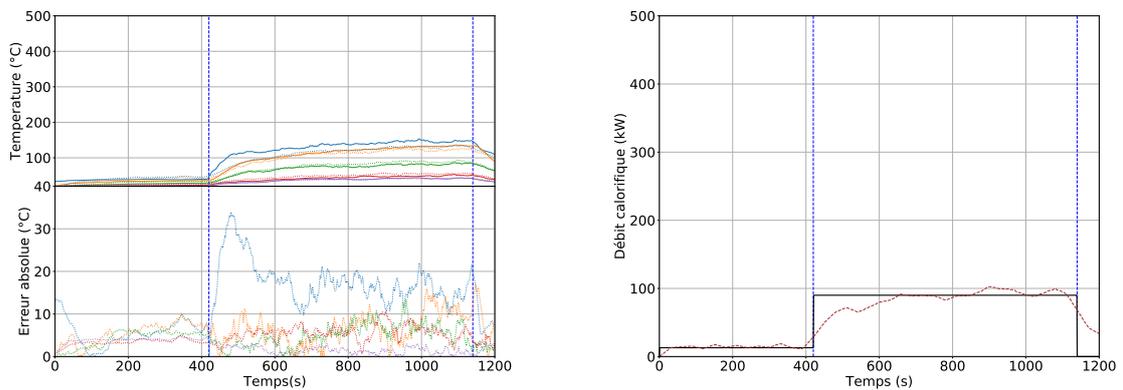


FIGURE 3.9 – Déroulement du scénario 1



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_D\_05 en —, TC\_D\_04 en —, TC\_D\_03 en —, TC\_D\_02 en — et TC\_D\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 3.10 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 1

observation que l'on peut faire est qu'à  $t_0$ , le débit calorifique  $\dot{Q}$  du brûleur n'est pas nul tandis qu'il l'est dans les simulations numériques. Le déficit doit être comblé en prescrivant une augmentation brutale du débit calorifique  $\dot{Q}_{\text{cal}}$  dans la simulation. Cette différence est comblée en une itération (soit 30 s). À partir de là, nous observons de légères fluctuations autour de la valeur imposée par la consigne. Ces fluctuations s'expliquent par le fait que notre méthode s'appuie sur des mesures indirectes. En effet, dans les expériences, les températures fluctuent naturellement, comme représenté dans E.1b, du fait de l'aérodynamique et en particulier de la turbulence. Or, OBIWANE est appliqué à reproduire ces variations en agissant sur le débit calorifique  $\dot{Q}_{\text{cal}}$ .

Une seconde observation est que la méthode détecte avec un temps d'avance la modification de la consigne (i.e. passage d'un plateau à l'autre) qui se produit au temps  $t=440$  s. Ce comportement est attendu du fait d'un intervalle d'exploration  $\Delta t_{\text{exp}}=60$  s pour un intervalle d'estimation à  $\Delta t_{\text{est}}=30$  s. Cependant, la pente calculée est sous évaluée par rapport à celle de la consigne, qui est ici quasiment verticale. Dans ce cas de figure, nous observons que OBIWANE met un temps relativement long, de l'ordre de six ou sept itérations (environ 200 s), pour estimer une valeur proche de celle de la consigne. En pratique, cela ne devrait tout de même pas trop prêter à conséquence pour son utilisation dans le cas de vrais feux pour lesquels, les variations du débit calorifique sont plus douces.

Dans cette expérience, la valeur de  $\dot{Q}$  estimée par OBIWANE ne redescend pas à zéro à  $t_{\text{fin}}$  (i.e. fin de l'expérience). C'est une des limites de la seule utilisation de températures mesurées car ces dernières possèdent une certaine inertie. Ce point particulier sera discuté plus en détails lorsque nous présenterons les expériences menées avec une consigne en « plateaux décroissants ».

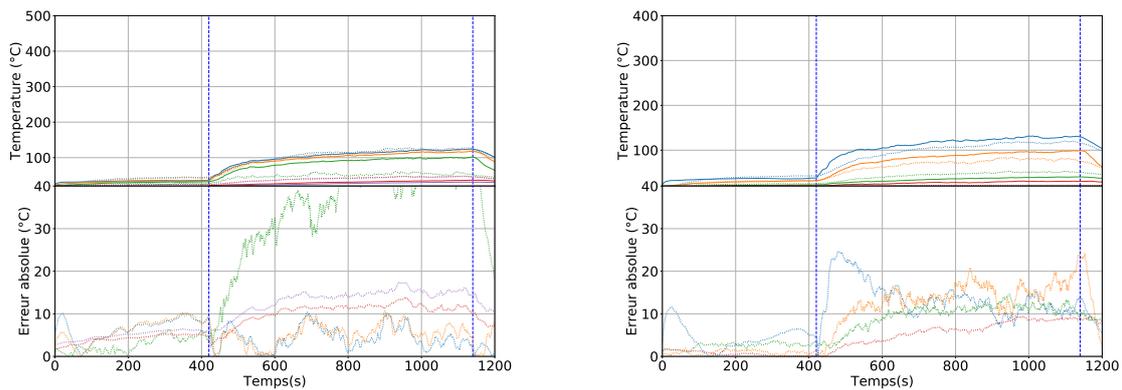
Une autre remarque que nous pouvons effectuer concerne le bon accord entre l'expérience et la méthode OBIWANE sur la puissance totale. Compte tenu de la consigne imposée, l'énergie totale injectée expérimentalement pour ce scénario est de  $E=13 \times 440 + 700 \times 90 = 68720$  kJ. L'énergie totale dégagée par l'évolution du débit calorifique estimée numériquement vaut  $E_{\text{cal}}=66462$  kJ, soit une erreur relative de 3.3 %. Notons que cette dernière valeur d'énergie est calculée par la méthode des trapèzes<sup>2</sup> appliquée à la courbe d'évolution du débit calorifique.

Les observations effectuées aux positions de l'arbre A, G ainsi que les observables, sont représentées Figure 3.11. Ces arbres représentent des positions extrêmes dans le caisson, le premier étant dans un coin de la zone feu et le second se trouvant face à l'unique porte de sortie (voir Figure 3.5b).

À ces deux positions, les observations sont aussi bien reproduites que celles sur l'arbre D. Les écarts sont globalement inférieurs à  $20^\circ\text{C}$  pour des températures atteignant au maximum  $130^\circ\text{C}$ . Nous pouvons remarquer que la température TC\_A\_03 de l'arbre A est sous évaluée par OBIWANE et l'écart atteint  $40^\circ\text{C}$  pour une mesure à  $100^\circ\text{C}$ . Cette différence s'expliquerait par le positionnement du thermocouple à l'interface entre la couche chaude des fumées et la couche froide de l'air ambiant. Cette interface semble être plus marquée dans l'essai que dans la simulation numérique.

---

2. Méthode de calcul d'une intégrale



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_A\_05 en —, TC\_A\_04 en —, TC\_A\_03 en —, TC\_A\_02 en — et TC\_A\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_G\_06 en —, TC\_G\_05 en —, TC\_G\_04 en —, TC\_G\_03 en — et TC\_G\_02 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

FIGURE 3.11 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 1

## Scénario 2

Dans le scénario 2, le brûleur est en position « centrale » dans la zone feu. L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite en « plateaux croissants » avec un maximum fixé à 116 kW. Pour information, cet essai, qui a duré 1800 s, a été réalisé le 11 septembre 2019 par temps nuageux avec une température ambiante de l'ordre de 20 °C.

Après l'allumage (voir Figure 3.12a), la consigne en plateaux croissants est prescrite conformément à celle prévue. Les photographies b, c, d, e montrent les flammes dégageant une puissance de 39, 64, 90 et 116 kW, respectivement.

Comme pour le scénario 1, nous sélectionnons les cinq températures mesurées par les thermocouples de l'arbre D comme observations. OBIWANE reconstruit l'évolution du débit calorifique du brûleur lors de cet essai en 11 jours.

L'évolution des observations (voir E.3b) est très bien reproduite avec des écarts inférieurs à 10 °C globalement. L'observable sur TC\_D\_03 est toutefois supérieure à l'observation lors de l'essai avec un écart de 25 °C environ pour une mesure proche de 100 °C. Cette dernière température se situe à proximité de l'interface thermique entre la couche chaude et froide. Il semblerait que la couche chaude calculée par FDS occupe un volume plus important. De ce fait, l'interface thermique est plus basse que lors de l'expérience. Étant donné la dégradation de la position de cette interface avec l'augmentation de la puissance, cette hypothèse est à confirmer lors de l'étude des scénarios à plus forte puissance.

La Figure E.3a représente l'évolution du débit calorifique prescrit au brûleur et celle estimée par la méthode. Globalement, sur l'ensemble de l'essai, la dynamique de la consigne est reconstruite sans toutefois, retrouver les valeurs de débit calorifique prescrites au brûleur. Nous pouvons alors nous demander ce que représente ce surplus d'énergie sur l'ensemble du scénario. L'énergie totale prescrite vaut  $E=115\,801$  kJ. Cette valeur est très inférieure à celle du terme source reconstruit par OBIWANE, soit  $E_{\text{cal}}=176\,000$  kJ ce qui constitue une erreur relative supérieure à 50%.

L'évolution de ces températures sont bien reproduites à deux exceptions. Les écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées sont globalement inférieurs à 20 °C pour des températures qui atteignent 160 °C. Sur l'arbre G, les températures TC\_G\_04 et TC\_G\_03 sont assez mal reproduites en fin d'essai avec des écarts supérieurs à 20 °C. Au même titre que sur l'arbre D, l'épaisseur de la couche chaude calculée par FDS pourrait être plus importante que celle de l'essai.



(a) Allumage/Début Essai : 13 kW



(b) 39 kW



(c) 64 kW



(d) 90 kW

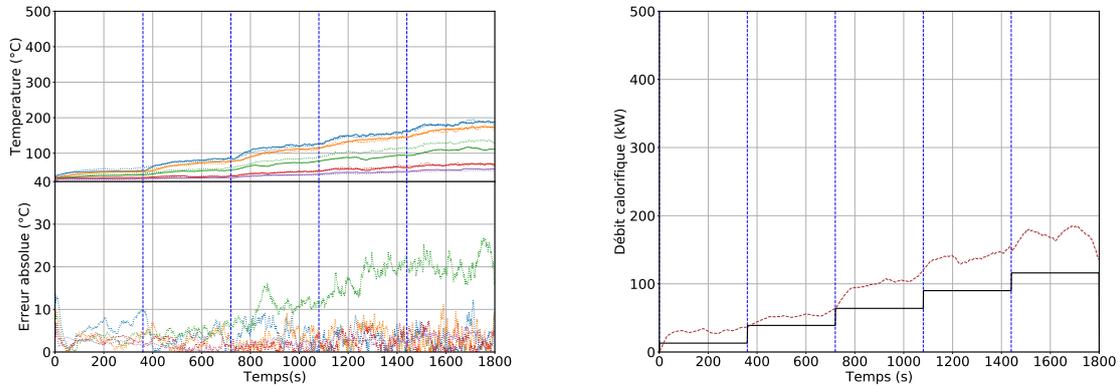


(e) 116 kW



(f) Fin Essai : 0kW

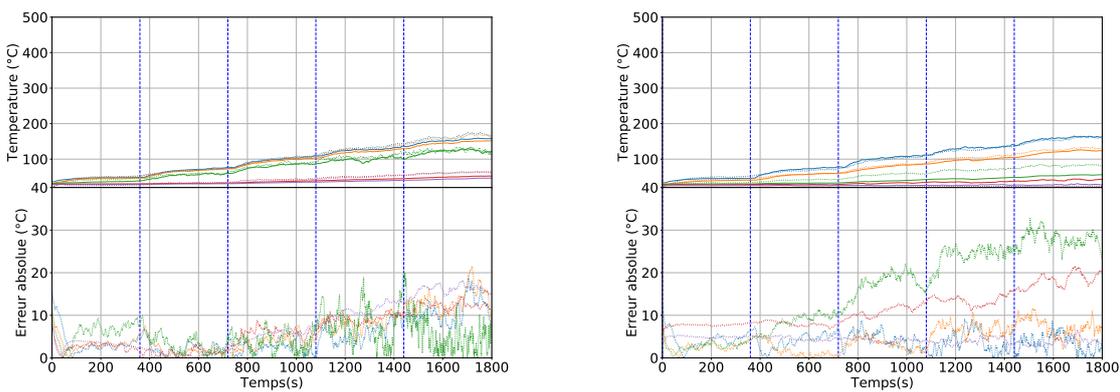
FIGURE 3.12 – Déroulement du scénario 2



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_D\_05 en —, TC\_D\_04 en —, TC\_D\_03 en —, TC\_D\_02 en — et TC\_D\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 3.13 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 2



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_A\_05 en —, TC\_A\_04 en —, TC\_A\_03 en —, TC\_A\_02 en — et TC\_A\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_G\_06 en —, TC\_G\_05 en —, TC\_G\_04 en —, TC\_G\_03 en — et TC\_G\_02 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

FIGURE 3.14 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 2

### Scénario 3

Dans le scénario 3, le brûleur est en position « centrale » dans la zone feu. L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite en « plateaux décroissants » avec un maximum fixé à 116 kW. Pour information, cet essai, qui a duré 2160 s, a été réalisé le 11 septembre 2019 par temps sec avec une température ambiante de l'ordre de 20 °C.

L'essai débute avec la prescription du débit maximal  $D_m = 9 \text{ kg.h}^{-1}$  (i.e.  $\dot{Q}=116 \text{ kW}$ , Figure 3.15a). La consigne prévue est ensuite suivie, comme le montrent les photos c, d, e, f où les flammes dégagent respectivement une puissance de 90, 64, 39 et 13 kW.

Nous sélectionnons les cinq températures mesurées par les thermocouples de l'arbre D comme observations. OBIWANE reconstruit l'évolution du débit calorifique du brûleur lors de cet essai en 12 jours.

L'évolution des observations (voir E.5b) est très bien reproduite avec des écarts globalement inférieurs à 10 °C. Nous observons un écart plus important de 25 °C sur le TC\_D\_05 entre  $t_0$  et  $t=100$  s, qui diminue par la suite. Notons que les observations accusent un léger retard à la diminution. Ce fait serait dû à une faible dissipation de l'énergie par le thermocouple utilisé pour ces essais.

Globalement, l'évolution du débit calorifique de cet essai est bien reconstruite par OBIWANE. Après  $t=250$  s, la valeur du plateau de débit calorifique estimée est supérieure à celle de la consigne. L'écart entre ces deux données est de 30 kW environ. Ensuite, au premier changement de consigne à  $t=720$  s, la diminution de débit calorifique n'est pas anticipée par OBIWANE. Ce fait illustre une différence avec la reproduction des deux scénarios précédents. La faible différence de températures (i.e. inférieur à 20 °C pour des températures mesurées à 180 °C, voir Figure 3.16) entre les deux plateaux de puissances pourrait expliquer ce résultat. Aux changements de consignes suivants (i.e. à  $t=1080$ , 1440 et 1800 s), la différence de températures est plus importante. Les changements de consigne sont de nouveau anticipés. Notons tout de même qu'aux deux derniers plateaux, les valeurs de débit calorifique ne stagnent qu'après 7 itérations environ. Ce résultat est dû au retard à la diminution des observations.

Finalement, les légères sur évaluations des valeurs du débit calorifique à chaque plateau engendrent une énergie totale plus importante que lors de l'essai. La consigne prescrite produit une énergie totale égale à  $E=157\,564 \text{ kJ}$  contre  $E_{\text{cal}}=192\,926 \text{ kJ}$  pour la reconstruction numérique, soit une erreur relative de 22 %. Ce résultat reste donc correct étant donné la très bonne reproduction des observations sur l'arbre D.

L'évolution des températures mesurées sur les arbres A et G (voir Figure 3.17) est globalement bien reproduite avec des écarts inférieurs à 20 °C à l'exception de la mesure effectuée au TC\_A\_03. En effet, à cette position, la valeur mesurée est inférieure à celle calculée par la méthode, avec un écart qui dépasse 40 °C pour une mesure à 120 °C environ. Ce résultat est identique à celui déjà observé lors de la reproduction du scénario 1 (voir Figure 3.11b) où, à la même position, FDS calcule une épaisseur de couche chaude plus importante que lors de l'essai. Le code semble donc en difficulté sur la physique des écoulements dans les coins.

### Résumé

Les résultats les plus marquants sont synthétisés dans le Tableau 3.2. D'après les résultats précédents, la méthode OBIWANE est en capacité d'estimer l'évolution du débit calorifique d'un foyer à faible puissance et de reconstituer l'évolution des températures associées. La position de l'interface thermique et les écoulements dans les coins ne sont toutefois pas modélisés correctement.



(a) 116 kW



(b) 90 kW



(c) 64 kW



(d) 39 kW

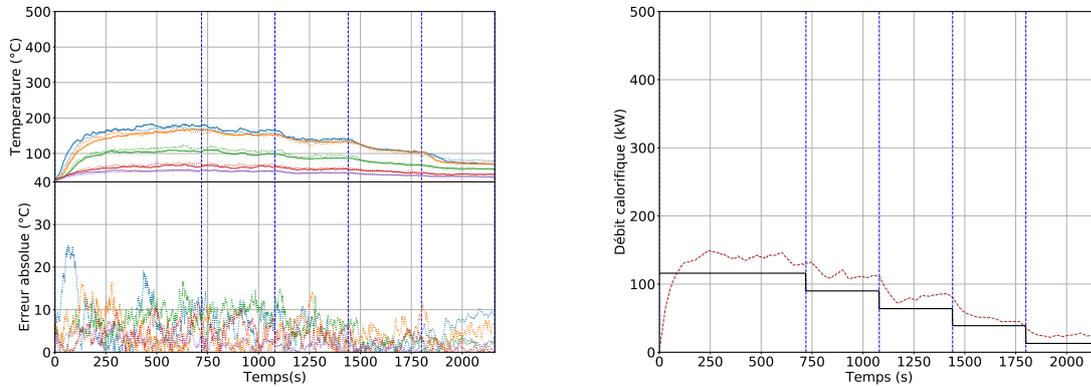


(e) 13 kW



(f) 0 kg.h<sup>-1</sup>

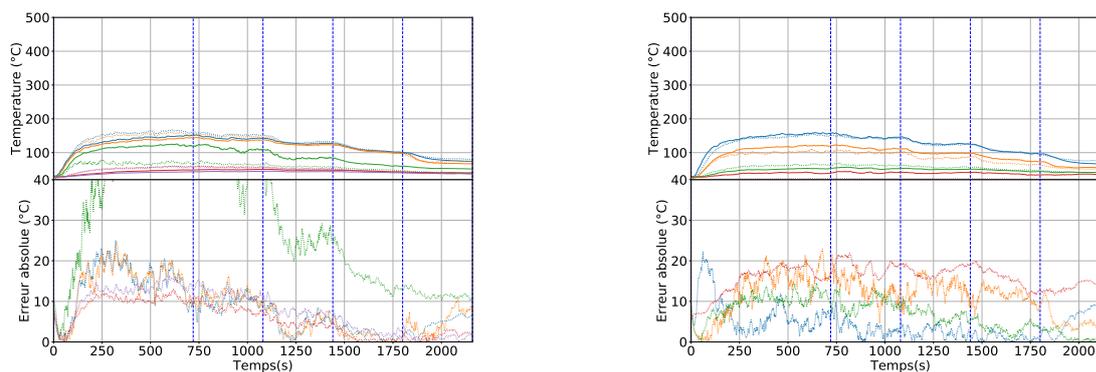
FIGURE 3.15 – Déroulement du scénario 3



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_D\_05 en —, TC\_D\_04 en —, TC\_D\_03 en —, TC\_D\_02 en — et TC\_D\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 3.16 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 3



(a) Les températures mesurées sont représentées par TC\_A\_05 : —, TC\_A\_04 : —, TC\_A\_03 : —, TC\_A\_02 : —, TC\_A\_01 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) Les températures mesurées sont représentées par TC\_G\_06 : —, TC\_G\_05 : —, TC\_G\_04 : —, TC\_G\_03 : —, TC\_G\_02 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

FIGURE 3.17 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 3



FIGURE 3.18 – Déroulement du scénario 7

### 3.3.2 Difficultés supplémentaires

#### Scénario 7

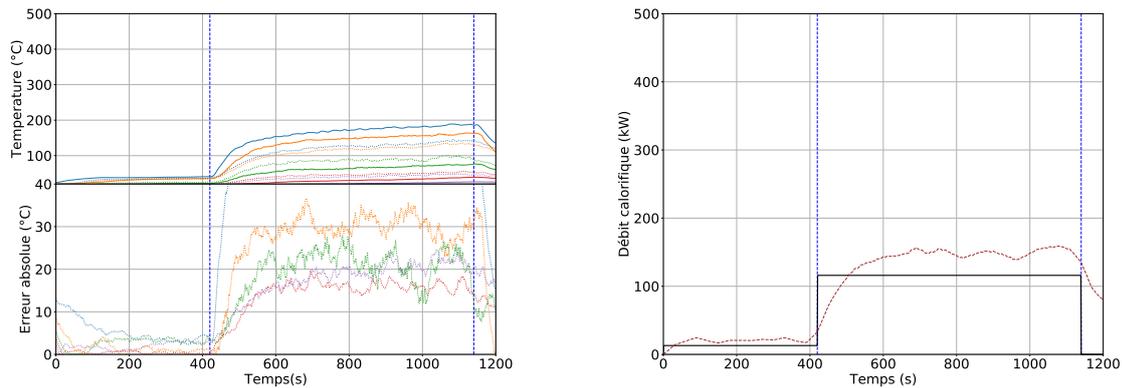
Dans le scénario 7, le brûleur est en position « coin » dans la zone feu. L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite « plateau simple » avec un maximum fixé à 116 kW. Il est à noter que cette essai, qui a duré 1140 s, a été réalisé le 04 février 2020 par un temps venteux et humide avec une température ambiante de l'ordre de 10 °C.

Après l'allumage, la flamme n'est pas visible étant donné le faible débit calorifique (voir [Figure 3.18a](#)). Le débit est ensuite fixé à  $D_m=9 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  ce qui crée une flamme plus volumineuse mais qui n'est pas distinguable sur la photographie [3.18b](#). Le débit calorifique est alors de 116 kW. La fin de l'essai est définie par la remise à zéro du débit ([3.18c](#)).

Étant donné le changement de position du brûleur, nous sélectionnons les cinq températures mesurées sur l'arbre C (voir [Figure 3.19](#)) comme observations. Cet arbre, à l'image de l'arbre D pour le foyer en position centrale des scénarios présentés précédemment, regroupe les mesures de températures les plus proches. L'évolution du débit calorifique du brûleur est reconstruit en 8 jours.

L'évolution des observations ([Figure 3.19a](#)) est mal reproduite avec un écart supérieur à 40 °C pour une mesure qui atteint au maximum 180 °C sur TC\_C\_05. La stratification thermique de l'essai est mal modélisée. Les observations en partie haute sont sous-estimées alors que celles en partie basse, sont surévaluées. Dans les scénarios précédents et sur l'arbre A, les phénomènes thermiques dans un coin ne sont pas reproduites.

Cette mauvaise reproduction des observations n'a pas un impact négatif sur la reconstruction du débit calorifique. Globalement, l'évolution du débit calorifique estimée par OBIWANE est supérieure à celle de la consigne d'environ 30 kW pour le plateau de puissance. En effet, les écarts entre les observations et les observables en partie haute et basse se compensent ce qui permet la



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_C\_05 en —, TC\_C\_04 en —, TC\_C\_03 en —, TC\_C\_02 en — et TC\_C\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- . -).

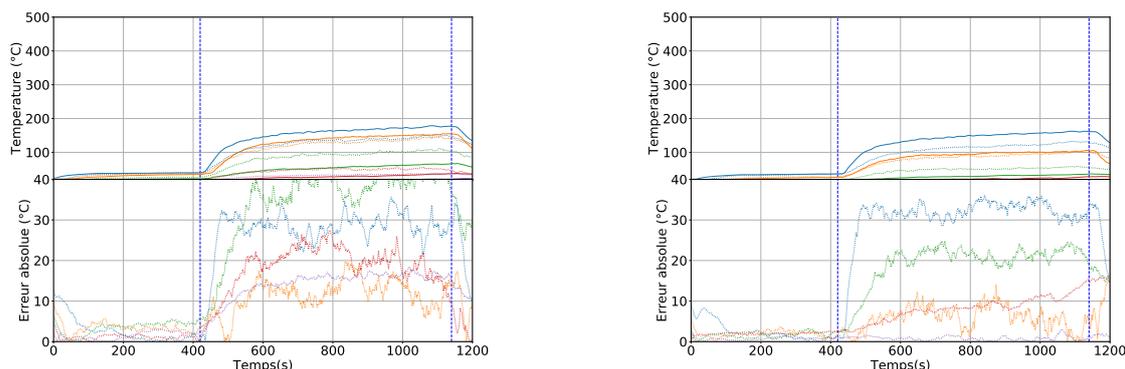
FIGURE 3.19 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 7

reconstruction d'un terme source, que nous pouvons qualifier de « solution d'équilibre ». Notons que cette reconstruction du terme source présente des similitudes avec celle du scénario 1. Par exemple, au premier changement de consigne, l'évolution du débit calorifique est anticipée par OBIWANE mais atteint une valeur quasiment constante après 2 itérations.

L'énergie totale obtenue lors de l'essai vaut  $E=88\,864$  kJ contre 108 228 kJ produite par l'évolution du débit calorifique estimée par OBIWANE, soit une erreur relative de 21 %.

Sur les arbres D et G (voir Figure E.13), le constat effectué sur l'arbre C est confirmé. En effet, les observations les plus hautes sont mal reproduites et sous-estimées de  $20^\circ\text{C}$  à  $35^\circ\text{C}$ . Au contraire, les observations en partie basse sont surestimées avec des écarts de  $20^\circ\text{C}$ .

Ces derniers résultats permettent d'élargir le constat effectué sur l'arbre C. Le foyer, positionné en coin, génère une stratification thermique que le code ne parvient pas à reproduire, malgré un terme source prescrit proche de la consigne du brûleur. La reconstruction du terme source est permise par un effet de compensation des erreurs sur les observations. De plus, visuellement à cette position, la flamme du foyer est plus haute qu'en position centrale. Il semble que FDS sous-estimerait la hauteur de flamme dans ce cas. La couche chaude contiendrait alors moins d'énergie que lors de l'essai ce qui entraîne des températures plus basses en partie haute.



(a) Les températures mesurées sont représentées par TC\_D\_05 : —, TC\_D\_04 : —, TC\_D\_03 : —, TC\_D\_02 : —, TC\_D\_01 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) Les températures mesurées sont représentées par TC\_G\_06 : —, TC\_G\_05 : —, TC\_G\_04 : —, TC\_G\_03 : —, TC\_G\_02 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

FIGURE 3.20 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 7

### Scénario 6

Dans le scénario 6, le brûleur est en position « centrale ». L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite en « plateaux décroissants » avec un maximum fixé à 270 kW. Notons que cet essai, qui a duré 1800 s, a été réalisé le 03 février 2020 par un temps humide avec une température ambiante de l'ordre de 15 °C.

Environ 90 s (soit 1 min et 30 s) après la prescription du débit massique de  $D_m = 21 \text{ kg.h}^{-1}$  (i.e. 270 kW, voir Figure 3.21a), nous observons une chute de la puissance marquée par une diminution de la hauteur de flamme (Figure 3.21b). Ce phénomène ne dure finalement que 20 s environ. Les photographies d, e, f, g, h nous illustrent des flammes d'une puissance de 270, 232, 193, 155, 116 kW respectivement. La fin de l'essai est définie par la remise à zéro du débit massique (Figure 3.21h).

Étant donné la position « centrale » du brûleur, nous sélectionnons les cinq températures mesurées par les thermocouples de l'arbre D comme observations. L'évolution du débit calorifique du brûleur est reconstruite en 13 jours.

L'évolution des observations est bien reconstituée avec des écarts inférieurs à  $T=20^\circ \text{C}$ . Sur le TC\_D\_03, les écarts dépassent la valeur annoncée entre  $t=500 \text{ s}$  et  $t=1000 \text{ s}$ . Du fait de son positionnement, *a priori*, près de l'interface thermique, l'observation est ici très bruitée, ce qui explique en partie cet écart plus important. Notons que la chute du débit est observée particulièrement à la position TC\_D\_05, la plus haute de l'arbre D.

Cette reproduction de l'évolution des observations sur l'arbre D est permise par une surévaluation globale du terme source par OBIWANE. L'écart entre ces évolutions est de l'ordre de 200 kW au premier plateau et diminue très fortement sur la fin de l'essai, avec une valeur de 30 kW environ. Cet écart est comparable à celui obtenu lors de la reproduction du scénario 2 à puissance équivalente. La valeur du débit calorifique du premier plateau supérieure à la consigne pourrait s'expliquer par une mauvaise modélisation de la croissance de l'observation sur le TC\_D\_05 en partie haute sur l'arbre D. Notons que la chute du débit calorifique lors de l'essai est peu captée par la méthode. Seule une très courte phase stationnaire permet d'identifier le phénomène. Ce résultat s'explique par un temps caractéristique du phénomène inférieur à l'intervalle d'exploration, le rendant par conséquent « invisible » à la méthode OBIWANE.

Lors de l'essai, l'énergie totale dégagée est égale à  $E=347\,490 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Numériquement, le terme source estimé par OBIWANE produit une énergie égale à  $E=508\,115 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , soit une erreur relative de 46%. Ce résultat n'est pas étonnant du fait du fort écart dès le premier plateau de puissance.



(a) Début Essai : 270 kW



(b) Chute du débit



(c) 270 kW



(d) 232 kW



(e) 193 kW



(f) 155 kW

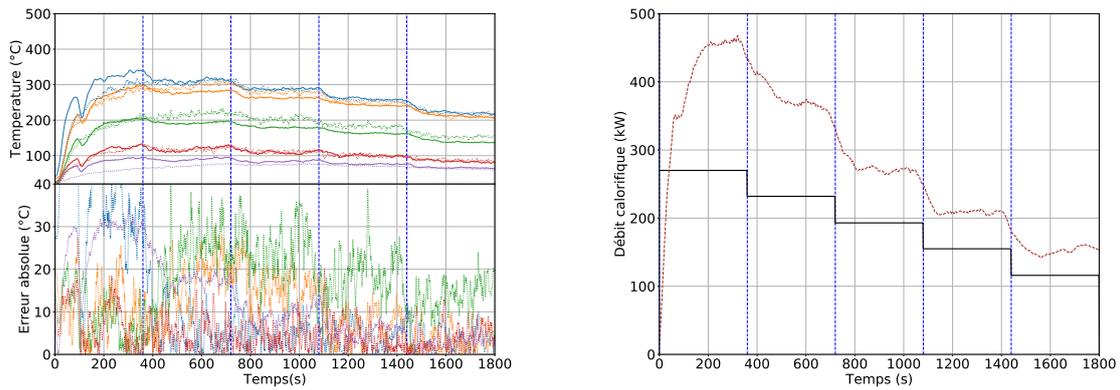


(g) 116 kW



(h) Fin Essai : 0 kW

FIGURE 3.21 – Déroulement du scénario 6



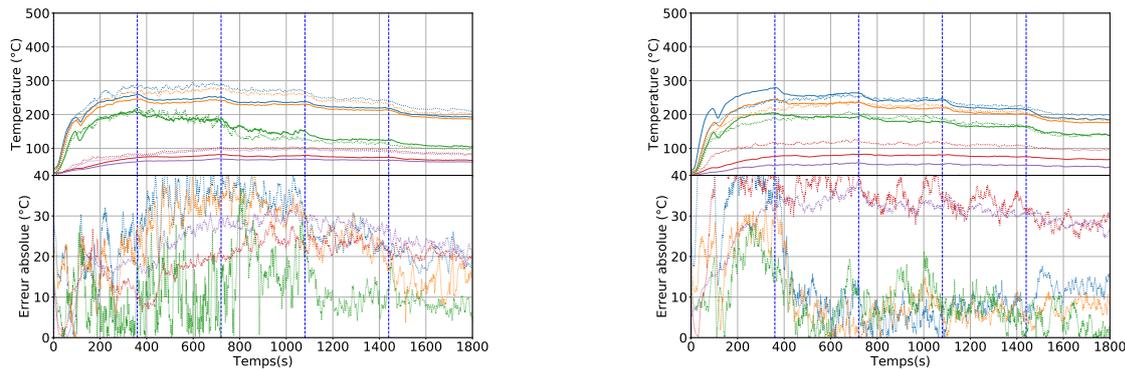
(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_D\_05 en —, TC\_D\_04 en —, TC\_D\_03 en —, TC\_D\_02 en — et TC\_D\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 3.22 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 6

Sur l'arbre A (voir [Figure 3.23](#)), l'évolution des observations n'est pas reproduite. Étant donné la position de l'arbre, ce résultat n'est pas étonnant et confirme les remarques déjà effectuées. Sur l'arbre G, deux tendances peuvent être distinguées. Les observations en partie haute sont très bien reproduites avec des écarts globalement inférieurs à 15 ° C. Les observations en partie basse sont au contraire surestimées avec des écarts supérieurs à 30 ° C. Il semble alors que la couche chaude modélisée par [FDS](#) occupe, à cette position, un volume plus important.

Dans ce scénario, la bonne reproduction tant de l'évolution des observations que de la stratification sur l'arbre D sont permises par un surplus de puissance estimé par OBIWANE.



(a) Les températures mesurées sont représentées par TC\_A\_05 : —, TC\_A\_04 : —, TC\_A\_03 : —, TC\_A\_02 : —, TC\_A\_01 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) Les températures mesurées sont représentées par TC\_G\_06 : —, TC\_G\_05 : —, TC\_G\_04 : —, TC\_G\_03 : —, TC\_G\_02 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

FIGURE 3.23 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 6

## Scénario 12

Dans le scénario 12, le brûleur est en position « coin ». L'évolution du débit calorifique suit la consigne dite en « plateaux décroissants » avec une puissance maximale fixée à 270 kW. Notons que cet essai, qui a duré 1800 s, a été réalisé le 04 février 2020 sous un temps humide et venteux avec une température ambiante de l'ordre de 13 °C.

Environ 90 s (soit 1 min 30 s) après la prescription du débit massique  $D_m = 21 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , le débit chute brusquement (Figure 3.24b). Entre les photographies b et c, nous observons une nette diminution de la taille de la flamme. Ensuite, la consigne en plateaux décroissants est programmée comme prévu et les photographies d, e, f, g, h en attestent. Les foyers capturés par ces images dégagent respectivement des débits calorifiques de 270, 232, 193, 155 et 116 kW.

Du fait de la position en coin du brûleur, nous sélectionnons les cinq températures mesurées par les thermocouples de l'arbre C comme observations. OBIWANE reconstruit l'évolution du débit calorifique du brûleur en 14 jours.

L'évolution des observations (Figure 3.25a) sur l'arbre C est mal reproduite. En partie haute, ni la dynamique, ni l'intensité des observations ne sont reproduites. En partie basse, l'évolution est bien reproduite avec des écarts égaux à 20 °C pour des mesures au maximum à 140 °C environ.

Globalement, l'évolution du débit calorifique est surévaluée par OBIWANE avec un écart de 50 kW, qui reste constant tout au long de la reconstruction du terme source. Nous observons qu'après  $t_0$ , OBIWANE accuse un retard important d'environ 10 itérations pour estimer la valeur du premier plateau. Ce résultat s'explique par la mauvaise modélisation de la phase de croissance des observations les plus hautes sur l'arbre C. Lors des changements de consignes, l'évolution du débit calorifique à la baisse n'est pas anticipé. En effet, comme indiqué dans le paragraphe précédent, les observations diminuent très peu. La méthode OBIWANE ne détecte alors pas de baisse importante et n'estime pas de débit calorifique qui suit cette évolution. Notons que la chute de puissance est reconstruite comme une phase stationnaire par OBIWANE.

La consigne en plateaux décroissants engendre une énergie totale de  $E = 347\,490 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  contre  $E = 396\,905 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour le terme source reconstruit par la méthode OBIWANE, soit une erreur relative de 14 %. Ce résultat ne peut être satisfaisant étant donné la mauvaise reproduction des observations sur l'arbre C.



(a) Début Essai : 270 kW



(b) Chute débit calorifique



(c) Reprise consigne 270 kW



(d) 232 kW



(e) 193 kW



(f) 155 kW

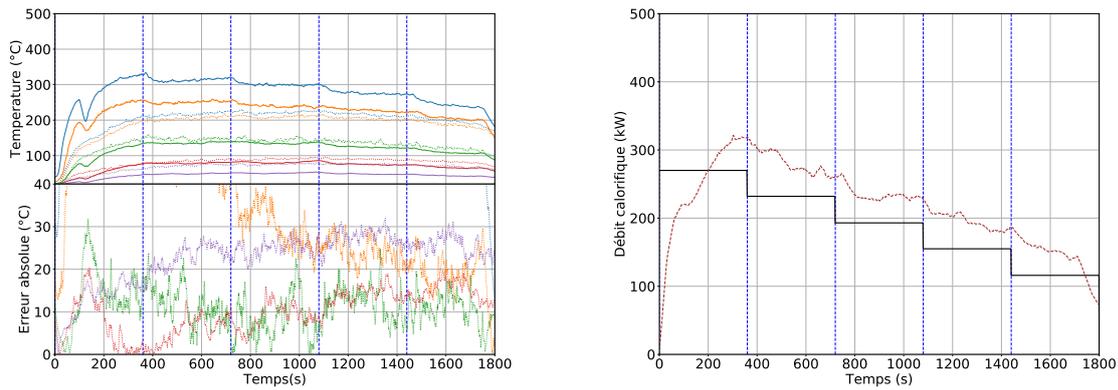


(g) 116 kW



(h) Fin Essai : 0 kW

FIGURE 3.24 – Déroulement du scénario 12



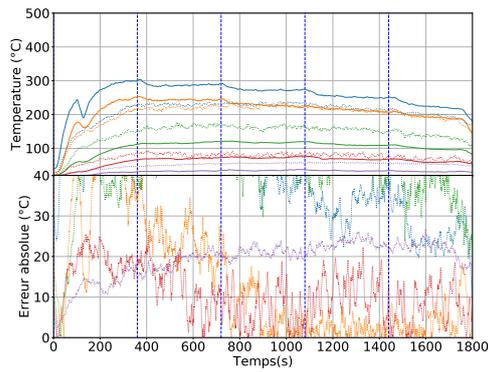
(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_C\_05 en —, TC\_C\_04 en —, TC\_C\_03 en —, TC\_C\_02 en — et TC\_C\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente la consigne du brûleur, modifiée à cinq reprises comme indiquée par les droites (- - -). L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

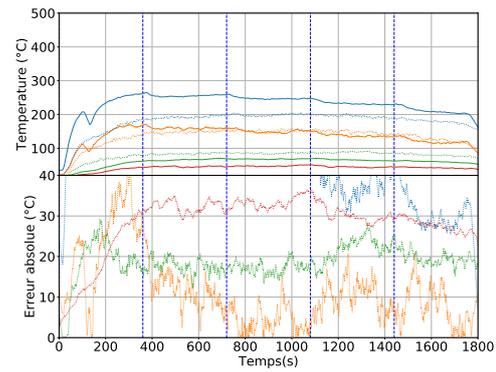
FIGURE 3.25 – Principaux résultats obtenus pour le scénario 12

L'évolution des observations sur les arbres D et G (voir [Figure E.23](#)) n'est pas reproduite. Nous pouvons observer que lors de l'essai, entre le thermocouple le plus haut et le plus bas d'un arbre, les valeurs des observations sont très éloignées. Par exemple, sur l'arbre A, cette différence de valeur atteint environ 240 °C. Alors que dans la simulation numérique, cette différence n'est que de 150 °C environ. FDS semble modéliser une stratification thermique plus homogène entre les couches à la différence d'une interface thermique très marquée lors d'un essai.

Dans ce scénario, le terme source reconstruit par OBIWANE ne permet pas de reproduire l'évolution des observations à différentes positions.



(a) Les températures mesurées sont représentées par TC\_D\_05 : —, TC\_D\_04 : —, TC\_D\_03 : —, TC\_D\_02 : —, TC\_D\_01 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.



(b) Les températures mesurées sont représentées par TC\_G\_06 : —, TC\_G\_05 : —, TC\_G\_04 : —, TC\_G\_03 : —, TC\_G\_02 : —. Les températures calculées sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

FIGURE 3.26 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario 12

### Résumé

Les résultats les plus marquants de la reconstitution des scénarios précédents sont à retrouver dans le [Tableau 3.2](#). De ces trois scénarios, nous pouvons retenir que les phénomènes déjà observés à plus faible débit calorifique sont confirmés. L'évolution des températures engendrées par un foyer dans un coin sont assez mal reproduites. De plus, les écarts, entre les observables et les observations, les plus importants sont observés au plus près du plafond où le gradient de température est le plus élevé.

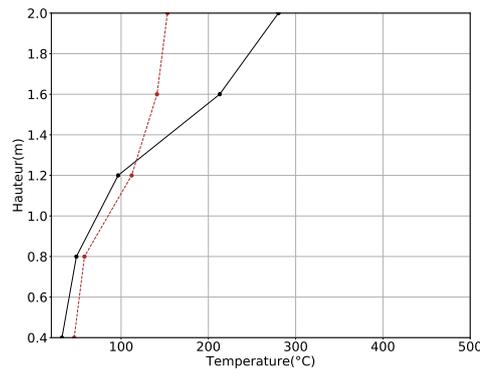


FIGURE 3.27 – Profil vertical des observations (—) et des observables (-.-) sur l'arbre C à  $t=180$  s pour le scénario 12

### 3.4 Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, OBIWANE est appliqué à reproduire des essais où le foyer est prescrit. Un brûleur au propane fait office du terme source et permet donc de contrôler le débit calorifique en temps réel. Ce foyer est positionné dans un couloir fermé à une extrémité, soit au centre de ce dernier, soit dans un coin. Différents scénarios sont définis afin d'établir les configurations (foyer, terme source) dans lesquelles OBIWANE reproduit l'essai. Des mesures de températures constituent les observations des fluctuations du terme source.

À l'issue de la reproduction de six essais présentés, nous pouvons affirmer que OBIWANE est en capacité de reproduire l'évolution des températures en différentes positions, pour un brûleur en position centrale. Dans les scénarios où la puissance ne dépasse pas  $\dot{Q}=116$  kW, OBIWANE reconstruit le terme source en dynamique et en intensité. Au delà de ce débit calorifique, seule la dynamique du terme source est reconstruite.

Dans les scénarios où le brûleur est positionné en coin, les observations en partie haute du caisson ne sont pas reproduites. La reconstruction du terme source constatée pour deux scénarios n'est pleinement satisfaisante. Afin de comprendre ce résultat, intéressons nous à l'évolution du profil vertical des températures sur l'arbre C pour le scénario 12 (voir Figure 3.27).

La première remarque concerne la comparaison du profil entre les observations et les observables. Le gradient entre les températures hautes et basses est plus important lors de l'essai que dans la reproduction par OBIWANE. En comparant les couches chaudes, lors de l'essai les observations en partie haute sont plus élevées que les observables. Dans la couche froide, la tendance est inversée. En ce qui concerne, ce scénario 12, la stratification thermique modélisée est effectivement moins marquée.

En fonction de la maille à laquelle est enregistrée la température dans FDS, la valeur (particulièrement à  $h=1.2$  m) peut être assez différente. Il serait donc intéressant d'effectuer une reproduction de l'essai du scénario 12 avec une taille de maille plus petite. Des observables supplémentaires pourraient être ajoutées dans la hauteur afin d'obtenir un profil plus discrétisé et ainsi positionner plus finement l'interface thermique calculée numériquement.

Dans l'étude du scénario 12, nous affirmons que la dynamique l'observation en partie haute n'est pas reproduite. Effectivement, en début d'essai, un écart important est formé entre les observations et les observables. Notons que cet écart diminue par la suite. Il semble que dans les premiers instants, la couche qui s'établit dans le caisson est caractérisée par un fort gradient de température, ce qui n'est pas le cas dans la simulation numérique.

Scénario/ Position, consigne	Déroulement	Débit calorifique		Données		Commentaires
		$\dot{Q}(t)$	E	Référence	Autres	
Scénario 1/ centrale, simple(90 kW)	R.A.S	OK	Erreur 3.3%	OK	Écart $\delta TC\_A\_03=40^\circ$	Très bonne reconstitution
Scénario 2/ centrale, croissant(116 kW)	R.A.S	Écart $\delta \dot{Q}=40kW$	Erreur 50%	Écart $\delta TC\_D\_03=25^\circ$	Écart $\delta TC\_G\_03$ $\delta TC\_G\_04 >20^\circ$	Surévaluation de $\dot{Q}(t)$ et couche chaude numérique plus épaisse
Scénario 3/ centrale, décroissant(116 kW)	Premier plateau plus long	OK	Erreur 22%	OK	Écart $\delta TC\_A\_03 >40^\circ$	Inertie sur la décroissance des températures
Scénario 7/ coin, simple(116 kW)	R.A.S	Écart $\delta \dot{Q}=30kW$	Erreur 21 %	Écart $\delta TC\_C\_05$ $\delta TC\_C\_04 > 20^\circ$	Écart $\delta TC\_D\_05$ $\delta TC\_D\_03,$ $\delta TC\_G\_06,$ $\delta TC\_G\_04 > 20^\circ$	Position en coin complexe à reconstituer
Scénario 6/ centrale, décroissant(270 kW)	Chute de débit	Écart $\delta \dot{Q}=200kW$	Erreur 46%	Écart $\delta TC\_D\_03 >20^\circ$	Écart $\delta TC\_A\_05,$ $\delta TC\_A\_04 >20^\circ$ $\delta TC\_G\_06,$ $\delta TC\_G\_05 <10^\circ$	Forte puissance complexe à reconstituer
Scénario 12/ coin, décroissant(270 kW)	Chute de débit	Écart $\delta \dot{Q}=100kW$	Erreur 14%	Écart $\delta TC\_C\_05,$ $\delta TC\_C\_04 >30^\circ$	Écart $\delta TC\_A\_05,$ $\delta TC\_G\_06 >40^\circ$	Latence sur la décroissance des températures et mauvaise modélisation de la température la plus haute

TABEAU 3.2 – Résultats de la reconstitution de six scénarios des essais avec le foyer prescrit



## Chapitre 4

# Exploitation sur des foyers complexes

Dans le chapitre 3, la méthode itérative d'optimisation, OBIWANE, est appliquée à la reconstruction du terme source d'un foyer prescrit à partir de mesures de températures dans un local. Cette application constitue la phase de validation de OBIWANE pour traiter des essais en conditions réelles. La particularité de ces essais se trouve dans la prescription du débit calorifique, à l'aide d'un brûleur au propane. Il en ressort que OBIWANE reconstruit les termes sources d'une puissance maximale inférieure à 100 kW. Au delà, une étude supplémentaire doit être menée pour améliorer la modélisation numérique de certains phénomènes tels que, par exemple, la stratification thermique. Malgré cela, nous nous proposons ici d'exploiter la méthode OBIWANE sur l'étude de foyers de plus en plus complexes dont la majorité sont dans un milieu ouvert.

Dans ce chapitre 4, nous présentons l'exploitation de OBIWANE à la reconstitution de quatre essais en conditions réelles. Dans une première partie, nous exposons les résultats pour un essai effectué dans la même configuration (i.e. géométrie, mesures) qu'au chapitre précédent. Dans ce cas, le brûleur au propane est remplacé par un fût contenant de l'hydrocarbure. Ensuite, la méthode est appliquée à une série d'essais en milieu ouvert. Le premier traite du terme source de trois fûts contenant un hydrocarbure et le suivant traite du terme source d'un empilement de matériaux de construction. Nous concluons ce chapitre sur l'ouverture vers un problème plus complexe, celui d'un feu de véhicule. Bien qu'une telle source soit impossible à représenter de façon fine comme donnée d'entrée d'un code numérique, nous proposons malgré tout une démarche de reconstruction simplifiée pour cet essai.

### 4.1 Feu d'hydrocarbure en milieu « confiné »

Ce premier test, appelé « hydrocarbure confiné », s'inscrit dans la continuité des essais du chapitre 3. Les mêmes locaux sont utilisés, seule la nature du foyer est modifiée. Nous vous renvoyons vers les [section 3.1](#) et [section 3.2](#) pour la description de la géométrie, des moyens de mesures et de la simulation numérique.

#### 4.1.1 Présentation de l'essai et de la simulation

Dans ce scénario, le foyer est positionné, dans la zone feu, en position « centrale » et se compose d'un fût dans lequel se trouve un liquide. Le fût en acier est de diamètre  $d=0.55$  m et de profondeur  $h=0.25$  m ([Figure 4.1a](#)). Le gasoil<sup>1</sup> est utilisé comme combustible dont le volume est fixé à  $V=0.01$  m<sup>3</sup>. Le débit calorifique et la durée de feu sont estimés à l'aide de corrélations [14], qui dépendent des caractéristiques du contenant et de celles de l'hydrocarbure :

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \Delta H_c (1 - e^{-k\beta d}) S, \quad (4.1)$$

$$t_{\text{feu}} = 4V / \pi d^2 (\dot{m}'' / \rho). \quad (4.2)$$

Le débit calorifique  $\dot{Q}$ , pour le gasoil, de :

---

1. Carburant pour moteur Diesel



FIGURE 4.1 – Photographies du fût et de la balance de pesé du scénario « hydrocarbure confiné »

- la vitesse de perte de masse surfacique  $\dot{m}''=0.045 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,
- l'enthalpie de combustion  $\Delta H_c=44\ 800 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,
- une constante empirique  $k\beta = 2.1 \text{ m}^{-1}$ ,
- le diamètre du fût  $d=0.55 \text{ m}$ ,
- la surface en feu  $S=0.23 \text{ m}^2$ .

Le temps de feu  $t_{\text{feu}}$  dépend de la valeur des paramètres suivants :

- le volume de combustible  $V=0.01 \text{ m}^3$ ,
- le diamètre du fût  $d=0.55 \text{ m}$ ,
- la vitesse de perte de masse surfacique  $\dot{m}''=0.045 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,
- la masse volumique du gasoil  $\rho=918 \text{ kg.m}^{-3}$ .

La puissance du terme source est estimée à  $\dot{Q}=330 \text{ kW}$  et le temps de feu à  $t_{\text{feu}}=860 \text{ s}$ . Ces valeurs sont finalement comparables à celles des termes sources les plus importants générés avec le brûleur au propane.

Les valeurs estimées avec ces corrélations pourront être comparées à celles obtenues avec OBIWANE et avec la mesure de la perte de masse. En effet, le foyer repose sur une balance (Figure 4.1b) précise à 0.009 kg près pour une charge minimale de 0.4 kg.

Nous nous intéressons maintenant à la modélisation de ce foyer dans FDS. Nous rappelons que le foyer est l'unique donnée d'entrée modifiée entre ce scénario et les essais avec un brûleur au propane. Le maillage sous FDS étant structuré, nous faisons alors l'hypothèse que le foyer est de section carrée de surface  $S=0.16 \text{ m}^2$ . Le combustible est caractérisé par une formulation chimique  $\text{C}_{12}\text{H}_{24}$ , une enthalpie de combustion  $\Delta H_c=44\ 800 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , une fraction radiative  $\chi_r=0.3$  et un taux de production de suies de 0.3 kg pour un kilogramme de masse de combustible décomposé.

Nous présentons maintenant les résultats de cet essai puis de l'application de la méthode.

#### 4.1.2 Déroulement de l'essai et résultats de la reconstruction du terme source

L'essai du scénario « foyer hydrocarbure confiné » dans le caisson, qui a duré 2040 s, a été réalisé le 03 février 2020 par un temps humide avec une température ambiante de l'ordre de 4 ° C.

Après l'allumage (voir Figure 4.2a), le foyer croît pour atteindre une phase de quasi-stationnaire marquée par une hauteur de flamme alors importante (Figure 4.2b). Après 18 min (soit 1080 s) environ, la flamme réduit en intensité lumineuse et en hauteur (Figure 4.2c) pendant près de 2 min. En l'état actuel, aucune origine n'explique ce phénomène. Le foyer retrouve ensuite l'intensité qui était la sienne avant l'incident (Figure 4.2d).

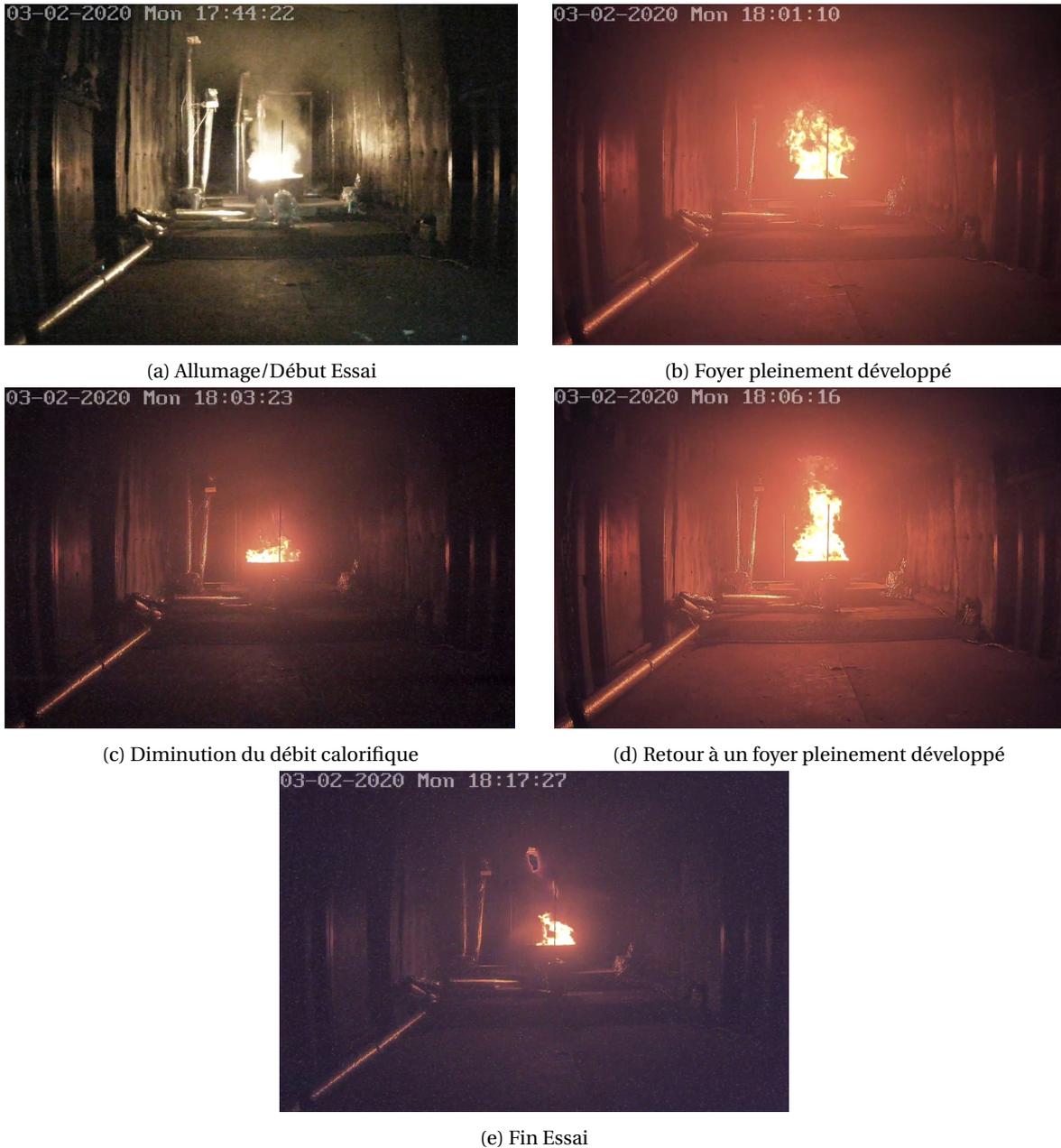
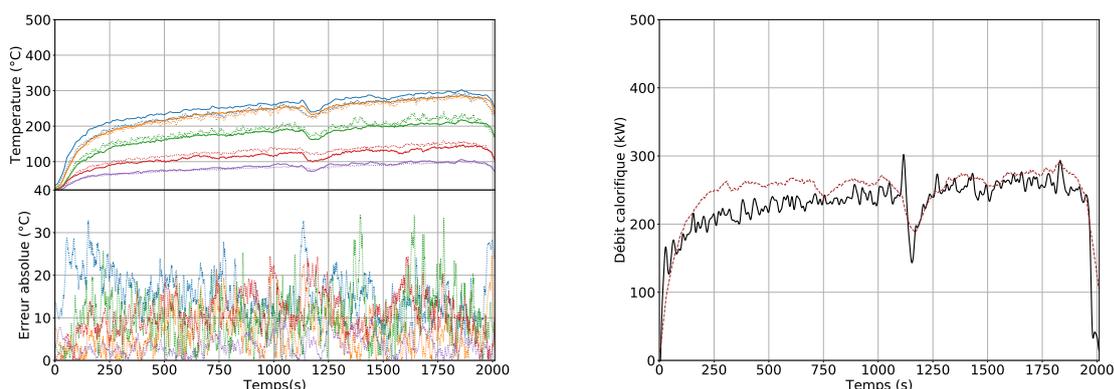


FIGURE 4.2 – Déroulement du scénario « hydrocarbure confiné »

Étant donné le foyer en position « centrale », nous sélectionnons les cinq températures mesurées sur l'arbre D comme observations et pour la méthode OBIWANE. Notons que l'arbre D regroupe les observations les plus proches du foyer.

Les observations sur l'arbre D (4.3a) sont bien reconstituées avec des écarts inférieurs à 20 °C pour des mesures qui atteignent au maximum 300 °C. Nous observons que lors de la phase de croissance, l'observable sur le TC\_D\_05 est inférieure de 30 °C à l'observation. Ce résultat confirme le fait que FDS modélise sans doute assez mal le profil vertical des températures dans la couche chaude en partie haute du caisson. Notons que la chute du débit calorifique est observée sur l'arbre D et reproduite par OBIWANE.

Cette bonne reproduction des observations à partir des mesures sur l'arbre D permet, dans ce cas, de reconstruire le terme source expérimental. À  $t=250$  s, notons que le débit calorifique estimé par OBIWANE est supérieur de 50 kW à celui de l'essai. La chute du débit calorifique constatée à  $t=1100$  s est captée par OBIWANE. L'intensité de cette chute n'est toutefois pas correctement esti-



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_D\_05 en —, TC\_D\_04 en —, TC\_D\_03 en —, TC\_D\_02 en — et TC\_D\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente l'évolution du débit calorifique évaluée expérimentalement via la perte de masse. L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 4.3 – Principaux résultats obtenus pour le scénario « hydrocarbure confiné »

mée. En effet, ce phénomène est suffisamment brutal et court dans le temps pour que les thermocouples ne puissent pas mesurer une décroissance des températures aussi importante que celle du débit calorifique.

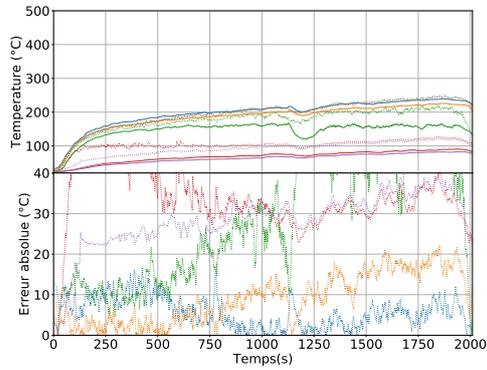
Il est à noter que cet essai a duré finalement plus longtemps que la durée de feu estimée via la corrélation (i.e. respectivement  $\Delta t_{\text{feu}}=2040$  s contre 860 s). La valeur du plateau de puissance est inférieure à celle calculée (i.e.  $\dot{Q}=260$  kW contre 330 kW). Cette différence peut s'expliquer par la géométrie fermée du local, ce qui entraîne une plus faible ventilation du foyer que dans un environnement totalement ouvert. La profondeur importante du bac devant le volume de liquide peut aussi expliquer cette différence.

Si nous considérons maintenant l'énergie totale produite par le foyer lors de l'essai, cette énergie est évaluée à 457 522 kJ. Le terme source reconstruit par OBIWANE produit 497 404 kJ, soit une erreur relative de 9%. Ce dernier résultat confirme la bonne reproduction de ce scénario par la méthode OBIWANE.

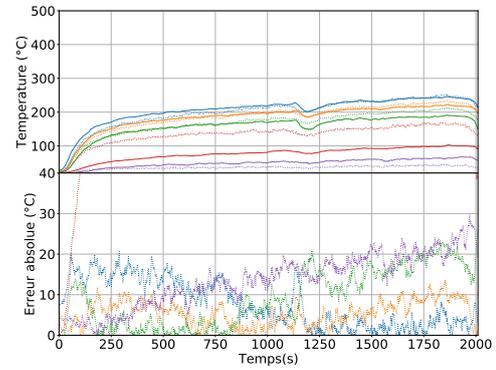
Les observations sur les arbres A et G sont représentées [Figure 4.4](#).

Les observations sur l'arbre A sont globalement mal reproduites avec de grandes disparités entre la couche chaude et froide du volume. En haut, les écarts sont inférieurs à 20 °C pour des mesures qui atteignent au maximum 240 °C. En bas, les écarts dépassent 30 °C pour des mesures à 200 °C au maximum. La taille de maille de 10 cm ne permet pas, à cette position, de reproduire la stratification thermique. Sur l'arbre G, à l'exception de TC\_G\_02, les autres observations sont bien reconstituées avec des écarts inférieurs à 20 °C pour une valeur maximale à 240 °C.

Les résultats obtenus sur cet essai démontrent la capacité de OBIWANE à reconstruire un terme source d'un foyer au centre d'une pièce, à partir de la connaissance de profils verticaux des températures à proximité.



(a) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_A\_05 en —, TC\_A\_04 en —, TC\_A\_03 en —, TC\_A\_02 en — et TC\_A\_01 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.



(b) Les observations correspondent aux mesures des thermocouples TC\_G\_06 en —, TC\_G\_05 en —, TC\_G\_04 en —, TC\_G\_03 en — et TC\_G\_02 en —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs et en pointillés.

FIGURE 4.4 – Résultats secondaires obtenus pour le scénario « hydrocarbure confiné »

Scénario/ Position	Débit calorifique		Données	Commentaires	
	$\dot{Q}(t)$	E			Référence
Scénario « hydrocarbure confiné »/ centrale	OK	Erreur 9.0%	OK	Écart $\delta TC\_A\_03$ , $\delta TC\_A\_02$ , $\delta TC\_A\_03 > 30^\circ$	Bonne reconstitution

TABLEAU 4.1 – Résultats de la reconstitution du scénario « hydrocarbure confiné »



(a) Vue extérieure de la zone d'essai

(b) Vue extérieure de la hotte calorimétrique

FIGURE 4.5 – Site d'essai et hotte calorimétrique de l'entreprise Efectis à Saint-Yan

## 4.2 Feux d'hydrocarbure et d'un chargement solide en milieu « libre »

Les trois essais présentés dans les deux sections suivantes s'inscrivent dans le cadre d'une campagne plus vaste portant sur l'étude de feux de Véhicules Utilitaires Légers (VUL) et sur leurs chargements. Cette campagne a pour objectif de constituer ou de mettre à jour les termes sources de ce type de foyer. Cette étude a été menée par le [Centre Technique Industriel de la Construction Métallique \(CTICM\)](#), le [LCPP](#) et les entreprises ArcelorMittal, Renault et Efectis.

Nous présentons les essais et l'instrumentation mis en place, la manière dont le code [FDS](#) a été programmé pour la reproduction de ces essais puis nous concluons sur la base des résultats obtenus.

### 4.2.1 Présentation des essais

Les essais, dont il est question dans cette section, sont réalisés sur le site expérimental de l'entreprise Efectis à Saint-Yan. Ce site se compose de plusieurs installations d'essais dont un emplacement de  $S=340 \text{ m}^2$  permettant les essais de foyers de grandes dimensions à l'extérieur. Cette zone d'essai rectangulaire dont les caractéristiques sont reportées en annexe [C.4](#), est délimitée sur trois de ses faces par des caissons de transports maritimes (voir [Figure 4.5a](#)) et ouverte sur une face (d'où est prise la photographie [4.5b](#)). Au sein de cet emplacement, une hotte calorimétrique de  $S=40 \text{ m}^2$ , pouvant coiffer un VUL, est installée. La hotte en acier est pourvue d'une isolation thermique efficace. Une toile ignifugée est installée sur le contour de la hotte et descend suffisamment près du sol pour garantir une bonne ventilation du foyer et une canalisation des fumées de combustion. Le dispositif est complété par une balance adaptée à l'étude de foyers de grandes dimensions, tout comme ceux décrits dans la suite.

Avant d'évaluer expérimentalement le terme source d'un VUL chargé, nous nous intéressons au contenant du réservoir et au chargement seul, à savoir un foyer de trois fûts d'hydrocarbure et celui d'un empilement de matériaux de constructions. Pour la suite, nous les appellerons respectivement foyer « hydrocarbure » et foyer « solide ».

Le premier foyer se compose de trois fûts (voir [Figure 4.7a](#)) identiques de diamètre  $d=0.6 \text{ m}$  et tronqués à une hauteur  $h=0.3 \text{ m}$ . Chacun des trois fûts est rempli avec un volume  $V=0.053 \text{ m}^3$  d'eau, complété par un volume  $V=0.006 \text{ m}^3$  de gasoil. La répartition de cet hydrocarbure dans trois contenants permet d'augmenter la surface du foyer et reproduire un feu de nappe, pouvant survenir lors du percement du réservoir pendant l'incendie du VUL. Le volume d'hydrocarbure fixé peut engendrer un débit calorifique constant  $\dot{Q}=408 \text{ kW}$  par fût, soit  $1224 \text{ kW}$  pour l'ensemble du foyer. Le temps de feu est estimé à  $\Delta t_{\text{feu}}=420$  secondes. Ces calculs sont issus des corrélations [4.1](#) et [4.2](#).

Le second foyer est constitué d'un assemblage (voir [Figure 4.6b](#)) de divers matériaux de construction (voir en annexe [C.4](#)). Ce foyer est composé à la fois de matériaux combustibles et non combustibles. Six palettes en bois d'une masse totale de  $m=144 \text{ kg}$ , six palettes en Polyéthylène haute-densité (PE-HD) de  $52.8 \text{ kg}$  et trois bouteilles de diluant à peinture de  $1.5 \text{ kg}$  composent les maté-



(a) Trois fûts d'hydrocarbure

(b) Assemblage de matériaux de construction

FIGURE 4.6 – Photographies des deux foyers sous la hotte calorimétriques

riaux combustibles. Huit parpaings en béton de 160 kg et neuf tiges métalliques de 13.5 kg complètent le foyer. La masse totale est de  $m_{\text{totale}}=371.8$  kg. Il est à noter que contrairement au foyer d'hydrocarbure, aucune corrélation ne permet d'estimer le terme source d'un tel foyer. Connaissant les masses et la nature des combustibles, une estimation de l'énergie totale est toutefois possible. De cette valeur, le débit calorifique du foyer peut en être déduit en fonction du temps de feu fixé arbitrairement. Nous faisons les hypothèses que le combustible est caractérisé par une enthalpie de combustion moyenne entre le bois et le PE-HD, et que la totalité de la masse de combustible est transformée en énergie. D'un côté, les palettes en bois sont constituées de planches de pin dont l'enthalpie de combustion est  $\Delta H_c=19\ 500$  kJ.kg<sup>-1</sup> (voir [14]). De l'autre, les palettes en PE-HD sont caractérisées par une enthalpie de combustion  $\Delta H_c=43\ 600$  kJ.kg<sup>-1</sup>. Il est à noter que le diluant n'est pas considéré dans ce calcul. L'enthalpie moyenne pondérée sur les masses de ces deux matériaux est :  $\Delta H_c=28\ 471$  kJ.kg<sup>-1</sup>. Suivant les hypothèses précédentes, l'énergie totale dégagée par ce foyer représente :  $E = m\Delta H_c = 5.6$  MJ. Si cette énergie est dégagée, de manière constante durant 1800 s, le débit calorifique est égal à  $\dot{Q}=3113$  kW.

Dans le premier essai, le foyer de trois fûts d'hydrocarbures est positionné sur une plate-forme à une hauteur  $h=0.3$  m du sol et centré par rapport aux bords de la hotte calorimétrique (voir Figure 4.7a). Dans le second, le foyer de matériaux est disposé dans un contenant en acier carré à une hauteur  $h=0.4$  m et décentré par rapport à la hotte (Figure 4.7b). Notons que, pour ce dernier foyer, la disposition est compacte de telle sorte, que l'ensemble occupe un volume semblable à celui d'un coffre d'utilitaire, soit respectivement  $V=1.2$  m<sup>3</sup> (*i.e.* une surface  $S=1.2$  m<sup>2</sup> pour une hauteur  $h=1.0$  m) contre  $V=3.0$  m<sup>3</sup> (*i.e.*  $S=3.0$  m<sup>2</sup> pour  $h=1.0$  m)<sup>2</sup>.

Lors de ces essais, nous procédons à des mesures de flux thermiques radiatifs autour des foyers. Les flux thermiques sont mesurés par des fluxmètres radiatifs non refroidis. Le dispositif se compose de quatre fluxmètres horizontaux, équidistants de  $L=1.5$  m aux quatre faces du foyers et à une hauteur  $h=1.1$  m. Trois fluxmètres verticaux disposés à une distance  $L=1.5$  m de l'une des faces complètent le dispositif. Ces trois fluxmètres sont positionnés aux hauteurs  $h=0.6, 0.9, 1.2$  m. Les positions exactes des fluxmètres figurent dans les annexes D.5 et D.6.

L'entreprise Efectis réalise les mesures de concentration d'oxygène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone dans la gaine prévue à cet effet de la hotte. Il est à noter que cette hotte est à aspiration naturelle. De fait, les fumées issues du foyer migrent vers la zone de mesures par convection naturelle et doivent contourner un sous-plafond qui la protège des flammes. Un décalage temporelle peut alors être observée dans les premiers instants de l'essai où les fumées sont peu dynamiques. L'évolution du débit calorifique est évaluée par la calorimétrie par consommation d'oxygène corrigée en fonction de la production de monoxyde de carbone et de dioxyde de

2. VUL de type Renault Kangoo

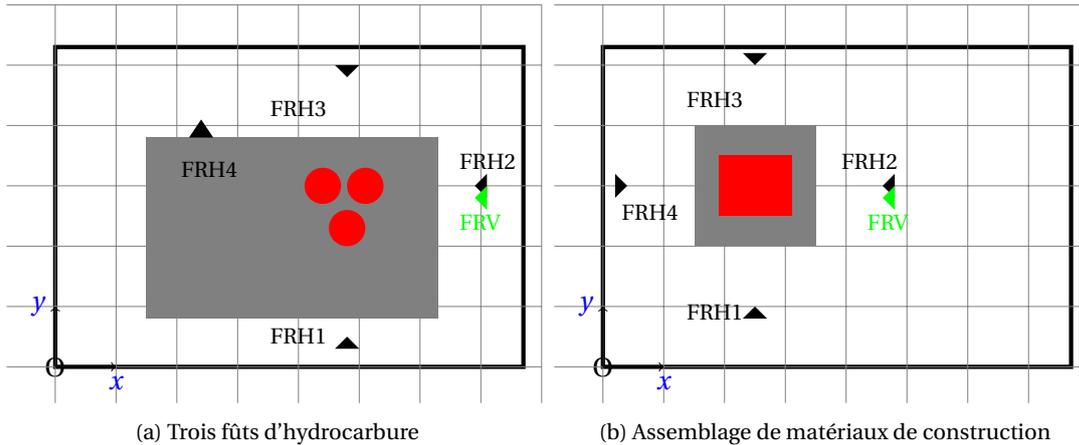


FIGURE 4.7 – Représentation des foyers (●) et des fluxmètres (horizontaux ▼, verticaux ▼) dans la hotte calorimétrique (□). Les foyers sont positionnés sur des plate-formes (■).

carbone.

Nous nous intéressons maintenant à la simulation numérique de ces essais.

#### 4.2.2 Paramétrer le modèle CFD : FDS

L'application de la méthode OBIWANE nécessite que le site des essais, présenté dans la sous section précédente, soit modélisé numériquement sous FDS (voir Figure 4.8). Les dimensions du domaine numérique sont supérieures à celles de la hotte calorimétrique et tiennent compte de la présence des caissons de transports qui, pour rappel, délimitent le site. Les parois latérales et supérieures de ce domaine sont ouvertes à l'atmosphère (*i.e.* condition OPEN dans FDS). La paroi inférieure (*i.e.* le sol) est un solide inerte (*i.e.* condition INERTE). À ces frontières numériques latérales, les caissons sont modélisés à l'aide de cloisons (*i.e.* fonction OBST dans FDS). À l'intérieur du domaine, la hotte calorimétrique est modélisée à l'aide de cette même fonction. Les parois du domaine et celles de la hotte sont séparées, d'un côté, de 2.6 m et de l'autre de 5.2 m (Figure 4.8b). Notons que ces valeurs correspondent aux distances réelles. La modélisation de l'ensemble du dispositif permet la prise en compte des effets d'une ventilation particulière due à sa fermeture partielle.

Dans FDS, la discrétisation du domaine numérique nécessite de fixer la taille de mailles  $\Delta_x$ . Nous effectuons donc une étude de sensibilités au maillage basée sur la comparaison des valeurs de flux thermiques calculées par FDS à différentes positions pour des tailles de 20, 10 et 5 cm. À l'issue, la taille de mailles est fixée à  $\Delta_x=20$  cm étant donné les écarts n'excèdent pas 10% entre les valeurs calculées pour une taille de maille de 5 cm et de 20 cm. De plus, la taille de maille finalement fixée est compatible avec des temps de calculs raisonnables.

Dans ces simulations, le foyer est modifié entre les deux essais, nous les présentons séparément dans ce qui suit. Les fûts d'hydrocarbure, du premier essai, sont modélisés individuellement par un cube d'une surface  $S=0.36$  m<sup>2</sup>. Le combustible prescrit, de formulation chimique C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>, est caractérisé par enthalpie de combustion =44 800 kJ.kg<sup>-1</sup>, une fraction radiative  $\chi_r=0.3$  et un taux de productions de suies de 0.3 kg.kg<sup>-1</sup>. Ces données sont issues de différentes sources ([14],[15]).

Dans le second essai, le foyer est modélisé comme un unique bloc solide dont les surfaces exposées à l'air, sont en feu (soit  $S=5.6$  m<sup>2</sup>). Notons que cette dernière hypothèse n'est pas valable dans les premiers instants de l'essai (voir la sous section section 4.2.3). Ce foyer est constitué d'un assemblage de matériaux très diversifiés et il semble difficile de le modéliser dans FDS. Nous reprenons l'hypothèse déjà émise dans la sous-section 4.2.1 où le foyer est assimilé comme un matériau équivalent entre les deux principaux combustibles. L'un correspond à du pin dont

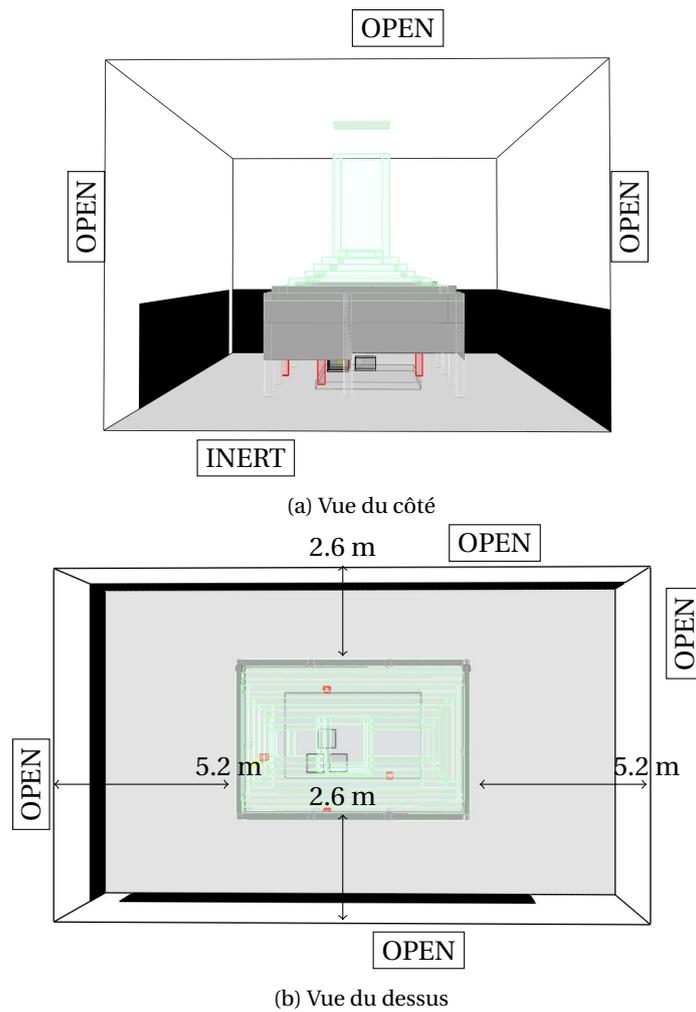


FIGURE 4.8 – Représentation du domaine de calcul des essais de Saint-Yan

la formulation chimique est réduite à celle de la cellulose,  $C_6H_{10}O_5$  et produit  $0.015 \text{ kg.kg}^{-1}$  de suies. Le PE-HD, de formulation chimique  $C_2H_4$ , produit  $0.006 \text{ kg.kg}^{-1}$  de suies. Le matériau équivalent est caractérisé par une formulation chimique  $C_{4.0}H_{7.0}O_{5.0}$ , une enthalpie de combustion  $\Delta H_c = 28\,471 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et produit  $0.0105 \text{ kg}$  de suies pour un kilogramme de matériaux décomposés.

Comme discuté dans le chapitre 3, l'utilisation de OBIWANE nécessite que l'ambiance thermique soit modélisée le plus finement possible. Le modèle de turbulence est laissé par défaut dans FDS.

Lors de ces essais, les mesures indirectes portent uniquement sur le flux thermique radiatif. Dans FDS, le calcul de cette grandeur dépend de la précision de la résolution du rayonnement et du nombre d'angles solides. Ce nombre est fixé à 500 étant donné l'étude de sensibilité déjà menée pour les simulations des essais calibrés. De même, nous reconduisons la fonction INCIDENT HEAT FLUX comme données de sortie de FDS.

Nous avons donc présenté le dispositif expérimental de ces essais et les paramètres les plus importants de la simulation numérique. Nous appliquons donc la méthode OBIWANE et présentons les principaux résultats dans la sous section suivante.

### 4.2.3 Résultats de l'optimisation

#### Feu d'hydrocarbure « libre »

Ce premier essai, qui a duré 690 s, a été réalisé le 28 novembre 2020 par un temps nuageux avec une température ambiante de l'ordre de  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Après cette allumage (voir Figure 4.9a), le foyer se développe jusqu'à atteindre une phase stationnaire (Figure 4.9b). Enfin, la diminution de la hauteur de la flamme (Figure 4.9c) témoigne de la décroissance du débit calorifique du foyer.

Lors de cet essai, les fluxmètres FRH1 (position horizontale) et FRV1 (position verticale) ne fonctionnent pas. Nous optons pour les trois fluxmètres horizontaux disponibles comme observations (*i.e.* FRH2, FRH3 et FRH4). Notons que le fluxmètre horizontal FRH4 ne peut être centré par rapport au foyer du fait de la position des trois fûts sur la plate-forme (voir Figure 4.9a).

Les observations (4.10a) sur les trois fluxmètres sont bien reproduites avec des écarts inférieurs à  $1 \text{ kW.m}^{-2}$  pour des valeurs mesurées allant de 2 à  $4 \text{ kW.m}^{-2}$ . Du fait d'un intervalle d'exploration  $\Delta t_{\text{exp}} = 60 \text{ s}$ , les oscillations des flux thermiques ne sont pas reproduites, seule la tendance générale l'est. En début d'essai, les observations sont marquées par un décalage temporel avec l'allumage des foyers. Ce phénomène peut ici être expliqué par la hauteur des capteurs (*i.e.*  $h = 1.1 \text{ m}$ ), plus élevée que celle du bord des fûts (*i.e.*  $h = 0.6 \text{ m}$ ). En effet, dans les premiers instants du foyer, les flammes n'atteignent pas une hauteur suffisante pour que les capteurs soient sensibles au rayonnement.

Cette bonne reproduction des observations ne permet pas de reconstruire aussi bien le terme source évalué par la calorimétrie (4.10b). L'évolution du débit calorifique estimée par OBIWANE, en dehors de la phase de croissance, est inférieure au terme source expérimental avec des écarts qui varient entre 200 kW (à  $t = 300 \text{ s}$ ) et 50 kW. En début d'essai, le terme source expérimental est marqué par une latence de 50 s environ. Cette observation est attendue du fait de la nature de la hotte. Numériquement, la phase de croissance du débit calorifique est anticipée par la méthode OBIWANE et n'est pas surévaluée. Sur la fin de l'essai, les flux reviennent à leurs valeurs initiales. Malgré ce fait, nous observons que le débit calorifique n'est pas nul.

Les valeurs des corrélations sont correctes pour ce foyer dans une géométrie ouverte. En effet, le débit calorifique calculé par ces corrélations est  $\dot{Q} = 1224 \text{ kW}$  pendant un temps de feu de 420 s. Expérimentalement, la valeur atteint  $\dot{Q} = 1250 \text{ kW}$  durant 300 s environ et 1100 kW durant 150 s estimée par OBIWANE.

Sur la durée totale de l'essai, l'énergie produite est égale à  $E = 473\,393 \text{ kJ}$  contre  $E = 418\,894 \text{ kJ}$



(a) Allumage/Phase de développement



(b) Phase pleine développée



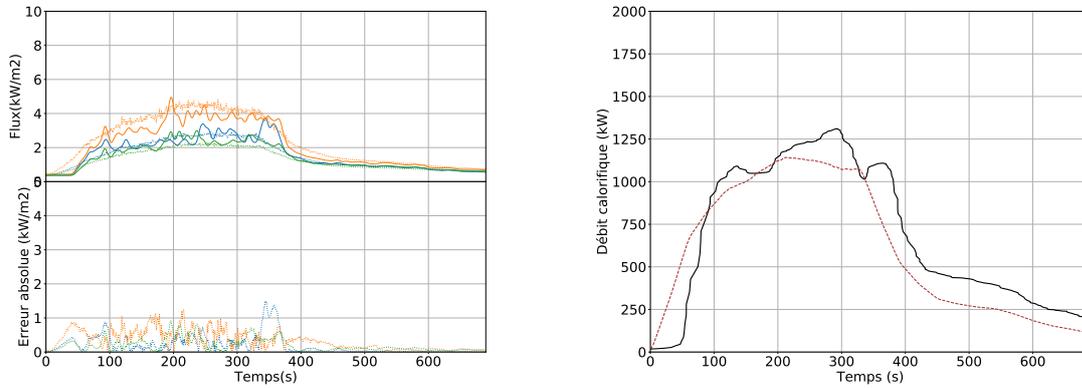
(c) Phase de décroissance

FIGURE 4.9 – Déroulement de l'essai du scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre

pour le terme source reconstruit par OBIWANE, une erreur relative de 12.0%. Au vu de ces résultats, le scénario est bien reproduit.

Les observations sur FRV2 et FRV3 sont présentées sur la [Figure 4.11](#).

La bonne reproduction des observations sur les flux horizontaux est confirmée à ces positions avec des écarts inférieurs à  $2 \text{ kW.m}^{-2}$  pour des valeurs mesurées entre  $6 \text{ kW.m}^{-2}$  et  $8 \text{ kW.m}^{-2}$ . La valeur de l'intervalle d'exploration ne permet pas à ces positions de reproduire l'ensemble des oscillations du flux thermique. Nous remarquons encore le phénomène de latence en début d'essai.



(a) Les observations correspondent aux mesures des fluxmètres FRH2 : —, FRH3 : —, FRH4 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente l'évolution du débit calorifique évaluée expérimentalement via la calorimétrie par consommation d'oxygène. L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 4.10 – Principaux résultats obtenus pour le scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre

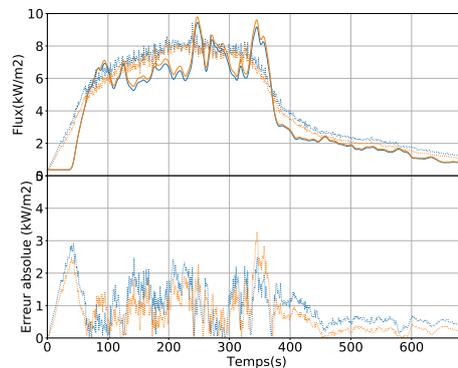


FIGURE 4.11 – Les observations correspondent aux mesures des fluxmètres FRV2 : —, FRV3 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

### Feu du chargement solide

Ce deuxième essai, qui a duré 1740 s, a été réalisé le 13 décembre 2019 par un temps nuageux avec une température ambiante de l'ordre de 6 °C.

Le foyer se développe (Figure 4.12b) et les flammes atteignent le bas du chargement de palettes (Figure 4.12c). Notons que sur cette dernière photographie, les flammes impactent le sous-plafond de protection de la gaine de mesure de la hotte. Les flammes continuent leur propagation sur les palettes en bois disposées autour de celles en PE-HD. Ces dernières finissent par fondre et forment un amas au centre du foyer (Figure 4.12d). À la chute de la palette située au sommet de l'assemblage, les flammes englobent l'ensemble du foyer (Figure 4.12e) qui est pleinement développé. Enfin cette phase passée et pour ne pas risquer une chute de palettes à l'extérieur du contenant en acier, ce qui fausserait la mesure de la masse, un membre de l'équipe d'essai fait s'effondrer l'assemblage sur lui-même (Figure 4.12f). La fin de l'essai est marquée par l'ouverture de la toile ignifugée. Le foyer continue toutefois de brûler.

Lors de cet essai, les fluxmètres FRH2 (position horizontale) et FRV2 (position verticale) ne fonctionnent pas. Nous optons toujours pour les trois fluxmètres horizontaux disponibles (*i.e.* FRH1, FRH3 et FRH4) comme précédemment.

Les deux principaux résultats obtenus pour ce scénario sont illustrés Figure 4.13.

Les observations (4.13a) sont globalement bien reproduites avec des écarts inférieurs à  $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  pour des valeurs maximales mesurées entre 10 et  $18 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Les forts écarts calculés sont dus aux oscillations des flux thermiques. Nous remarquons que les observations sont différentes malgré l'équidistance des positions. Sur les photographies du déroulement de l'essai (voir Figure 4.12), la flamme est inclinée vers le capteur FRH3 (*i.e.* à droite sur les photographies ou comme positionné Figure 4.6) ce qui expliquerait les valeurs plus élevées sur ce capteur. Il semble que cette explication soit aussi valable pour le capteur FRH4 mais cela n'est pas vérifiable d'après les images. À  $t=450 \text{ s}$ , l'observation sur FRH3 décroît fortement. Ce phénomène n'est pas modélisé par FDS du fait que le foyer y est représenté comme un seul bloc immuable au cours de la simulation. Expérimentalement, le foyer change de forme avec les chutes des palettes et la diminution de la masse de combustible. Cette diminution correspond à la chute de la palette la plus haute, ce qui entraîne une baisse de la hauteur de flamme.

Ce résultat permet la reconstruction du terme source expérimental (voir Figure 4.13b). Globalement, les deux évolutions sont très proches, y compris sur les deux pics de puissance à  $t=300 \text{ s}$  et  $450 \text{ s}$ . Par calorimétrie, ces pics sont évalués à 3600 kW environ contre 3300 kW estimés par OBIWANE. Ce résultat confirme que la méthode peut reconstituer des fluctuations localisées dans le temps du terme source, dès lors que les intervalles d'exploration et d'estimation sont adaptés.

Dans la sous-section 4.2.1, nous avons évalué le débit calorifique à  $\dot{Q}=3113 \text{ kW}$  pendant 1800 s. Finalement, ces valeurs sont éloignées de celles calculées via la calorimétrie et estimées par OBIWANE, respectivement  $\dot{Q}=3600 \text{ kW}$  et  $\dot{Q}=3300 \text{ kW}$  pendant 200 s. Cette différence de temps montre les limites des hypothèses sur la combustion totale de la masse du foyer et de l'enthalpie de combustion moyenne.

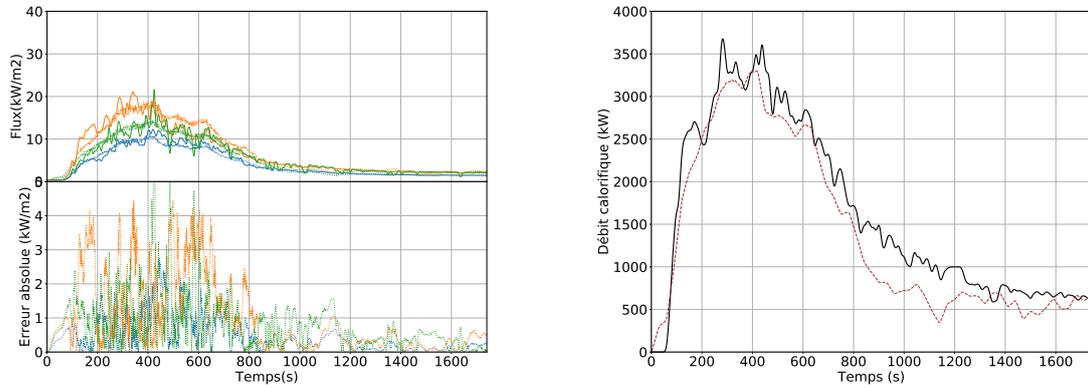
Nous nous intéressons maintenant à l'énergie totale produite par le foyer. Expérimentalement cette énergie est évaluée à  $E=2.8 \text{ MJ}$  contre  $E=2.4 \text{ MJ}$  produite par le terme source reconstruit, soit une erreur relative de 14.0%.

Les observations sur FRV1 et FRV3 ainsi que les observables sont illustrées Figure 4.14.

Globalement, l'évolution de ces observations sont qualitativement bien reconstituées avec des écarts qui dépassent localement les  $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  pour des mesures entre  $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  et  $30 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Toutefois, l'observation sur FRV3 est sur évaluée par OBIWANE en début d'essai et sur FRV1, l'observation est sous évaluée en fin d'essai. Les différentes chutes des palettes ont réduit la taille de flamme et tassé le foyer. Pour rappel, ces phénomènes ne sont pas reproduits dans FDS. Cela pourrait expliquer en partie ces écarts.



FIGURE 4.12 – Déroulement de l'essai du scénario de chargement solide en milieu libre



(a) Les observations correspondent aux mesures des fluxmètres FRH1 : —, FRH3 : —, FRH4 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente l'évolution du débit calorifique évaluée expérimentalement via la calorimétrie par consommation d'oxygène. L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).

FIGURE 4.13 – Principaux résultats obtenus pour le scénario d'un feu de chargement solide en milieu libre

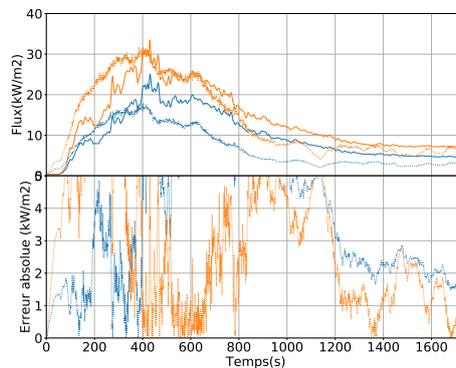


FIGURE 4.14 – Les observations correspondent aux mesures des fluxmètres FRV1 : —, FRV3 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

Scénario	Déroulement	Débit calorifique		Données		Commentaire
		$\dot{Q}(t)$	E	Référence	Autres	
Foyer « hydrocarbure »	R.A.S	$\dot{Q}$ sous-estimé	Erreur 12.0%	Écart $\delta\Phi_{FRH} < 1 \text{ kW.m}^{-2}$	Écart $\delta\Phi_{FRV} = 2 \text{ kW.m}^{-2}$	Bonne reconstitution
Foyer « solide »	R.A.S	OK	Erreur 14.0%	Écart $\delta\Phi_{FRH} < 2 \text{ kW.m}^{-2}$	Écart $\delta\Phi_{FRV} > 5 \text{ kW.m}^{-2}$	Bonne reconstitution $\dot{Q}(t)$ , pas des flux FRV

TABLEAU 4.2 – Résultats de la reconstitution des foyers « hydrocarbure » et « solide » de Saint-Yan

### Conclusion

Les résultats obtenus pour ces deux essais en extérieur confirment la capacité de OBIWANE à reproduire des observations sur les flux thermiques dans le but de reconstruire le terme source associé. L'utilisation de flux radiatifs horizontaux proches du foyer peut donc être validée dans le cas d'essais en extérieur. L'utilisation des flux verticaux doit encore être étudiée. L'assemblage de flux verticaux dans la hauteur permet de capter les variations du rayonnement émis par le foyer y compris lorsque celui-ci change de forme au cours de l'essai. La modélisation numérique de ces changements de forme ne semble pas être pertinente et sans doute peu réaliste pour ce type de foyer. Une attention doit toutefois être portée sur la position en hauteur des capteurs de flux, en particulier pour les premiers instants où la flamme est peu importante. Enfin les oscillations importantes de cette grandeur pourraient être reconstituées à condition évidemment d'utiliser des temps  $\Delta t_{\text{exploration}}$  et  $\Delta t_{\text{estimation}}$  plus courts.



FIGURE 4.15 – Photographies du foyer de VUL et de son chargement.

## 4.3 Discussion sur la reconstruction d'un feu de véhicule

### 4.3.1 Présentation de l'essai

Le troisième foyer de ces essais correspond à un VUL fonctionnel contenant l'assemblage de matériaux de construction décrit dans la [sous-section 4.2.1](#). Avant l'essai, un Renault Kangoo (voir [Figure 4.15a](#)) de type familial est converti en utilitaire. À l'extérieur, le véhicule n'est pas modifié et possède l'ensemble des dispositifs qui le rendent fonctionnel (*i.e.* roues, moteur, vitres, etc). Le réservoir contient également un volume  $V=0.03 \text{ m}^3$  de Diesel, supérieur à celui du foyer « hydrocarbure » (*i.e.*  $V=0.006 \text{ m}^3$ ). À l'intérieur, les sièges arrières sont retirés et les vitres du milieu et de l'arrière sont obstruées par des planches de contre-plaqué. L'habitacle est finalement composé de deux sièges à l'avant, du tableau de bord (voir [Figure 4.15b](#)) et du chargement de matériaux de construction ([Figure 4.15c](#)). La nature de l'assemblage reste identique à celui du foyer « solide ». La disposition est toutefois différente. Dans ce cas, les palettes en PE-HD, en bois sont emboîtées et les matériaux non combustibles sont positionnés sur la gauche du VUL. Le foyer est positionné sur une plate-forme à  $h=0.3 \text{ m}$  du sol et est centré par rapport à la hotte.

Lors de cet essai, nous effectuons comme mesures indirectes, des mesures de flux thermiques radiatifs. Le dispositif expérimental (voir [Figure 4.16](#)) reste identique à celui défini pour les deux essais précédents. Les positions exactes des fluxmètres sont reportées en annexe [D.7](#).

L'entreprise Efectis réalise des mesures pour la calorimétrie par consommation d'oxygène corrigée en fonction de la production de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone.

Ce foyer et l'essai associés représentent un problème qui est en dehors du cadre d'application de la méthode itérative d'optimisation. En effet, étant donné la propagation du foyer observée lors de l'essai, ce paramètre doit être considéré, ce qui, pour l'heure, n'est pas possible avec OBI-WANE. Ce dernier est tout de même appliqué à la reproduction de l'essai afin d'en tirer des ensei-

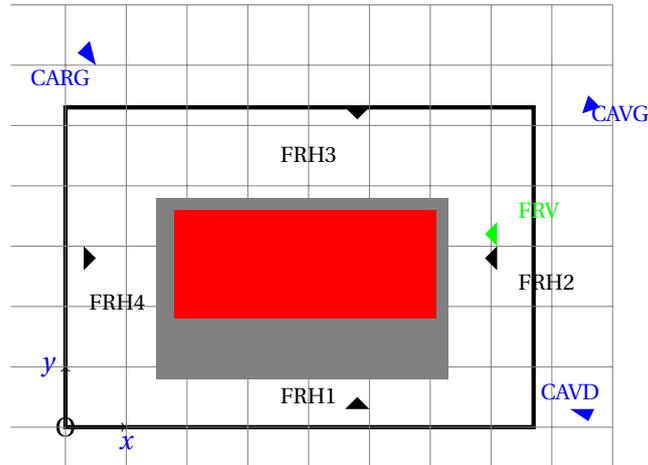


FIGURE 4.16 – Représentation du foyer de VUL (■) et des fluxmètres (horizontaux ▼, verticaux (▼)) dans la hotte calorimétrique (□). Le VUL est positionné sur une plate-forme (■). En dehors de la hotte, trois caméras (▼) sont placées.

gnements. Ensuite, une étude des données d'essai (i.e vidéos, mesures) complète cette première phase et permet de comprendre les phénomènes importants à considérer. À l'issue, le problème peut être reformulé pour une future application de OBIWANE.

### 4.3.2 Une première application de OBIWANE

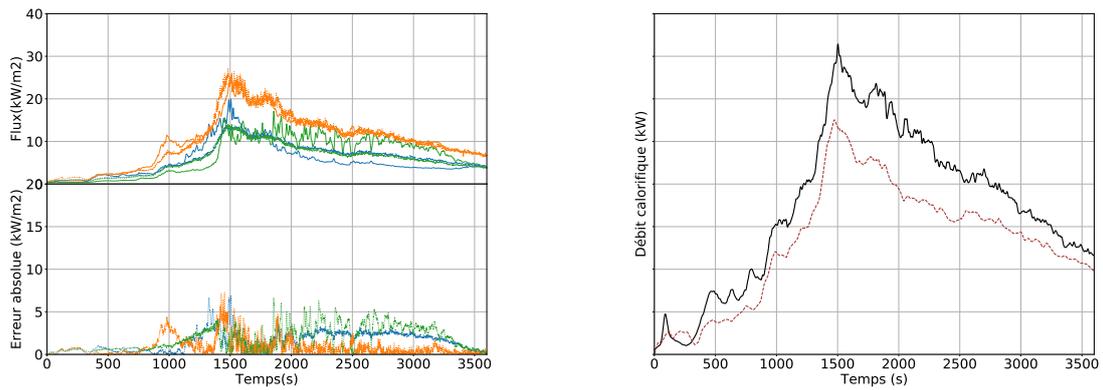
Dans la simulation de l'essai de VUL, seul le foyer est modifié par rapport aux simulations des deux essais précédents. Nous renvoyons donc le lecteur vers la [sous-section 4.2.2](#) pour plus de précisions. Pour cette simulation simplifiée, le foyer de VUL est réduit à une simple surface en feu de  $S=8.4 \text{ m}^2$ , soit  $L=4.4 \text{ m}$  par  $l=1.9 \text{ m}$ . Cette surface est positionnée à une hauteur de  $h=1.1 \text{ m}$ . Ces dimensions correspondent respectivement à la surface que le véhicule occupe au sol et à la hauteur du bord des fenêtres. Le combustible est admis comme étant du Polyéthylène haute densité (PE-HD) de formulation  $\text{C}_2\text{H}_4$  et d'enthalpie de combustion  $\Delta H_c=43\,600 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

Les résultats obtenus pour ce scénario sont illustrés [Figure 4.17](#). L'observation sur le FRH3 ([Figure 4.17a](#)) est très bien reconstituée avec un écart globalement proche de  $1 \text{ kW.m}^{-2}$  pour une mesure qui atteint au maximum  $20 \text{ kW.m}^{-2}$ . Sur les fluxmètres FRH2 et FRH4, le résultat de la reproduction est plus discutable. En effet, globalement les observables à ces deux positions sont égales alors qu'en essai, les évolutions sont assez différentes. Entre le début de l'essai et  $t=1500 \text{ s}$ , l'observation sur le fluxmètre FRH4 est assez faible. Après  $1500 \text{ s}$ , la valeur du flux augmente fortement pour se stabiliser autour de  $10 \text{ kW.m}^{-2}$ . Sur le fluxmètre FRH3, l'observation croît jusqu'à  $1500 \text{ s}$  pour ensuite diminuer.

Ces disparités dans la reproduction des observations influent sur la reconstruction du terme source ([Figure 4.17b](#)). L'évolution du débit calorifique estimée par OBIWANE est inférieure à celle évaluée lors de l'essai par calorimétrie. Notons que les valeurs des débits calorifiques sont anonymisées.

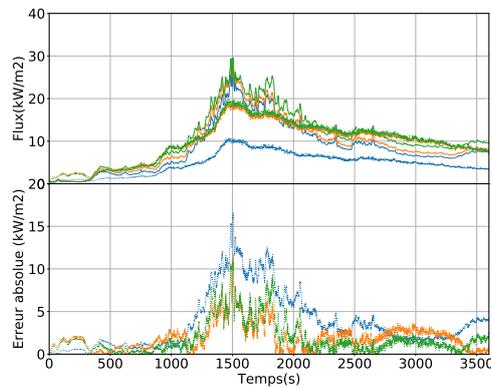
Ce terme source ne permet pas la reproduction des observations sur les flux verticaux ([Figure 4.17c](#)). Globalement à ces positions, les observations sont supérieures aux observables. Lors de l'essai, les observations sont très proches, les faibles écarts étant uniquement dus à leurs différences de positions dans la hauteur. Au contraire, l'observable sur le FRV1 est bien inférieure à celles sur les FRV2 et FRV3. Dans la simulation, cette différence est due à la position du FRV1 (i.e.  $h=0.6 \text{ m}$ ) plus bas que celle du foyer (i.e.  $h=1.1 \text{ m}$ ).

Finalement, OBIWANE tente de reproduire simultanément les trois observations et estime un terme source. L'énergie produite par le foyer est donc sous estimée. Comme en atteste la sous évaluation des flux verticaux. La reproduction de ces observations passe par la détermination



(a) Les observations correspondent aux mesures des flux-mètres FRH2 : —, FRH3 : —, FRH4 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

(b) La courbe continue (—) représente l'évolution du débit calorifique évaluée expérimentalement via la calorimétrie par consommation d'oxygène. L'évolution estimée par OBIWANE est illustrée en (- - -).



(c) Les observations correspondent aux mesures des flux-mètres FRV1 : —, FRV2 : — et FRV3 : —. Les observables sont représentées avec les mêmes jeux de couleurs en pointillés.

FIGURE 4.17 – Principaux résultats obtenus pour le scénario de feu d'un Véhicule Utilitaire Léger (VUL)

des phénomènes liés à l'asymétrie des observations sur les flux horizontaux. De plus, à l'instant  $t=1500$  s, nous observons un changement de dynamique du foyer. Le phénomène lié à cette modification doit être identifié.

### 4.3.3 Un problème plus complexe

Nous étudions les vidéos et raccordons les événements identifiés aux observations sur les fluxmètres. À l'issue, les paramètres clés de la reproduction de l'essai sont discutés.

#### Investigation, déroulement et mesures indirectes

L'essai du scénario de feu de VUL, qui a duré 3600 s, a été réalisé le 29 novembre 2019 par un temps nuageux avec une température ambiante de l'ordre de 10 ° C. L'étude du déroulement de cet essai est non exhaustive et permet de situer les phases importantes d'évolution du foyer de VUL (voir [Figure 4.18](#)). Les événements marquants dans le déroulement sont positionnés dans le plan du véhicule ([Figure 4.18i](#)).

Soixante secondes après l'allumage, les flammes impactent le pare-brise qui se fissure ([Figure 4.18a](#)). À ce stade, étant donné la hauteur des flammes, il semble que la partie basse du siège avant droit soit en feu. Après 400 s environ, le foyer s'est propagé au tableau de bord et possiblement au siège avant gauche ([Figure 4.18b](#)). La caméra avant gauche, malgré sa position, ne permet pas de confirmer cette dernière observation. Après 900 s, les flammes atteignent le milieu du véhicule. Les contre-plaqués obstruant les vitres du milieu sont percés et des flammes y apparaissent ([Figure 4.18c, 4.18d](#)). Aux positions de ces vitres, les flammes se situent au niveau du chargement. Après 1100 s, le foyer se propage également au compartiment moteur ([Figure 4.18e](#)). Après 1400 s, des flammes finissent par apparaître à l'arrière du véhicule ([Figure 4.18f](#)). À 1500 s l'avant du véhicule est en feu ([Figure 4.18g](#)) suivi de l'arrière après 2000 s ([4.18h](#)).

L'étude de ce déroulement permet de corréliser les observations sur les flux thermiques ([Figure 4.17](#)) à des événements clés dans le développement du foyer ([Figure 4.18](#)).

Les premiers instants de l'essai sont marqués par un développement du foyer à l'intérieur du véhicule. Les flux thermiques sont faibles et ne varient pas. À  $t=400$  s, la rupture complète du pare-brise permet le développement des foyers et la sortie des flammes en dehors de l'habitacle. Les valeurs des flux thermiques augmentent aux positions des fluxmètres FRH2 et FRH3. Les flux croissent légèrement jusqu'à  $t=900$  s où une augmentation brusque est observée sur l'ensemble des positions de mesures. Cette évolution coïncide avec la propagation du feu au compartiment moteur, face aux fluxmètres verticaux. Le foyer est développé sur l'avant jusqu'à 1500 s. La valeur du flux sur le fluxmètre FRH4 augmente avec l'apparition de flammes à l'arrière du véhicule. Le foyer est complètement développé à l'arrière pendant qu'à l'avant son intensité continue de décroître. Les valeurs diminuent à toutes les positions à l'exception du FRH4 qui atteint une phase de stagnation.

Nous résumons le développement du foyer en deux phases. Jusqu'à 1500 s, le foyer est localisé essentiellement à l'avant du véhicule. La position de l'allumage (*i.e.* à l'avant droit du véhicule) et la présence des sièges expliquent en partie ce fait. Les sièges étant en grande partie en mousse s'enflamme plus facilement qu'un objet en bois ou en PE-HD. Ensuite, la rupture successive des contre-plaqués des vitres du milieu et de l'arrière du véhicule permet l'alimentation du foyer en oxygène à ces positions. Cette partie du VUL prend feu complètement après la rupture du contre-plaqué arrière à 1400 s.

#### Paramètres clés à évaluer

Les résultats de la première application d'OBIWANE et l'étude du déroulement démontrent l'intérêt de modéliser les parois du véhicule. De plus, l'étude du déroulement a permis de mettre en évidence l'importance de prendre en compte les ruptures des contre-plaqués. Ces derniers influencent la ventilation, la propagation du foyer et de manière indirecte les valeurs des flux thermiques.

Par la suite, nous admettons que les parois du véhicule sont inamovibles, non combustibles et que seules les vitres latérales, les pare-brises peuvent être détruits par l'incendie. Deux volumes sont considérés, le compartiment moteur et l'habitacle.

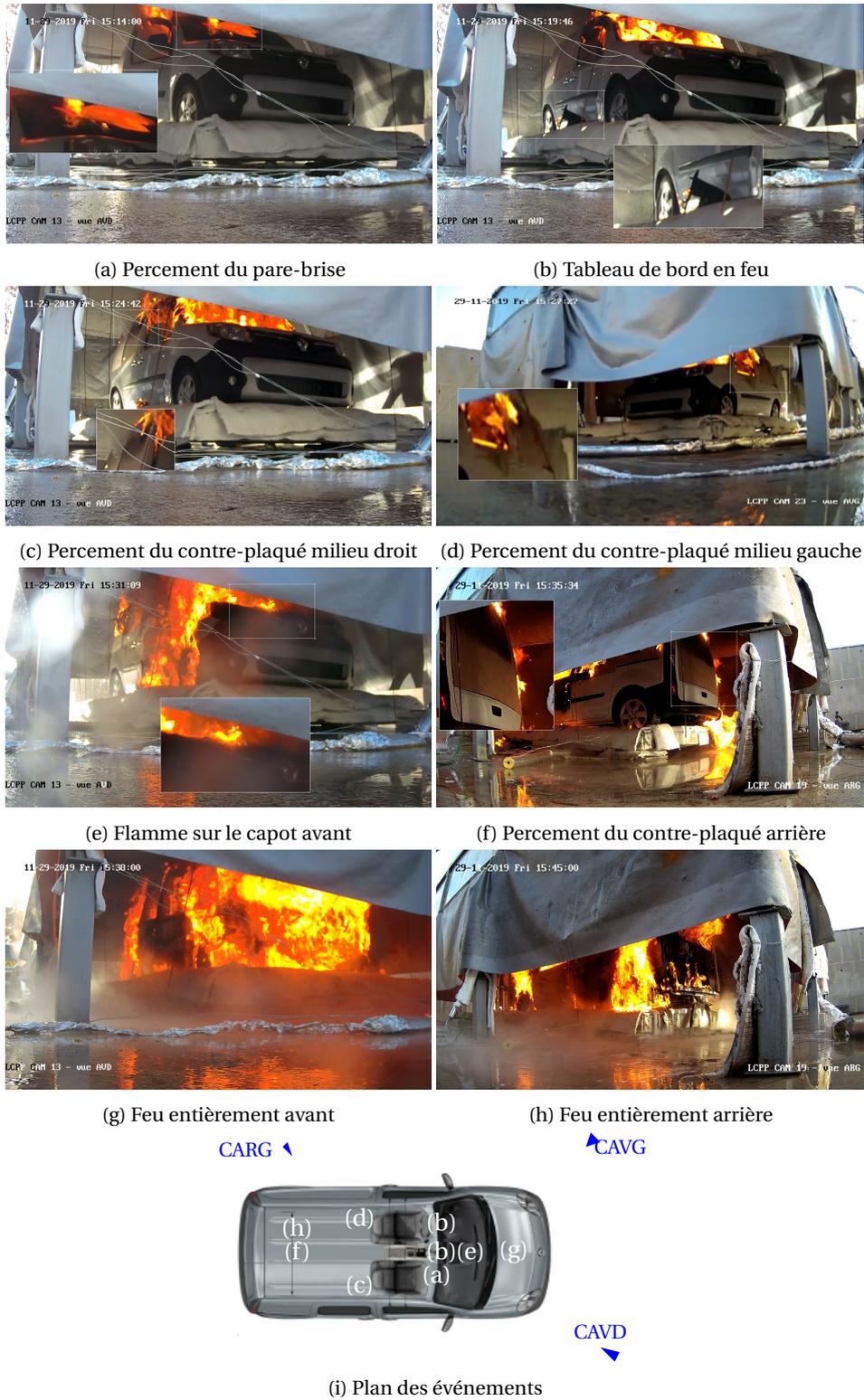


FIGURE 4.18 – Déroulement de l’essai du scénario de feu de véhicule. Les événements illustrés par les photographies sont positionnés dans le plan du véhicule 4.18i. La position des trois caméras est aussi reportée.

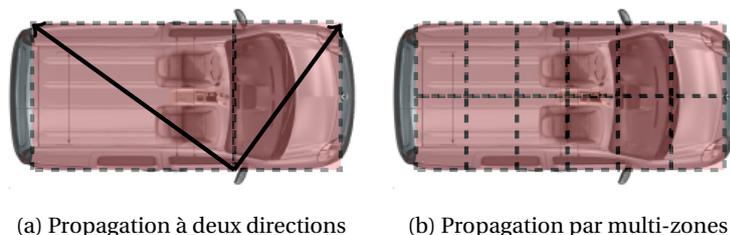


FIGURE 4.19 – Modèle de propagation possible du feu de VUL. Le vecteur de propagation est représenté par  $(\rightarrow)$ . Une zone est illustrée par  $(\cdot\cdot\cdot)$

Ces géométries sont modélisées par des parois (*i.e.* OBST dans **FDS**) dont certaines peuvent disparaître pour créer une ouverture. L'étude des vidéos permet de définir les temps associés à la disparition de chaque obstruction dans la simulation.

La propagation doit être prise en compte pour la modélisation de cet essai. En effet, jusqu'à présent le problème est basé sur l'hypothèse que la surface en feu est fixe. La première application de la méthode en illustre la limite pour cet essai.

Dans **FDS**, la propagation d'une flamme est modélisée numériquement soit par le paramètre  $r$ , équivalent à une vitesse, soit par l'activation de surfaces supplémentaires. Dans le premier cas, la direction de propagation n'est pas paramétrable mais est admise comme circulaire dont le point de départ est défini par l'utilisateur. Depuis ce point particulier, la propagation est modélisée de manière homogène dans le plan du foyer à une vitesse donnée. L'évaluation de ce dernier paramètre est discutée plus tard. Les considérations précédentes permettent d'établir deux modèles de foyer pour cet essai.

Le premier modèle consiste à diviser le foyer en deux, l'un comprenant le compartiment moteur, l'autre, l'habitacle (voir [Figure 4.19a](#)). Ce modèle est basé sur la séparation entre la propagation vers l'avant et vers l'arrière de l'incendie dans le véhicule. La direction de propagation de l'une ou l'autre des surface est imposée par le point de départ commun à une maille près. À chaque surface, une vitesse de propagation peut être optimisée ou une valeur peut être imposée aux deux surfaces. Ce dernier cas est privilégié afin de simplifier le problème. Ainsi, une dimension d'entrée supplémentaire est considérée. La pente du débit calorifique prescrit au code numérique ne dépend alors plus uniquement de la valeur du débit calorifique mais aussi de celle de la vitesse de propagation telle que :

$$a = f(\dot{Q}, r). \quad (4.3)$$

À l'heure actuelle, la méthode itérative d'optimisation n'est pas programmée pour optimiser plusieurs paramètres. Nous devons donc considérer autrement la propagation.

Le second modèle consiste à diviser le foyer en plusieurs surfaces identiques (voir [Figure 4.19](#)). Une surface activée dans le code signifie que l'incendie s'y est développé. Ce modèle nécessite donc d'étudier la propagation précisément afin d'évaluer l'instant à partir duquel une surface est en feu. La pente du débit calorifique dépend à la fois du débit calorifique et de la surface en feu :

$$a = f(\dot{Q}, S). \quad (4.4)$$

Nous nous intéressons maintenant à l'évaluation de la vitesse de propagation nécessaire au second modèle. L'étude des vidéos et des mesures, comme effectuée précédemment, permet d'établir l'instant d'un événement. Dans la position du chargement solide et du fait de l'obstruction des vitres, ces données constituent des observations indirectes. Nous admettons alors que l'apparition d'une flamme sous une paroi et le percement d'un contre-plaqué sont les marqueurs d'un foyer établi à la position associée. Dès lors que l'un de ces événements se produit à une position dans le VUL, la surface qui s'y trouve est activée. La propagation est ainsi prescrite comme un paramètre du terme source et non une variable à optimiser. Finalement, nous pouvons alors le résoudre en suivant la même procédure que celle décrite dans le [chapitre 2](#).

Nous discutons maintenant de la nature du combustible. Les photographies (voir [Figure 4.15](#)) illustrent un foyer formé de divers combustibles. En effet, le chargement est composé à la fois de pin et de PE-HD. Les sièges sont admis comme étant de la mousse polyuréthane (PU). Le tableau de bord et le compartiment moteur sont définis comme composés de PE-HD. Les deux modèles de propagation précédents ne permettent pas de définir des matériaux différents à chaque position dans le véhicule. Nous effectuons donc l'hypothèse que le combustible prescrit, dans ces modèles, est caractérisé par un matériau équivalent à cette diversité. La formule chimique, l'enthalpie et les quantités de produits de combustion sont des moyennes des valeurs de chaque combustible.

#### 4.4 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre 4, la méthode OBIWANE est appliquée à la reconstruction du terme source d'une variété de foyers. Le premier essai se déroule dans la géométrie des essais au brûleur, dans lequel un foyer d'hydrocarbure est en position centrale. OBIWANE reproduit l'essai et reconstruit le terme source de ce foyer. Dans ce cas, la méthode OBIWANE parvient à reconstruire une chute de débit calorifique survenue environ à la moitié de l'essai.

Les essais d'un foyer de trois fûts d'hydrocarbure et d'un assemblage de matériaux de construction permettent d'évaluer la capacité de OBIWANE à reproduire des essais en extérieur. Ces deux essais sont bien reproduits et les termes sources reconstruits. Il est à noter que les termes sources reconstruits sont comparés à ceux mesurés par calorimétrie. OBIWANE est donc en capacité d'évaluer des termes sources dans les mêmes conditions que des méthodes classiques.

La reproduction du dernier essai, celui d'un foyer de véhicule, est uniquement discuté à la fin de ce chapitre 4. Étant donné les résultats du calcul simplifié où le véhicule est assimilé à une surface en feu, la méthode semble en capacité de reconstruire le terme source de ce foyer. Une modélisation du véhicule avec prise en compte de la ventilation et de la forme de la carrosserie permettraient dans un premier temps de reproduire l'asymétrie et le décalage temporel observés entre les fluxmètres. La propagation pourrait aussi être prise en compte par différentes approches dont certaines nécessitent de modifier la méthode OBIWANE.

# Conclusion

Dans ce manuscrit, nous nous intéressons à l'évolution temporelle de la production d'énergie d'un foyer. Cette évolution représente ce que nous appelons, par la suite, le terme source. Dans la plupart des pratiques d'ingénierie en incendie, le terme source constitue une donnée centrale. Expérimentalement, des méthodes dites « classiques », telles que la calorimétrie par consommation d'oxygène, permettent d'évaluer cette quantité. Néanmoins, elles sont restreintes à des foyers de forme et de composition simple et ne prennent pas en compte l'environnement dans lequel ces foyers se développent. Par exemple, l'évolution du débit calorifique d'un véhicule en feu est toujours mesurée en champ libre et non dans un environnement particulier (le long d'un mur, dans un parking sous terrain, etc). La mise en place de ces moyens de mesure peut par ailleurs s'avérer être très compliquée dans certains cas.

Des travaux récents, sur la détermination de caractéristiques d'un phénomène physique en incendie, mettent en lumière des méthodes qui permettraient de s'affranchir de ces limites. Ces méthodes sont basées sur des démarches d'optimisation mettant en oeuvre la simulation numérique du phénomène.

Nous proposons donc une démarche qui s'appuie sur des outils de simulation numérique pour reconstruire un terme source. Nous nous basons sur l'hypothèse que si l'outil numérique reproduit correctement certaines grandeurs physiques simples, mesurées autour du foyer (*i.e.* températures, flux, etc), alors le terme source prescrit dans la simulation doit être proche de la réalité. Cette méthode, appelée OBIWANE, est basée sur la simulation en parallèle, par [FDS](#), d'une multitude de termes sources. Les données de sortie (*i.e.* observables) issues de ces simulations sont comparées à des mesures réelles (*i.e.* observations) pour reproduire pas à pas un essai et ainsi reconstruire le terme source expérimental.

La méthode OBIWANE est ensuite utilisée pour caractériser une série d'essai dont le foyer est de plus en plus complexe, allant d'une brûleur au propane, à un feu de véhicule en passant par des feux de bac d'hydrocarbure. Pour analyser et discuter des résultats nous pouvons considérer deux grandes familles d'essais :

- Les essais en milieu « confiné » : plusieurs feux avec un brûleur et un bac d'hydrocarbure,
- Les essais en champ « libre » : un foyer de trois bacs d'hydrocarbure, un assemblage de matériaux solides et un véhicule.

Lors de ces essais, des phénomènes physiques différents sont observés, principalement fonctions du cloisonnement du foyer. Dans un milieu confiné, un plafond de fumée ou encore une stratification thermique peuvent être observés; des mesures de température dans la hauteur permettent d'évaluer cette stratification. Dans un milieu libre, le plafond de fumée ne peut pas se former; des mesures de flux positionnées à la même hauteur et autour du foyer peuvent alors être suffisantes pour évaluer les phénomènes thermiques.

Les résultats des essais en milieu confiné mettent en lumière certaines limites liées notamment à la reproduction de la stratification. En effet dans le cas du brûleur, un écart d'environ 50 % entre le terme source reconstruit par OBIWANE et celui prescrit lors de l'essai est quasiment systématiquement observé. En ce qui concerne l'essai du bac d'hydrocarbure, cet écart est moins important, mais représente tout de même 25 % dans les premiers instants du feu. L'étude des observations (*i.e.* ici des températures) permet toutefois d'expliquer ces écarts. En effet, nous re-

marquons que le gradient des températures dans la couche chaude simulé par FDS est de 10 ° C contre 50 ° C mesuré en essai. En milieu libre, la diversité des foyers et les conditions extérieures n'ont pas posé de problèmes à OBIWANE pour reconstruire les débits calorifiques. Les résultats sont très satisfaisants et présentent une erreur de reconstitution assez faible de l'ordre de 10%.

Nous sommes cependant amenés à reconsidérer l'hypothèse formulée en début de cette thèse que si l'outil numérique reproduit correctement certaines grandeurs physiques simples, mesurées autour du foyer (*i.e.* températures, flux, etc), alors le terme source prescrit dans la simulation doit être proche de la réalité. Par exemple en milieu confiné et suivant la nature, la position du foyer, le terme source reconstruit peut être différent de celui que l'on mesurerait expérimentalement. Cependant, il s'agirait de l'unique terme source qui permettrait de reproduire les observations de l'essai avec l'outil de simulation utilisé.

Les écarts entre les observations et les observables pourraient être corrigés par une programmation plus approfondie du code numérique FDS. L'emploi d'un maillage plus fin serait une solution (*i.e.* une taille de maille inférieure à 10 cm) ce qui se ferait, bien évidemment, au détriment du temps de calcul. D'autres solutions peuvent être envisagées comme le recours à d'autres outils de simulation numérique plus à même de reproduire le gradient de températures et certains phénomènes qui accompagnent les feux en milieu confiné.

Le recours à la simulation numérique implique bien entendu une réflexion sur la consommation des ressources de calcul. Ces résultats sont obtenus en moyenne après une dizaine de jours d'un calcul monopolisant environ 80 coeurs. Cette consommation importante de ressources constitue une faiblesse de OBIWANE. Cependant, la mise en place d'une hotte calorimétrique (*i.e.* basée sur la calorimétrie par consommation d'oxygène) nécessite des moyens humains et matériels importants pour coiffer un véhicule afin d'en mesurer le terme source. OBIWANE ne nécessite que des données issues de mesures simples et peu coûteuses, le temps de calcul peut alors être relativisé. Dans un soucis de perfectionnement de OBIWANE, nous pouvons toutefois nous interroger sur les leviers qui permettraient de réduire la consommation des ressources de calcul.

Les opérations effectuées par OBIWANE dépendent effectivement de paramètres dont les valeurs sont restées fixes tout au long de ces travaux et qui conditionnent les ressources nécessaires. Afin de réduire cette consommation, les valeurs de ces paramètres doivent être adaptées à chacun des essais. Prenons par exemple comme paramètre, le temps d'exploration fixé à 60 s quelle que soit la phase de l'incendie (*i.e.* croissance, stationnaire, décroissance). Une étude automatisée préalable des observations (*i.e.* mesures, vidéo etc.) pourrait être envisagée, afin d'adapter l'intervalle d'exploration en fonction de la dynamique de l'incendie, en considérant la dérivée seconde par exemple. L'intervalle d'exploration pourrait être fixé à 60 s pour une croissance contre 240 s pour une phase stationnaire.

La réduction de la consommation des ressources pourrait aussi être obtenue en améliorant de l'étape de décomposition de l'espace des paramètres. Pour ce faire, sans augmenter le nombre d'individus et donc le temps de calcul, il serait nécessaire d'ajuster dynamiquement les bornes  $a_{\min}$  et  $a_{\max}$  (*i.e.* les bornes inférieure et supérieure de l'espace des paramètres) à chaque itération. Cette étape d'ajustement pourrait prendre en compte l'évolution des solutions précédentes, c'est à dire la dynamique du phénomène pour estimer un espace des paramètres réduit. La prédiction serait plus fine ce qui permettrait de réduire le nombre d'individus sans dégrader la décomposition de l'espace des paramètres. Ces modifications pourraient avoir un impact non négligeable sur les ressources nécessaires aux calculs.

Bien qu'il y ait des pistes d'améliorations certaines, les résultats présentés dans ce manuscrit permettent d'envisager des perspectives utiles dans les études menées au LCPP.

En effet, depuis plusieurs années, le laboratoire effectue des essais instrumentés très variés; des feux de palettes dans une circulation d'immeuble, aux feux de parking sous terrain en passant par des feux d'appartements. La reproduction de ces essais à partir des mesures indirectes

avec OBIWANE ne nécessiterait qu'un travail de configuration et de modélisation de la géométrie. Les résultats obtenus permettraient de quantifier les termes sources de tels incendies. Ces termes sources fourniraient à des modélisateurs, des données d'entrées précises pour reconstituer une ambiance thermique particulière dans une configuration géométrique donnée avec le simulateur numérique utilisé (*i.e.* FDS jusqu'à présent). Ces données d'entrée complèteraient les données connues et déjà utilisées dans le cadre de l'ISI, en expertise post-sinistre et plus largement en incendie.

Enfin, à condition d'effectuer certains ajustements nécessaires, l'algorithme OBIWANE pourrait permettre de mesurer des termes sources difficilement accessibles par les méthodes classiques. En effet, toutes les mesures impliquant une hotte calorimétrique sont effectuées pour des essais en champ libre. Par exemple, le débit calorifique d'un feu de véhicule dans un parking sous terrain influencé par un plafond de fumées est difficilement mesurable et, est pratiquement impossible à extrapoler depuis un essai en champ libre. Une estimation semble réalisable avec OBIWANE s'il est associé à un code de calcul correctement paramétré pour simuler la stratification thermique.

À plus long terme, les démarches proposées dans ce manuscrit pourraient donc permettre de mesurer plus finement un terme source dans un environnement particulier. Cette méthode constituerait un nouvel outil pour améliorer la fidélité des études en ISI. Associée à une cartographie des températures déduites de l'étude des sollicitations thermiques, l'utilisation de OBIWANE dans une démarche de reconstitution de sinistre pourrait aussi à terme être envisagée.



# Bibliographie

- [1] Arrêté du 22 mars 2004 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (dispositions relatives au désenfumage), March 2004. Library Catalog : Légifrance. [8](#), [9](#)
- [2] L. Arnold, T. Hehnen, P. Lauer, C. Trettin, and A. Vinayak. PROPTI – A Generalised Inverse Modelling Framework. *Journal of Physics : Conference Series*, 1107 :032016, November 2018. [vii](#), [xi](#), [12](#), [13](#), [14](#)
- [3] Laboratoire central de la préfecture de police (LCPP). *Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage : établissements recevant du public*. Préfecture de Police, Paris, May 2017. [9](#)
- [4] L. Y. Cooper. Estimating the environment and the response of sprinkler links in compartment fires with draft curtains and fusible link-actuated ceiling vents—Theory. *Fire Safety Journal*, 16(2) :137 – 163, 1990. [10](#)
- [5] J. W. Deardorff. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Boundary-Layer Meteorology*, 18(4) :495–527, June 1980. [37](#), [II](#)
- [6] Q. Duan, S. Sorooshian, and V. K. Gupta. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3) :265–284, June 1994. [12](#)
- [7] G. Erez. *Modélisation du terme source d'incendie : montée en échelle à partir d'essais de comportement au feu vers l'échelle réelle : approche "modèle", "numérique" et "expérimentale"*. These de doctorat, Université de Lorraine, October 2019. [7](#)
- [8] R. M. Errico, T. Vukicevic, and K. Raeder. Examination of the accuracy of a tangent linear model. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, 45(5) :462–477, January 1993. Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.3402/tellusa.v45i5.15046>. [11](#)
- [9] J. H. Friedman. Greedy Function Approximation : A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*, 29(5) :1189–1232, 2001. Publisher : Institute of Mathematical Statistics. [21](#)
- [10] M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W. H. Cabot. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A : Fluid Dynamics*, 3(7) :1760–1765, July 1991. Publisher : American Institute of Physics. [37](#)
- [11] A. Griewank and A. Walther. *Evaluating Derivatives : Principles and Techniques of Algorithmic Differentiation, Second Edition*. SIAM, November 2008. Google-Books-ID : qMLUJsgCwvUC. [11](#)
- [12] C. Grossmann, H-G. Roos, and M. Stynes. *Numerical Treatment of Partial Differential Equations*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007. [I](#)
- [13] C. Huggett. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, 4(2) :61–65, 1980. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fam.810040202>. [5](#)
- [14] M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. H. Jr, K. Harada, E. D. Kuligowski, Milosh Puchovsky, Jose L. Torero, John M. Watts Jr, and CHRISTOPHER J. WIECZOREK. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, volume 1. Springer, 5 edition, October 2015. [xi](#), [9](#), [23](#), [32](#), [61](#), [67](#), [68](#)

- [15] NIST Office of Data and Informatics. WebBook de Chimie NIST. Publisher : National Institute of Standards and Technology. [68](#)
- [16] International Investigators. *Fire Investigator : Principles and Practice to NFPA 921 and 1033*. Jones & Bartlett Publishers, February 2011. Google-Books-ID : KfbPc0ZMvhgC. [9](#)
- [17] W. Jahn, G. Rein, and J. L. Torero. Forecasting fire growth using an inverse zone modelling approach. *Fire Safety Journal*, 46(3) :81–88, April 2011. [10](#), [11](#), [12](#), [14](#)
- [18] R. J. LeVeque. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press, August 2002. Google-Books-ID : O\_ZjpMSZiwoC. [1](#)
- [19] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, and M. Vanella. FDS - Fire Dynamics Simulator (Version 6) : Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, September 2013. [23](#), [36](#), [I](#), [II](#)
- [20] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, and M. Vanella. FDS - Fire Dynamics Simulator (Version 6) : User's Guide. Technical Report NIST SP 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, September 2013. [23](#), [36](#), [37](#), [I](#)
- [21] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, and M. Vanella. FDS - Fire Dynamics Simulator (Version 6) : Technical Reference Guide Volume 2 : Verification. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, October 2013. [23](#), [36](#), [I](#)
- [22] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, and M. Vanella. FDS - Fire Dynamics Simulator (Version 6) : Technical Reference Guide Volume 3 : Validation. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, October 2013. [23](#), [36](#), [I](#)
- [23] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 1 : Technical Reference Guide. Technical Report NIST TN 1889v1, National Institute of Standards and Technology, December 2015. [1](#)
- [24] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2 : User's Guide. Technical Report NIST TN 1889v2, National Institute of Standards and Technology, December 2015. [1](#)
- [25] R. D. Peacock, P. A. Reneke, and G. P. Forney. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 3 : Software Development and Model Evaluation Guide. Technical Report NIST TN 1889v3, National Institute of Standards and Technology, December 2015. [1](#)
- [26] R. F. Richards, B. N. Munk, and O. A. Plumb. Fire detection, location and heat release rate through inverse problem solution. Part I : Theory. *Fire Safety Journal*, 28(4) :323–350, June 1997. [10](#), [14](#)
- [27] M. Suzanne. *Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie*. phdthesis, INSA de Rouen, November 2009. [9](#)
- [28] W. M. Thornton. XV. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 33(194) :196–203, February 1917. Publisher : Taylor & Francis. [5](#)
- [29] Y. Wang, C. Bertrand, M. Beshir, C. Kahanji, R. Walls, and D. Rush. Developing an experimental database of burning characteristics of combustible informal dwelling materials based on South African informal settlement investigation. *Fire Safety Journal*, 111 :102938, January 2020. [4](#), [5](#)
- [30] S. Welch and P. Rubini. Three-dimensional Simulation Of A Fire-resistance Furnace. *Fire Safety Science*, 5 :1009–1020, 1997. [38](#)

## Annexe A

# Présentation de deux types de codes numériques en incendie

### Code zones : CFAST

Les codes à zones ne sont pas basés sur la résolution des équations locales (i.e. continuité, Navier-Stokes et énergie) mais sur des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sur des volumes de contrôle. En particulier, dans le cas de l'incendie, ces outils divisent le volume intérieur d'un local en deux zones, une zone dite "froide" (air frais) en partie basse et une zone dite "chaude" (fumées) en partie haute. On se base sur l'hypothèse d'une stratification thermique dans le local avec l'existence d'une interface nette entre les deux zones. L'utilisateur doit simplement spécifier la géométrie, les conditions aux limites ainsi que le terme source  $\dot{Q}(t)$  et sa loi horaire (dynamique de croissance, durée du plateau, ...). Le panache thermique associé alimente alors la couche chaude qui va s'épaissir au cours du temps.

La zone chaude est caractérisée par son épaisseur  $h$  et par deux grandeurs uniformes (masse volumique  $\rho$  et température  $T$ ) qui évoluent au cours du temps. Ces grandeurs scalaires permettent ensuite d'estimer les échanges de masse et d'énergie dans un ensemble de locaux connectés (par des portes et des trémies par exemple) à partir de relations algébriques simples.

Bien que la physique soit grandement simplifiée, les codes à zones permettent des simulations très rapides afin de fixer les ordres de grandeurs ou de traiter un grand nombre de scénarios dans les approches statistiques à la base de l'analyse des risques.

L'un des codes à zones les plus utilisés dans le domaine de l'incendie est le code CFAST version 7 [24, 23, 25]. Dans le User's Guide de ce code, il est stipulé que son utilisation est limitée à des locaux dans le rapport d'aspect ( $h/l$  d'un local) est inférieur à 3 de sorte que la physique modélisée de manière dégradée reste néanmoins réaliste. *A contrario*, les codes à champs ne sont pas, eux limités par ce rapport d'aspect. Ces derniers sont décrits dans ce qui suit.

### Code à champs : FDS

FDS version 6 [20, 19, 22, 21] est un code à champs permettant la résolution des équations de la mécanique des fluides spécifiquement dédié à la modélisation des incendies et à leurs aérauliques associées. FDS appartient donc à la famille des codes Computational Fluid Dynamics (CFD). Une particularité de FDS est que les équations de la mécanique des fluides y sont résolues par différences finies [12]. Cela est assez inhabituel pour les codes CFD qui s'appuient généralement sur la méthode des volumes finis ([18]). Une conséquence forte, qui en résulte, est que dans FDS, le maillage doit nécessairement être structuré (i.e. constitué de parallélépipèdes 3D). De ce fait, il est difficile de traiter des problèmes impliquant des obstacles ou des volumes de géométrie courbée. En pratique, ce n'est pas gênant car FDS a surtout vocation à être utilisé pour modéliser des incendies dans des bâtiments de formes parallélépipédiques. Il est à noter que FDS est associé au programme SmokeView qui permet de post-traiter les données issues des simulations.

Comme pour les codes à zones, l'utilisateur est invité à prescrire le terme source (i.e.  $\dot{Q}(t)$ ). En

pratique, la puissance thermique calculée fluctue légèrement autour de la valeur prescrite. Cela est dû au fait que dans la simulation d'autres facteurs interviennent dans le calcul de ce paramètre tel que l'aéraulique notamment. La prise en compte de ces autres facteurs apporte un niveau de réalisme supplémentaire par rapport aux codes à zones.

Dans **FDS**, les équations de Navier-Stokes (qui régissent le mouvement de l'air et des fumées) sont couplées à la loi des gaz parfaits qui lie la masse volumique locale à la température. Les écoulements rencontrés en incendie étant relativement lents (typiquement de l'ordre du mètre par seconde), les équations sont résolues sous l'hypothèse d'un faible nombre de Mach. Une autre particularité forte de **FDS** est que la turbulence des écoulements est modélisée par la méthode de simulations des grandes structures (Large Eddy Simulation : LES). Par défaut, le modèle de turbulence est celui de Deardorff ([5]), cependant d'autres modèles de turbulence, appartenant à la famille des méthodes LES, sont disponibles [19].

En résolvant les équations locales, **FDS** permet une description fine de la physique des écoulements alors que **CFAST** ne propose qu'une vision très moyennée sur des volumes de contrôle.

D'une façon générale, les codes à champs permettent de reproduire des géométries avec un niveau de détail relativement fin et intègrent le couplage entre l'aéraulique et la combustion du foyer, ce qui n'est pas le cas des codes à zones. Évidemment cela a un prix, les temps de calcul sur les codes à champs (plusieurs heures, voire plusieurs jours) sont bien supérieurs à ceux des codes à zones qui permettent d'accéder, en quelques minutes, à des ordres de grandeur pertinents. De ce fait, ces deux outils sont complémentaires et massivement utilisés dans l'ingénierie actuelle (en particulier dans l'ingénierie du désenfumage) et de plus en plus fréquemment en expertise.

## Annexe B

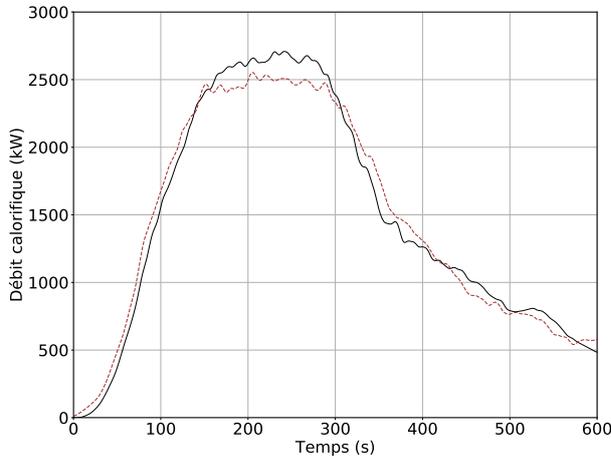
# Résultats obtenus pour les cas test de vérification

L'ensemble des résultats présentés dans le chapitre ?? sont illustrés dans cette annexe. Il s'agit des cas de test utilisés pour vérifier l'efficacité de l'algorithme OBIWANE; chaque simulation a été paramétrée différemment selon les éléments décrits dans le tableau ci dessous :

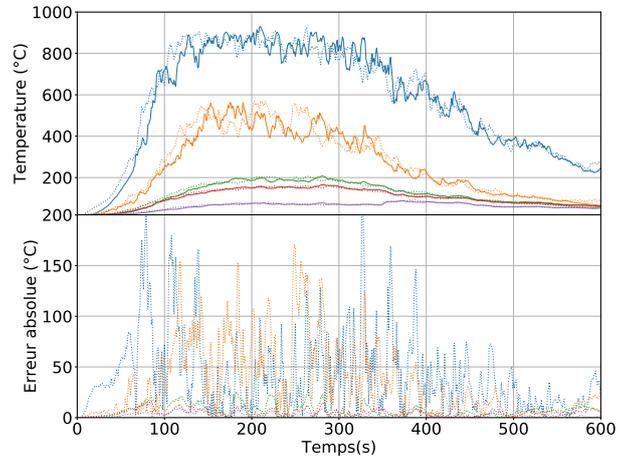
Cas de test	Paramètres				
	$\Delta t_{\text{exp}}$ s	$\Delta t_{\text{est}}$ s	C	S	$\dot{Q}'_{\text{max}}$ kW.m <sup>-2</sup>
Cas test <i>a</i>	60	30	5	20	3000
Cas test <i>b</i>	60	30	5	10	3000
Cas test <i>c</i>	240	120	5	20	3000
Cas test <i>d</i>	60	30	1	20	3000
Cas test <i>e</i>	60	30	5	20	6000
Cas test <i>f</i>	60	60	5	20	3000

TABLEAU B.1 – Rappel des cas de test utilisés pour vérifier OBIWANE

**Cas test a**



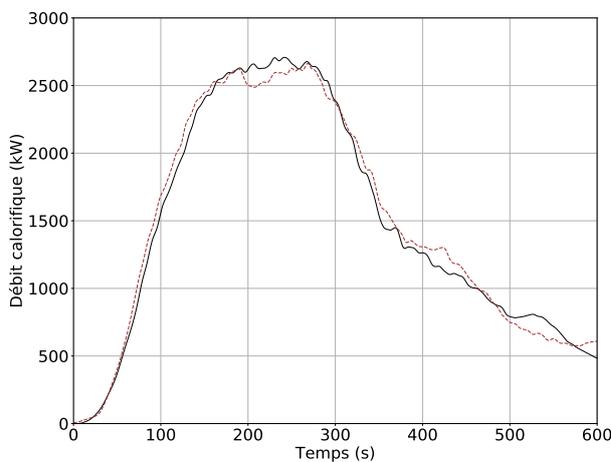
(a) Débit calorifique



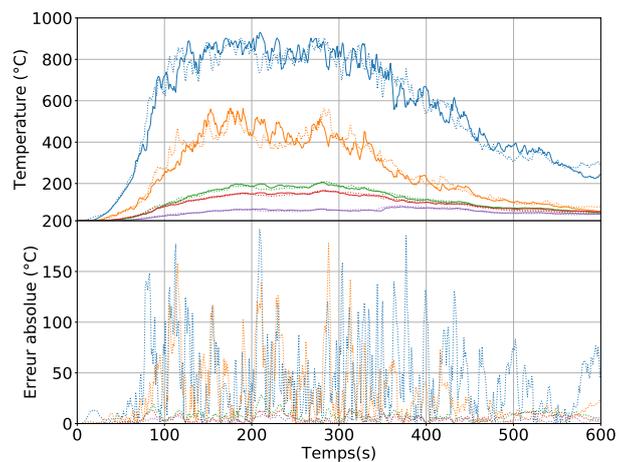
(b) Températures

FIGURE B.1 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario *a*. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par \_\_\_\_\_. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : —. Les températures de référence sont représentées par TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —. Les températures calculées sont représentées comme par exemple TC\_24<sub>calculé</sub> : .....

**Cas test b**



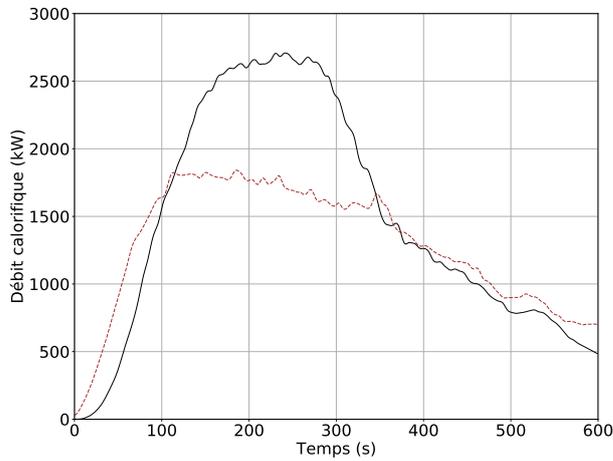
(a) Débit calorifique



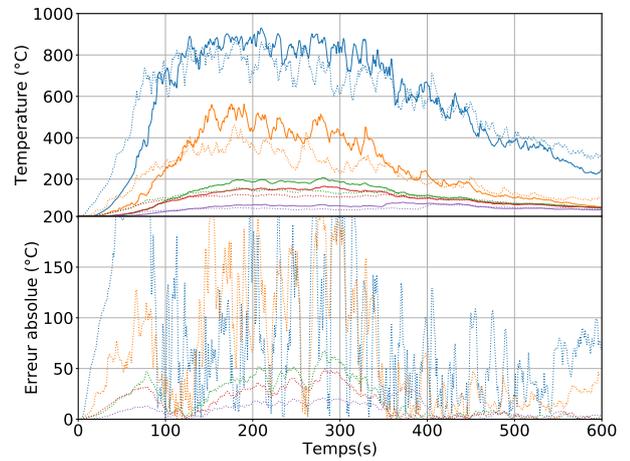
(b) Températures

FIGURE B.2 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario *b*. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par \_\_\_\_\_. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : —. Les températures de référence sont représentées par TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —. Les températures calculées sont représentées comme par exemple TC\_24<sub>calculé</sub> : .....

**Cas test c**



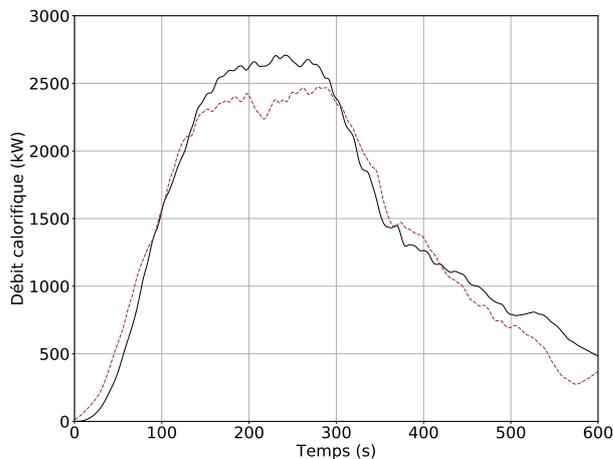
(a) Débit calorifique



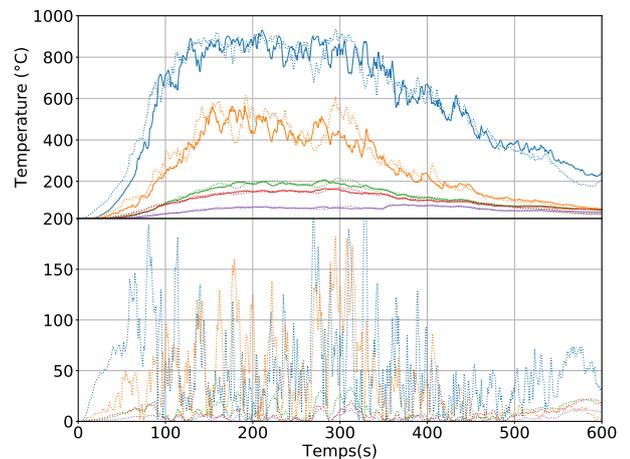
(b) Températures

FIGURE B.3 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario *c*. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par —. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : —. Les températures de référence sont représentées par TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —. Les températures calculées sont représentées comme par exemple TC\_24<sub>calculé</sub> : .....

**Cas test d**



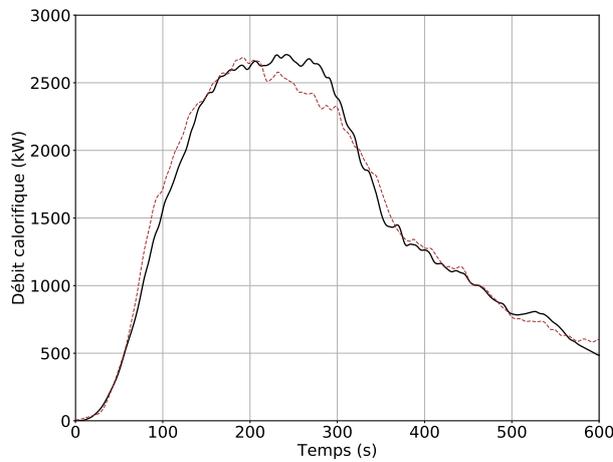
(a) Débit calorifique



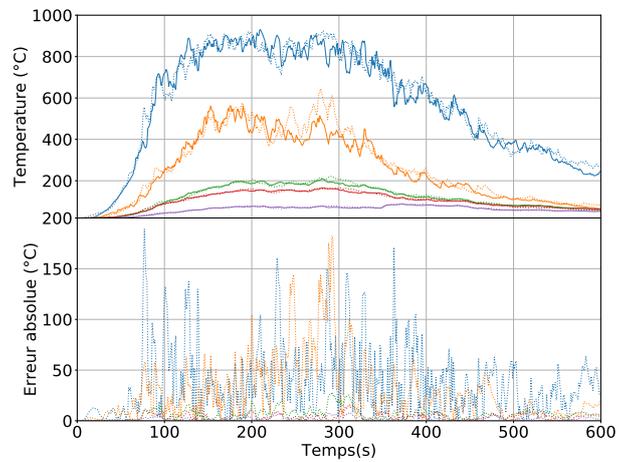
(b) Températures

FIGURE B.4 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario *d*. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par —. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : —. La température mesurée est représentée par TC\_20 : —. La température calculée est représentée par exemple TC\_20<sub>calculé</sub> : .....

Cas test e



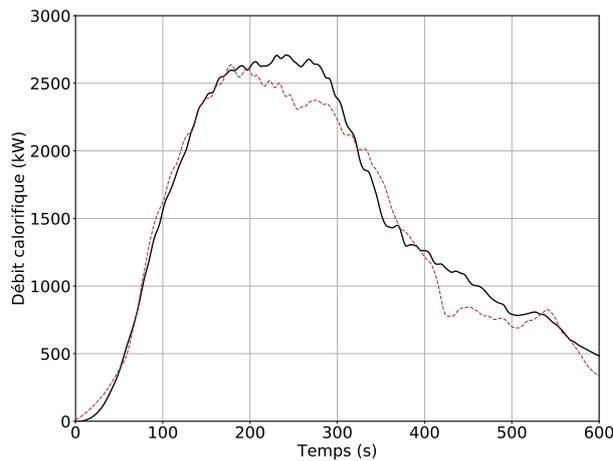
(a) Débit calorifique



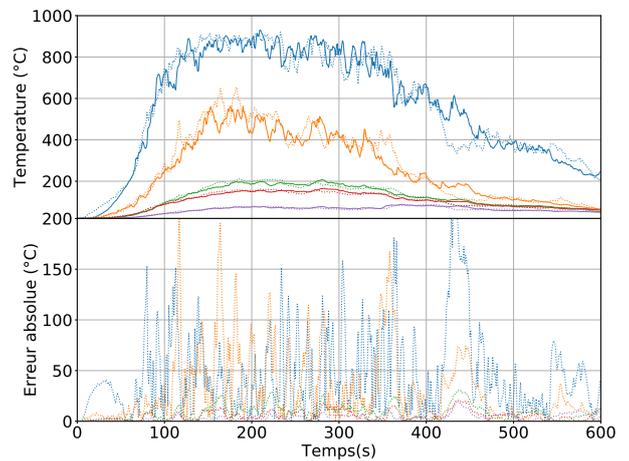
(b) Températures

FIGURE B.5 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario e. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par —. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : - - -. Les températures de référence sont représentées par TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —. Les températures calculées sont représentées comme par exemple TC\_24<sub>calculé</sub> : ·····.

Cas test f



(a) Débit calorifique



(b) Températures

FIGURE B.6 – Reconstitution de l'évolution du débit calorifique et des températures du scénario f. L'évolution du débit calorifique de référence est représentée par —. L'évolution du débit calorifique calculée est illustrée comme  $\dot{Q}_{\text{calculé}}$  : - - -. Les températures de référence sont représentées par TC\_24 : —, TC\_20 : —, TC\_16 : —, TC\_12 : —, TC\_08 : —. Les températures calculées sont représentées comme par exemple TC\_24<sub>calculé</sub> : ·····.

## **Annexe C**

# **Éléments techniques complémentaires des essais réalisés**

Les tableaux présentés dans cette annexe regroupent les données techniques de dimension et de composition des éléments utilisés lors des essais présentés dans l'ensemble du manuscrit.

### **C.1 Données techniques des essais en milieu confiné**

Tous les essais en milieu confiné ont été organisés dans des caissons aménagés spécialement sur un site dédié du LCPP. Les dimensions de la structure considérée sont présentées dans le tableau ci dessous :

Les caractéristiques des matériaux qui composent les caissons sont reportées ci dessous :

	Dimensions	Matériaux
	$L \times l \times h$ (m)	$e_{sol} \times e_{côtés} \times e_{plafond}$ (m)
Caisson	12.0 x 2.3 x 2.4	Acier x Acier x Acier 0.16 x 0.16 x 0.16
Zone feu	6.0 x 2.3 x 2.3	BR x TR/FS x TR/FS 0.1 x 0.005 x 0.005
Zone de transition	4.0 x 2.3 x 2.4	CP x TR/FS x TR/FS 0.03 x 0.0025 x 0.0025
Zone extérieure	2.0 x 2.3 x 2.4	CP x Acier x Acier 0.03 x 0.16 x 0.16

TABLEAU C.1 – La géométrie d’essai, le caisson, est divisée en trois zones (feu, transition, extérieur) comme illustré Figure 3.1. Les acronymes sont Brique réfractaire (BR), Tissu réfractaire (TR)<sup>1</sup>, Feutre de silice (FS), Contre-plaqué (CP)

Matériaux	Propriétés		
	$\lambda$	$\rho$	C
Acier	63.9	7832	0.434
Brique réfractaire	1.5	2645	0.96
Bois	0.087	350	1.59
Feutre de silice Haute température	De 20 : 0.03 à 1000 : 0.32	175	0.74
Feutre de silice	De 20 : 0.03 à 1000 : 0.32	135	0.74
Tissu réfractaire	De 20 : 0.03 à 1000 : 0.32	155	0.74

TABLEAU C.2 – Les matériaux des parois du caisson sont caractérisés par une conductivité thermique  $\lambda$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ , par une masse volumique  $\rho$  en  $kg.m^{-3}$  et une capacité thermique massique C en  $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ .

## C.2 Données techniques des essais en champ libre

Tous les essais en champ libre ont été organisés sur un site d'essai sur la commune de Saint Yan. Les tableaux ci dessous présentent les caractéristiques des matériaux de la structure et ceux qui composent les foyers.

Matériaux	Propriétés		
	$\lambda$	$\rho$	C
Béton	De 20 : 1.951 à 1000 : 0.57	2300	De 20 : 0.9 à 1000 : 1.1
Acier	48.0	7850	0.45
<b>Toile ignifugée (TI)</b>			
Isolant	0.095	128	0.9
Inox	14.8	7850	0.45

TABLEAU C.3 – Les matériaux du site d'essai de Saint Yan sont caractérisés par une conductivité thermique  $\lambda$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ , par une masse volumique  $\rho$  en  $kg.m^{-3}$  et une capacité thermique massique C en  $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ .

Nombres x Composants	Matériaux	$Lx/xe$	$m$
		m	kg
	$\lambda$	$\rho$	C
8 x Parpaings	Béton	0.5x0.2x0.2	160
9 x Tiges en acier	Acier	1.5xx0.009	13.5
6 x Palettes	Bois	1.2x0.8x0.12	144
	Polyéthylène Haute Densité (PE-hd)	1.2x1.0x0.14	53

TABLEAU C.4 – L'assemblage de palettes est composé de matériaux hétérogènes ne participant pas au foyer comme les parpaings, les tiges en acier en opposition avec les palettes en bois et en PE-hd.

Formule chimique	$\rho$	$\Delta H_c$	Taux de production de suies	$\chi_r$
$C_{12}H_{24}$	T= 15 ° : 820	44800		0.3

TABLEAU C.5 – Le diesel de formule  $C_{12}H_{24}$  est caractérisé par  $\Delta H_c = 44300 kJ.kg^{-1}$  et par une fraction radiative  $\chi_r = 0.3$ . Le taux de production de suies n'est pas connu.



## Annexe D

# Caractéristiques et positions des moyens de mesure

### D.1 Caractéristiques des capteurs

Appareil de mesure	Dimensions	Caractéristiques
Thermocouple	$d = 0.0015$	Gainé Type K (A : Chromel ; B : Alumel) Utilisation : 0 à 1100
Fluxmètre	$L \times l = 0.5 \times 0.5$	Radiatif non refroidi Sensibilité : 11,0 à 13,0 Thermocouple type T
Thermocouple		Type T (A : Cuivre ; B : Constantan <sup>1</sup> ) Utilisation : -270 à 370

TABLEAU D.1 – Le thermocouple type K de  $d = 0.0015$  m mesure une température entre 0 et 1100 ° C. Le fluxmètre radiatif non refroidi de  $L = 0.5$  m de côté mesure un flux thermique radiatif et est composé de thermocouple de type T pouvant être utilisé entre -270 et 370 ° C.

Thermocouples TC_LettreArbre_[N° TC]	Positions (x,y,z)
TC_A_[01-05]	(0.0,0.0,[0.4-2.0])
TC_B_[01-05]	(1.7,1.6,[0.4-2.0])
TC_C_[01-05]	(3.1,2.2,[0.4-2.0])
TC_D_[01-05]	(4.1,0.2,[0.4-2.0])
TC_E_[01-06]	(6.4,0.2,[0.0-2.0])
TC_F_[01-06]	(8.7,0.2,[0.0-2.0])
TC_G_[01-06]	(8.7,2.2,[0.0-2.0])
TC_H_[01-05]	(3.1,0.2,[0.4-2.0])
TC_I_[01-05]	(4.1,2.2,[0.4-2.0])
TC_J_[01-06]	(6.4,2.2,[0.0-2.0])

TABLEAU D.2 – Coordonnées des arbres de thermocouples

Fluxmètres FROrientation_N 01	Orientation	Positions (x,y,z)
FRH_01	Horizontale	(4.8,1.1,0.3)
FRH_02	Horizontale	(5.6,2.0,0.3)
FRH_03	Horizontale	(6.5,1.1,0.3)
FRH_04	Horizontale	(5.6,0.3,0.3)
FRH_05	Horizontale	(4.2,1.1,0.3)
FRH_06	Horizontale	(3.6,1.1,0.3)
FRV_01	Verticale	(3.6,1.1,0.4)
FRV_02	Verticale	(3.6,1.1,1.0)
FRV_03	Verticale	(3.6,1.1,1.6)

TABLEAU D.3 – Coordonnées des fluxmètres horizontaux et verticaux autour du foyer central

## D.2 Positions des capteurs

### Essais en milieu confinés

Fluxmètres FROrientation_N 01	Orientation	Positions ( <i>x,y,z</i> )
FRH_01	Horizontale	(0.3,1.3,0.3)
FRH_02	Horizontale	(1.2,1.3,0.3)
FRH_03	Horizontale	(1.2,0.5,0.3)
FRH_04	Horizontale	(1.5,1.0,0.3)
FRH_05	Horizontale	(1.8,0.7,0.3)
FRV_01	Verticale	(1.8,0.7,0.4)
FRV_02	Verticale	(1.8,0.7,1.0)
FRV_03	Verticale	(1.8,0.7,1.6)

TABLEAU D.4 – Coordonnées des fluxmètres horizontaux et verticaux autour foyer en coin

**Essais en champ libre**

Fluxmètres FROrientation_N 01	Orientation	Positions ( <i>x,y,z</i> )
FRH1	Horizontale	(4.8,0.5,1.1)
FRH2	Horizontale	(6.9,3.0,1.1)
FRH3	Horizontale	(4.8,4.8,1.1)
FRH4	Horizontale	(2.6,3.8,1.1)
FRV1	Verticale	(6.9,2.8,0.6)
FRV2	Verticale	(6.9,2.8,0.9)
FRV3	Verticale	(6.9,2.8,1.2)

TABLEAU D.5 – Coordonnées des fluxmètres autour du foyer « hydrocarbure »

Fluxmètres FROrientation_N 01	Orientation	Positions ( <i>x,y,z</i> )
FRH1	Horizontale	(2.5,1.0,1.1)
FRH2	Horizontale	(4.6,3.0,1.1)
FRH3	Horizontale	(2.5,5.0,1.1)
FRH4	Horizontale	(0.2,3.2,1.1)
FRV1	Verticale	(4.6,2.8,0.6)
FRV2	Verticale	(4.6,2.8,0.9)
FRV3	Verticale	(4.6,2.8,1.2)

TABLEAU D.6 – Coordonnées des fluxmètres autour du foyer solide de Saint-Yan

Fluxmètres FROrientation_N 01	Orientation	Positions (x,y,z)
FRH1	Horizontale	(4.8,0.5,1.1)
FRH2	Horizontale	(6.9,2.8,1.1)
FRH3	Horizontale	(4.8,5.1,1.1)
FRH4	Horizontale	(0.5,2.8,1.1)
FRV1	Verticale	(6.9,3.2,0.6)
FRV2	Verticale	(6.9,3.2,0.9)
FRV3	Verticale	(6.9,3.2,1.2)

TABLEAU D.7 – Coordonnées des fluxmètres autour du foyer VUL de Saint-Yan

## **Annexe E**

# **Résultats des reconstruction de terme sources des essais**

Dans cette annexe, l'ensemble des résultats obtenus lors des essais et la reconstruction numérique du terme source obtenue avec OBIWANE sont illustrés. Certains de ces résultats sont déjà présentés dans le manuscrit et sont rappelés ici.

## E.1 Foyers confinés

Pour chaque essai, la première série de figure présente la reconstruction de l'ambiance thermique en comparant les mesures numériques et expérimentales de chaque arbre à thermocouple et fluxmètres. La seconde série de figure présente la reconstruction du terme source obtenue associée aux mesures utilisées pour la reconstruction.

### E.1.1 Foyers prescrits

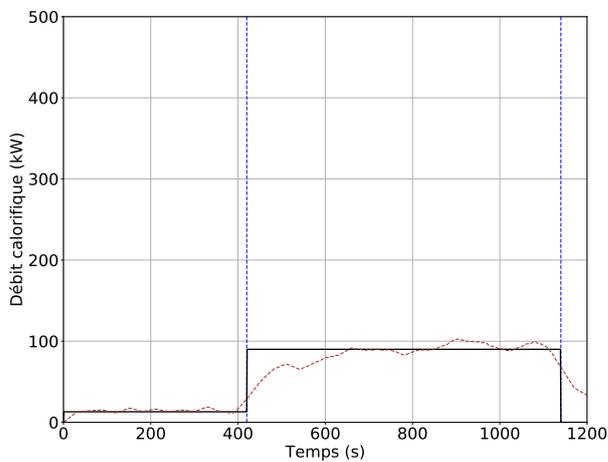
Les foyers prescrits à l'aide du brûleur au propane ont été paramétrés de la façon suivante :

Scénarios	Positions	Profils de débit $q = [\dot{Q}(t)]$	$\dot{Q}_{\max}$ kW	Phénomènes clés	Observations <i>y</i>
Scénario 1*	Centrale	Plateau simple	116	Faible gradient Phase croissante	[T]
Scénario 2*	Centrale	Plateaux croissants	116	Faible gradient Phase stationnaire	[T]
Scénario 3*	Centrale	Plateaux décroissants	116	Faible gradient Phase décroissante	[T]
Scénario 4	Centrale	Plateau simple	283	Phase stationnaire	[T]
Scénario 5	Centrale	Plateaux croissants	270	Phase croissante	[T]
Scénario 6*	Centrale	Plateaux décroissants	270	Phase décroissante	[T]
Scénario 7*	Coin	Plateau simple	116	Aéraulique Perturbée Phase stationnaire	[T]
Scénario 8	Coin	Plateaux croissants	116	Phase croissante	[T]
Scénario 9	Coin	Plateaux décroissants	116	Aéraulique Perturbée Phase décroissante	[T]
Scénario 10	Coin	Plateau simple	283	Aéraulique Perturbée Phase stationnaire	[T]
Scénario 11	Coin	Plateaux croissants	270	Aéraulique Perturbée Phase croissante	[T]
Scénario 12*	Coin	Plateaux décroissants	270	Aéraulique Perturbée Phase décroissante	[T]

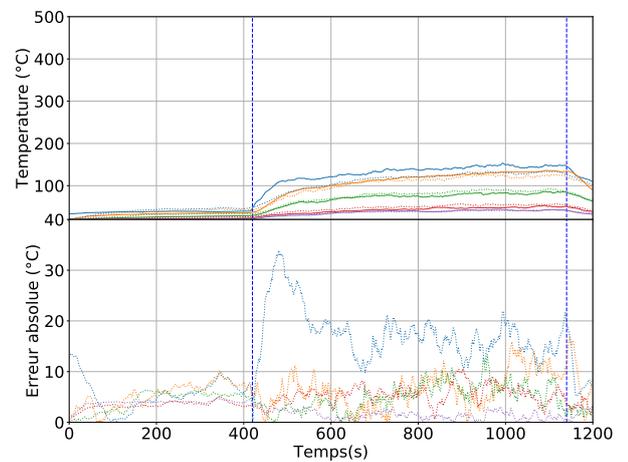
TABLEAU E.1 – Plan d'expérience des essais avec le foyer prescrit : les scénarios marqués par « \* » sont commentés précisément dans la [section 3.3](#).

Notons que lors des essais correspondant au scénario 4, 5 et 6, le brûleur n'a pas fonctionné correctement et certaines consignes de débit de gaz n'ont pas été correctement appliquées. Des reconstructions ont tout de même été effectuées avec les données issues de ces foyers. Cependant pour ces trois configurations, la comparaison directe de la consigne avec la reconstruction numérique reste peu pertinente. En effet, la consigne (ou terme source prescrit) représentée sur les figures illustrant les résultats est issue du débit de gaz imposé lors des essais. Comme le débitmètre n'a pas fonctionné correctement sur ces foyers, la consigne réellement appliquée est inconnue. Nous pouvons cependant observer la capacité de l'algorithme à reproduire l'ambiance thermique mesurée.

### Scénario 1

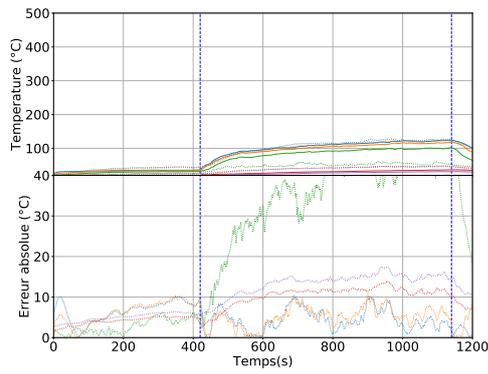


(a) Détermination du débit calorifique

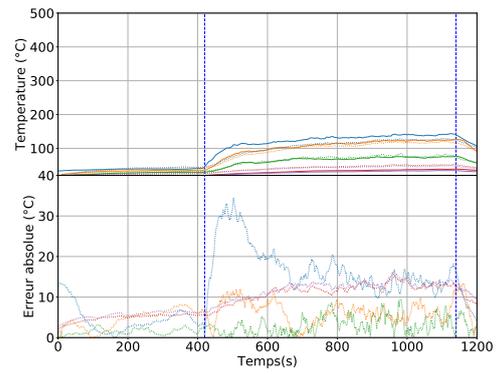


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

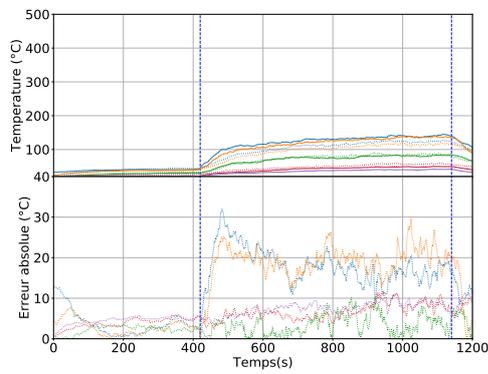
FIGURE E.1 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 1



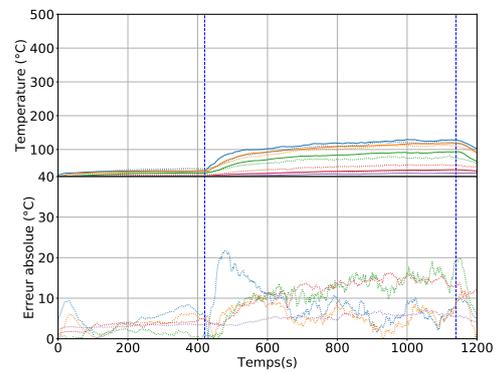
(a) Températures de l'arbre A



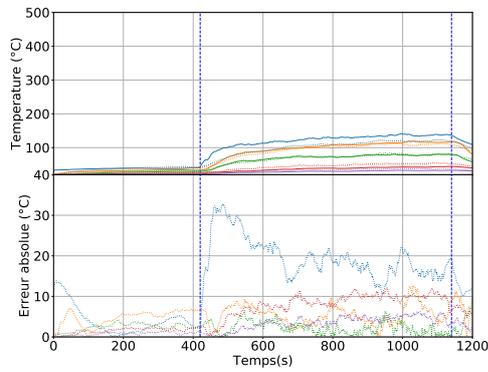
(b) Températures de l'arbre C



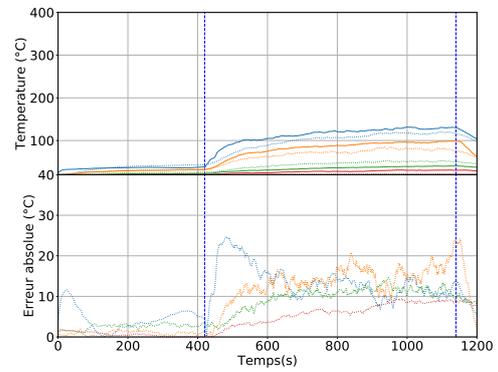
(c) Températures de l'arbre I



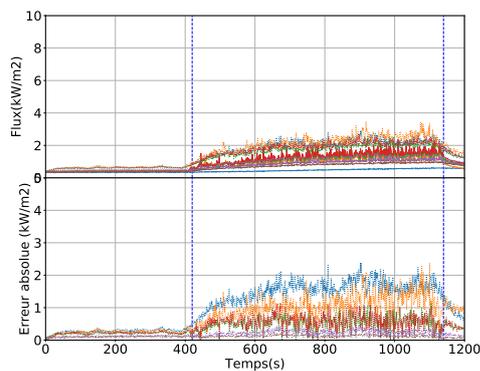
(d) Températures de l'arbre F



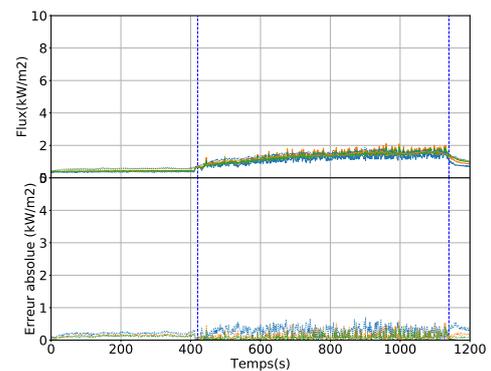
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



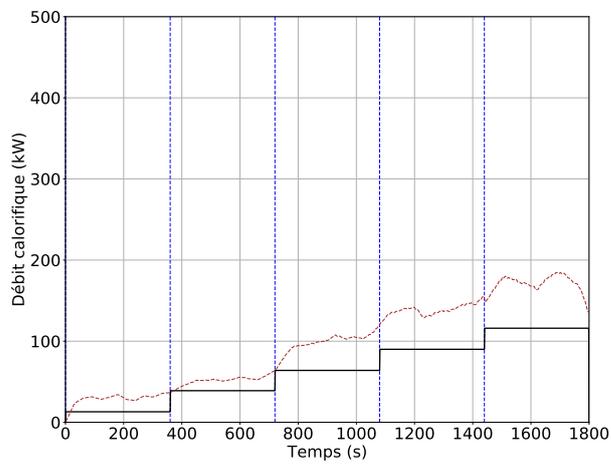
(g) Flux thermiques horizontaux



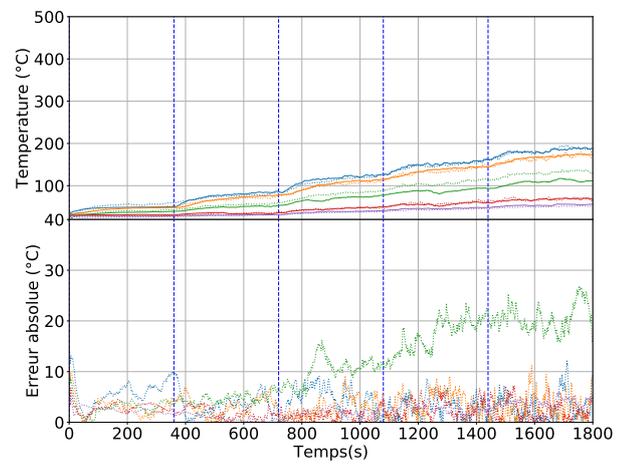
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.2 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 1

Scénario 2

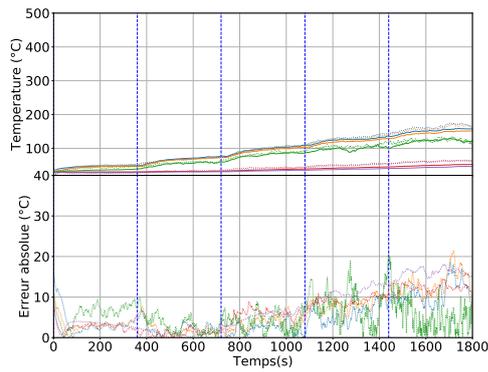


(a) Détermination du débit calorifique

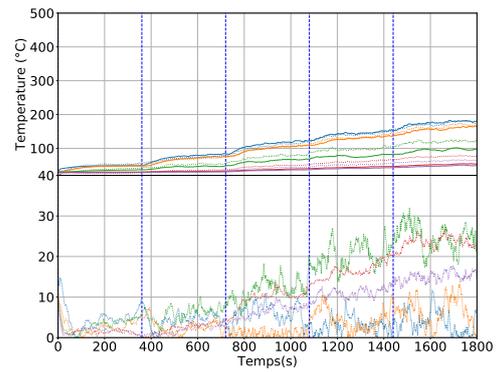


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

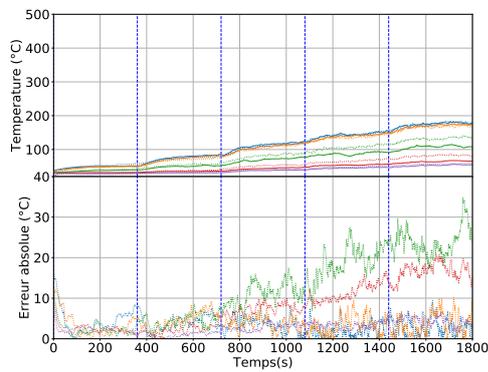
FIGURE E.3 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 2



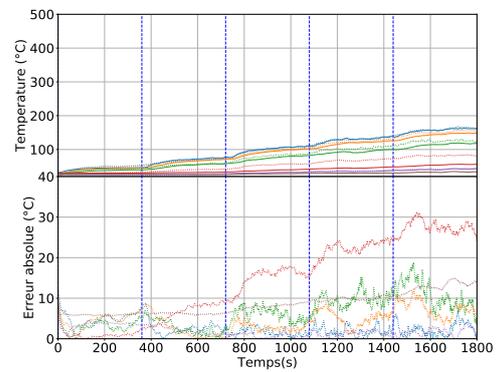
(a) Températures de l'arbre A



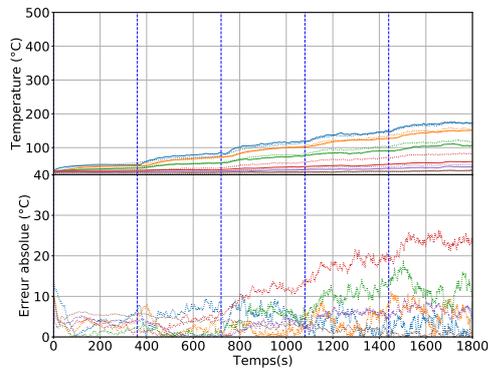
(b) Températures de l'arbre C



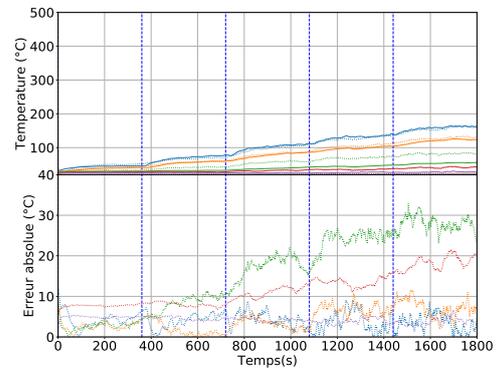
(c) Températures de l'arbre I



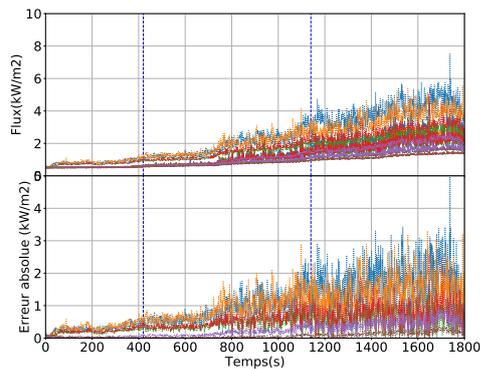
(d) Températures de l'arbre F



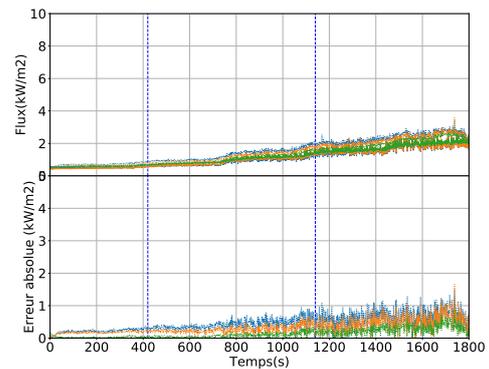
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



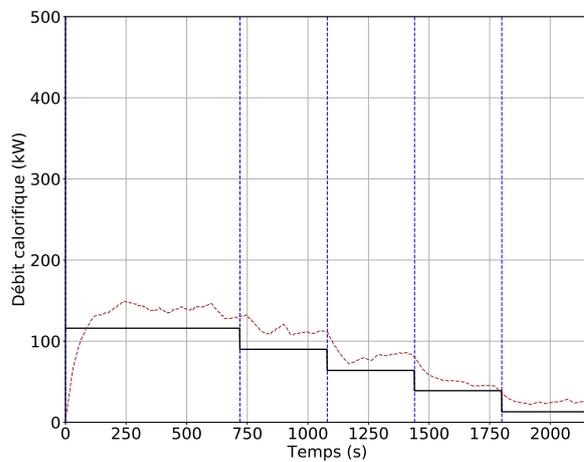
(g) Flux thermiques horizontaux



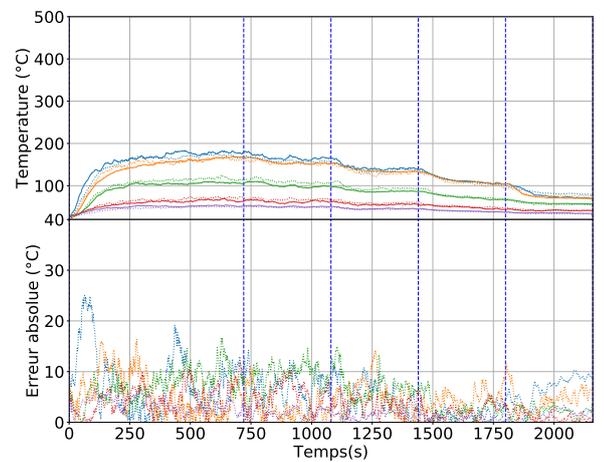
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.4 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 2

Scénario 3

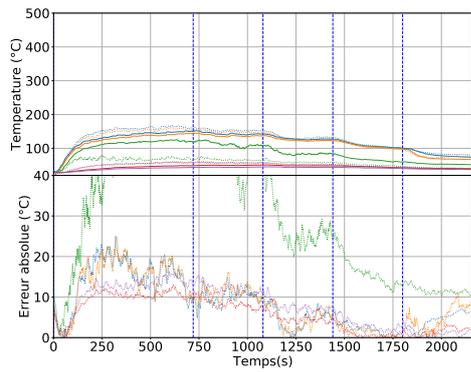


(a) Détermination du débit calorifique

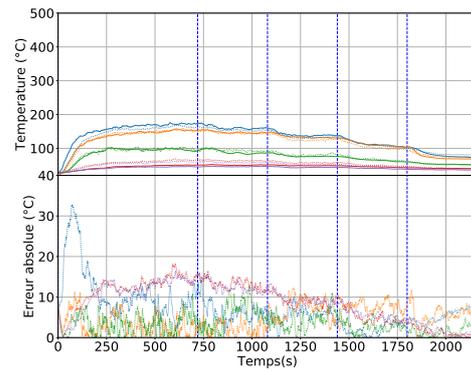


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

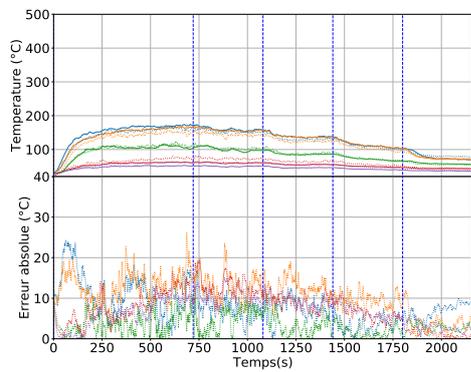
FIGURE E.5 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 3



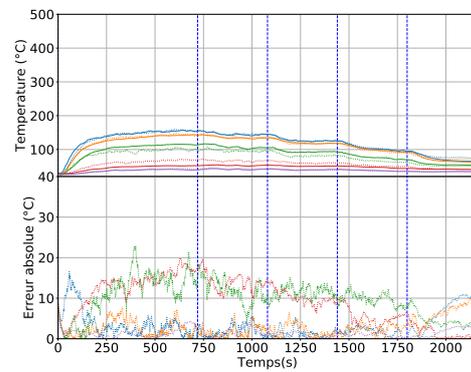
(a) Températures de l'arbre A



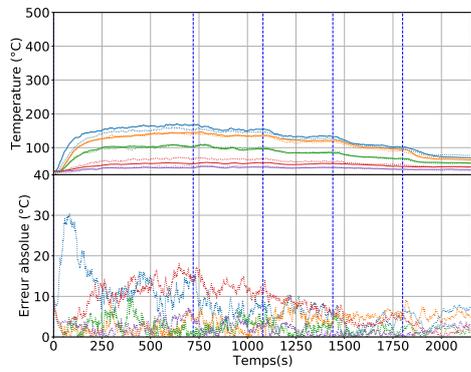
(b) Températures de l'arbre C



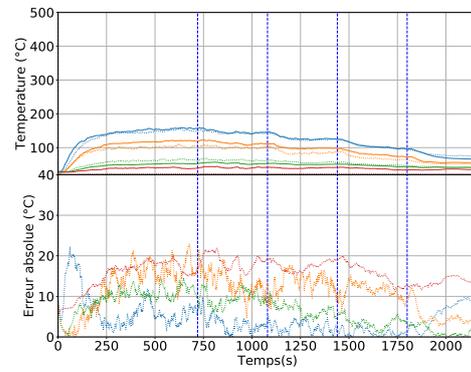
(c) Températures de l'arbre I



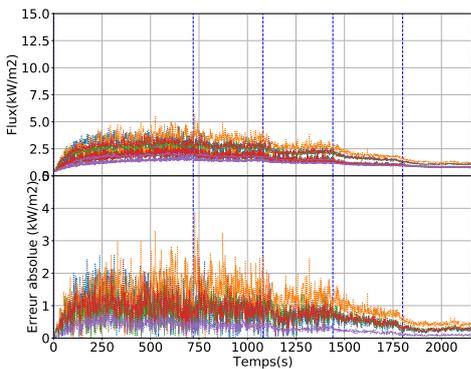
(d) Températures de l'arbre F



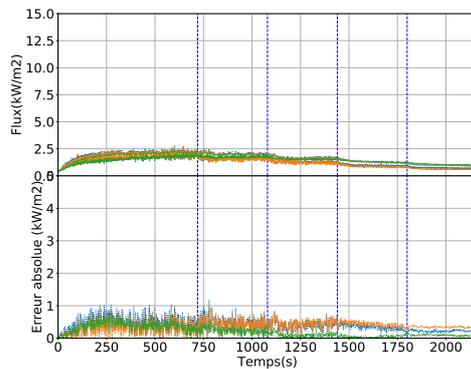
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



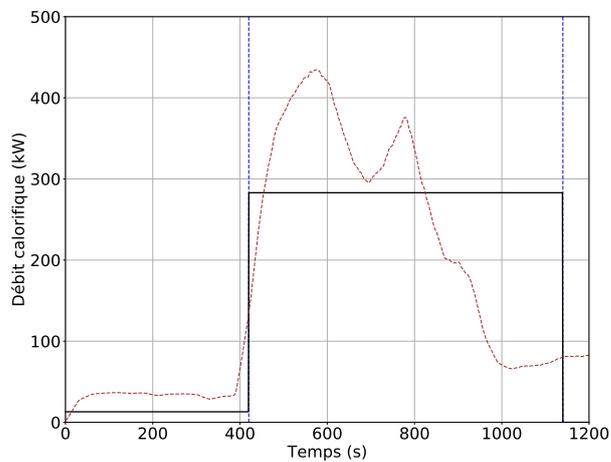
(g) Flux thermiques horizontaux



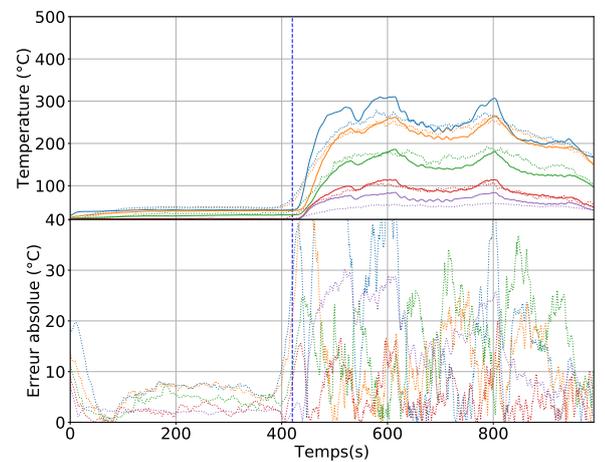
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.6 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 3

Scénario 4

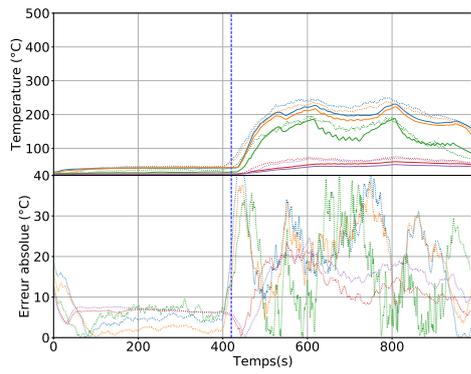


(a) Détermination du débit calorifique

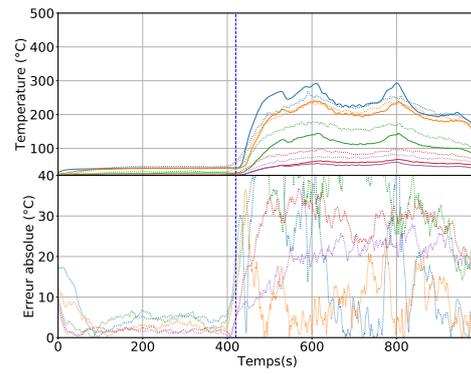


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

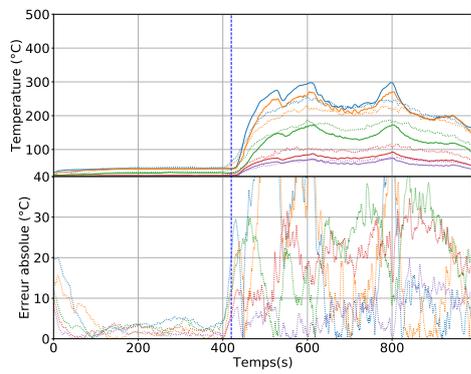
FIGURE E.7 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 4



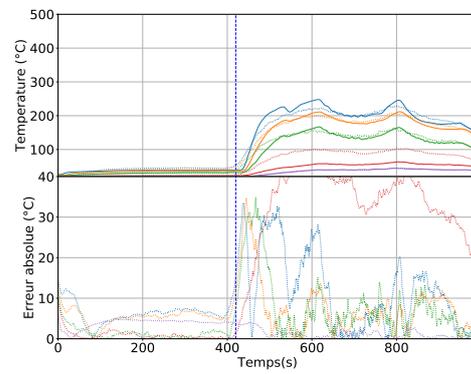
(a) Températures de l'arbre A



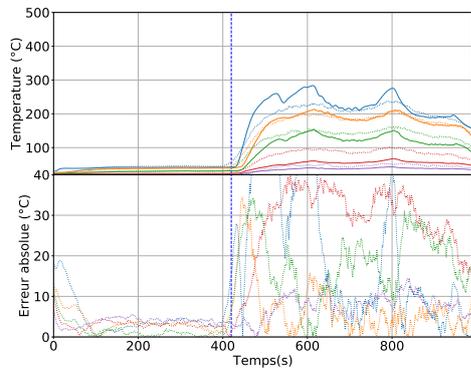
(b) Températures de l'arbre C



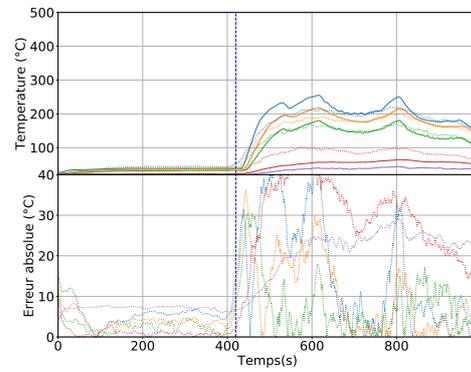
(c) Températures de l'arbre I



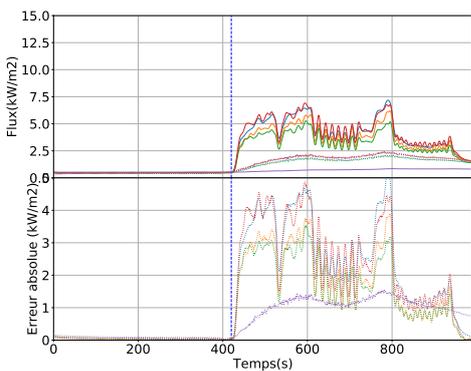
(d) Températures de l'arbre F



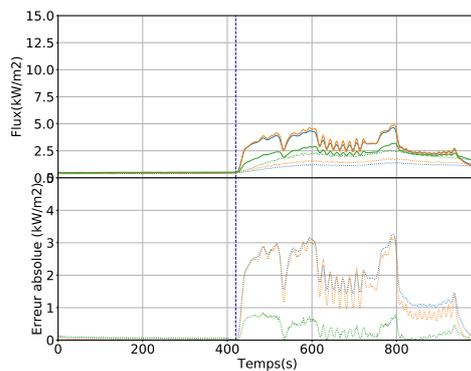
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



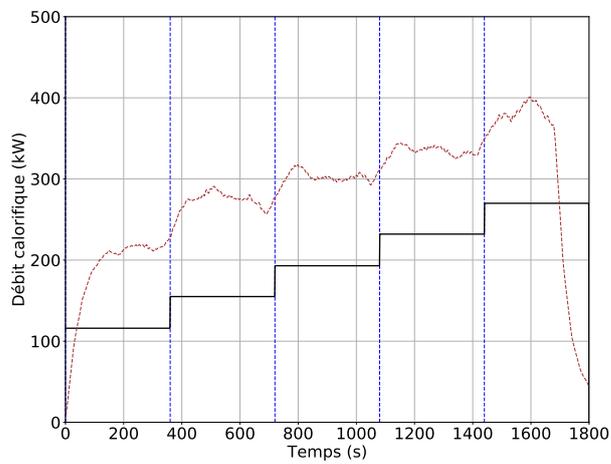
(g) Flux thermiques horizontaux



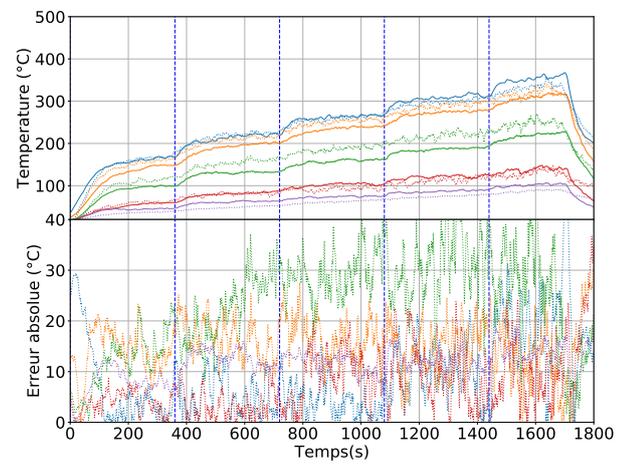
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.8 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 4

Scénario 5

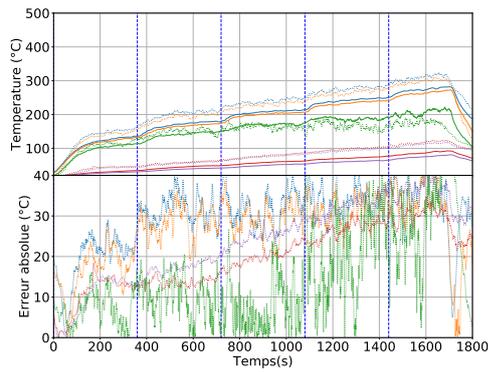


(a) Détermination du débit calorifique

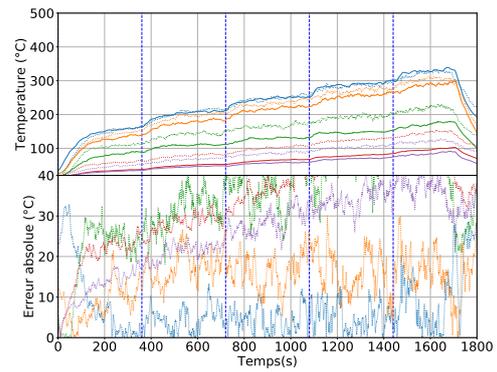


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

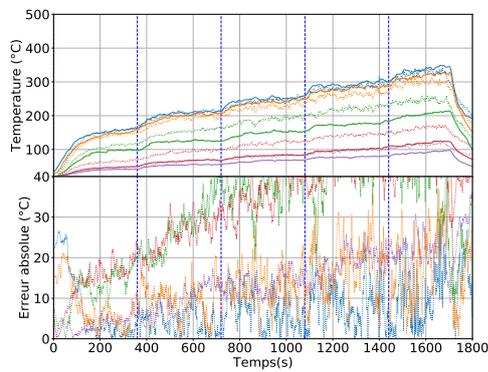
FIGURE E.9 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 5



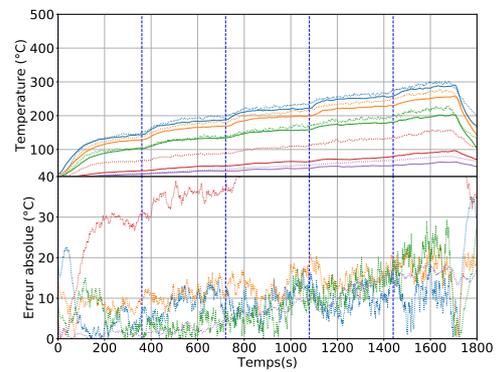
(a) Températures de l'arbre A



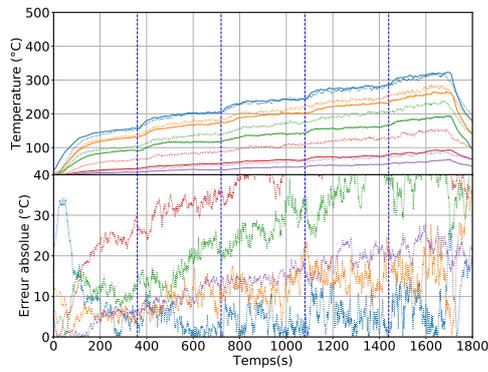
(b) Températures de l'arbre C



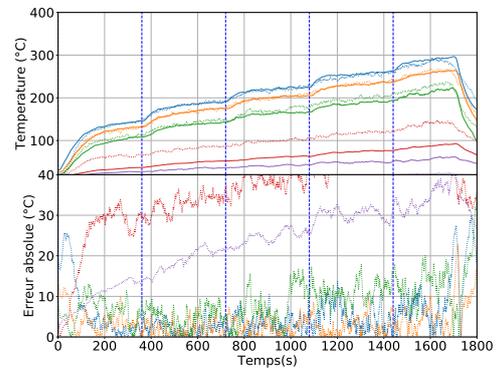
(c) Températures de l'arbre I



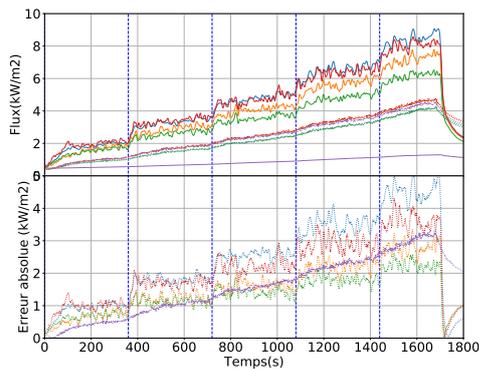
(d) Températures de l'arbre F



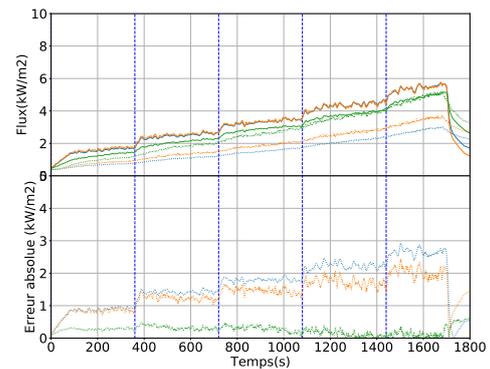
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



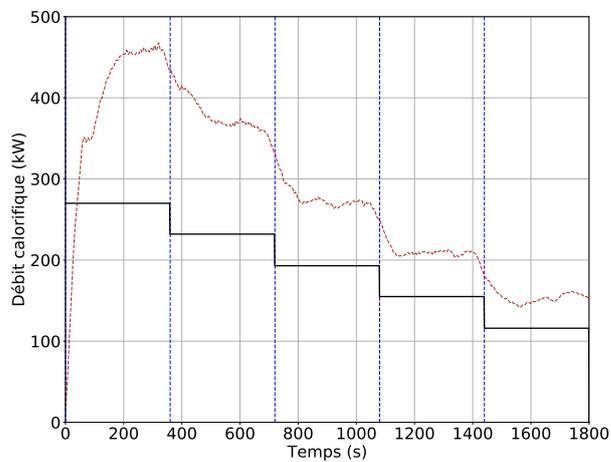
(g) Flux thermiques horizontaux



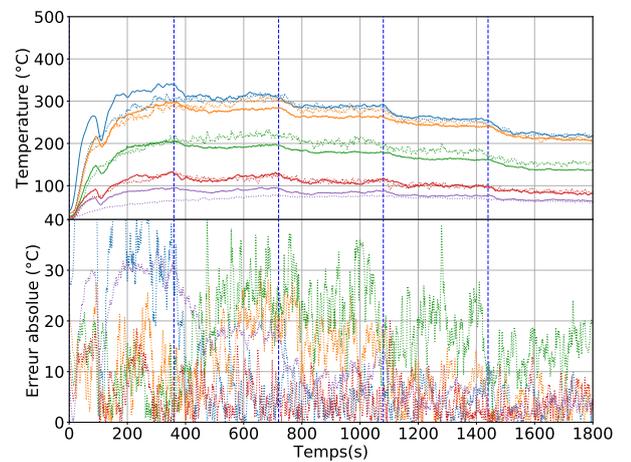
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.10 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 5

Scénario 6

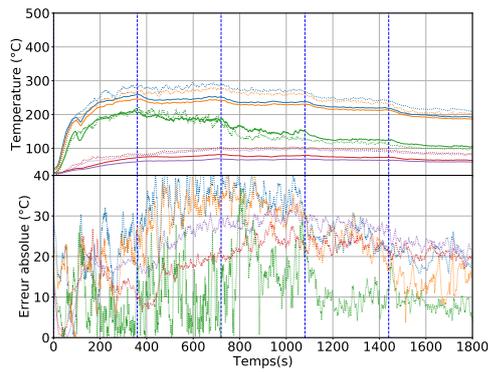


(a) Détermination du débit calorifique

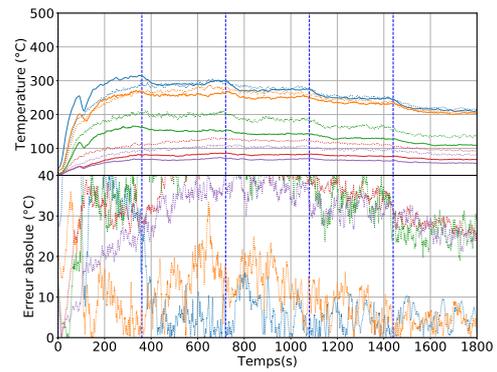


(b) Reconstitution des T de l'arbre D

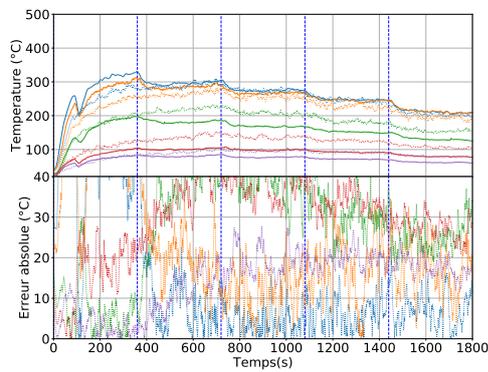
FIGURE E.11 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 6



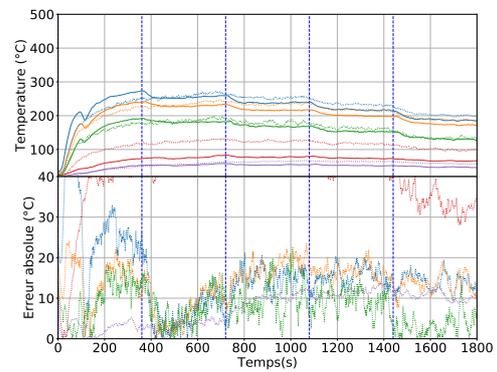
(a) Températures de l'arbre A



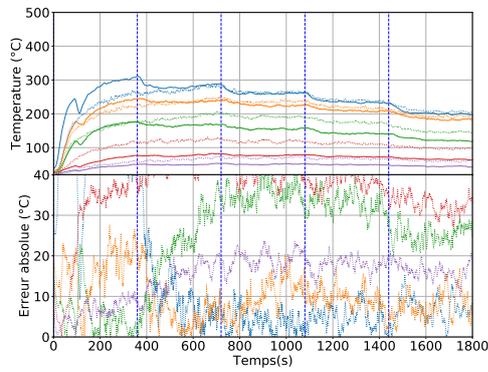
(b) Températures de l'arbre C



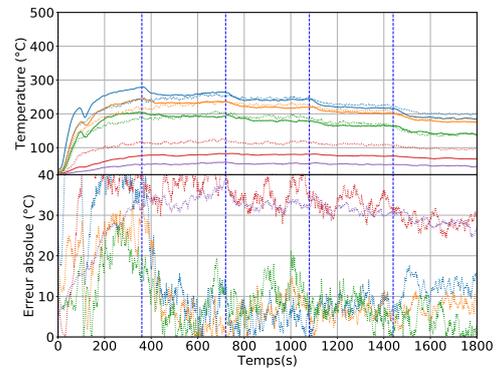
(c) Températures de l'arbre I



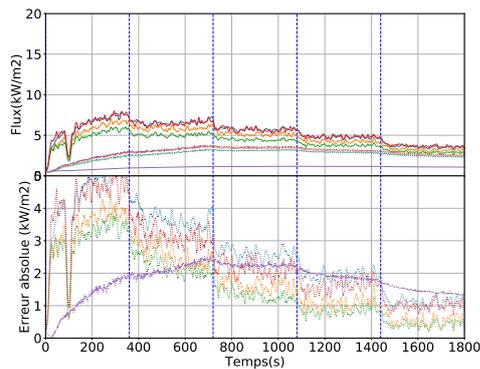
(d) Températures de l'arbre F



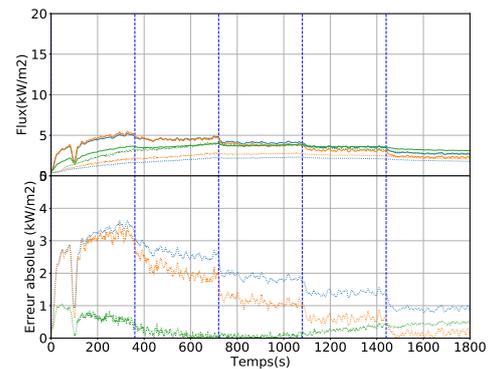
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



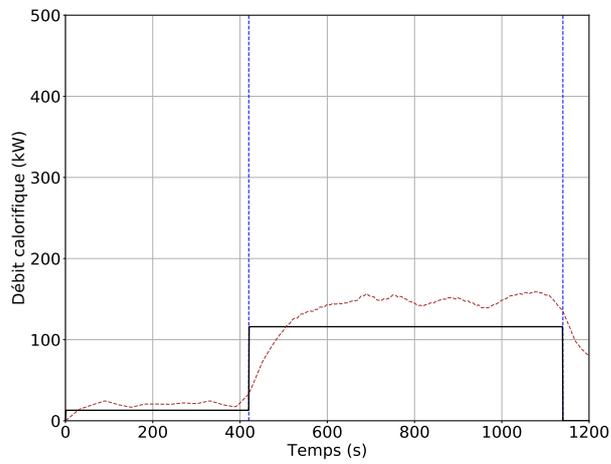
(g) Flux thermiques horizontaux



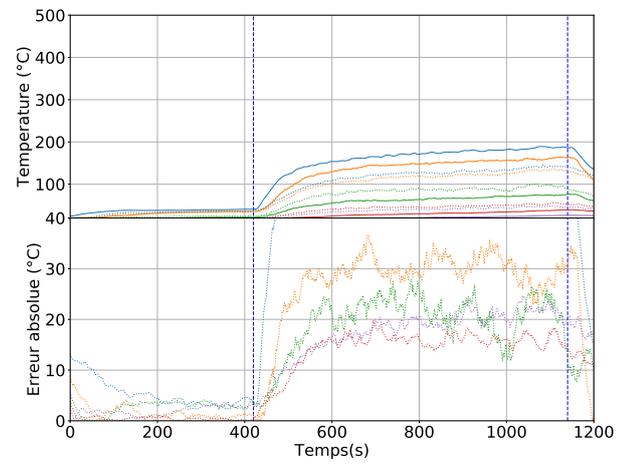
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.12 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 6

Scénario 7

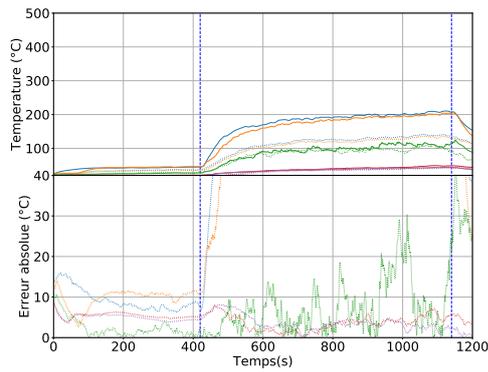


(a) Détermination du débit calorifique

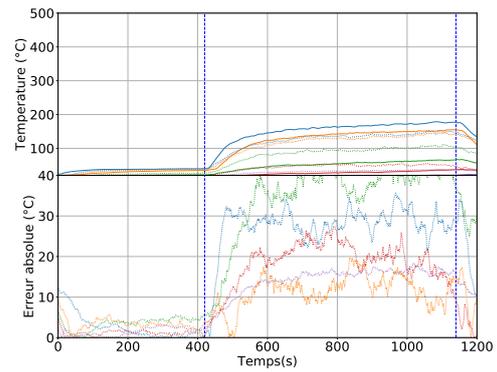


(b) Reconstitution des T de l'arbre G

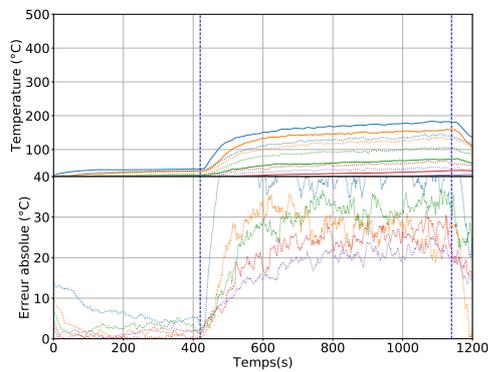
FIGURE E.14 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 7



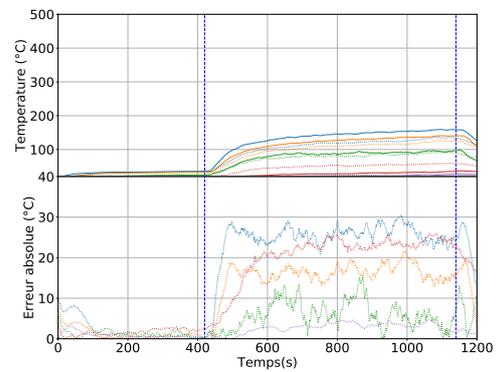
(a) Températures de l'arbre A



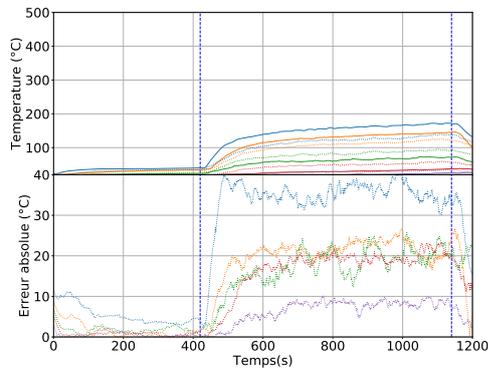
(b) Températures de l'arbre D



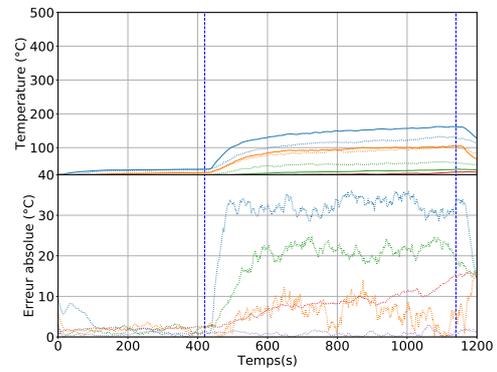
(c) Températures de l'arbre I



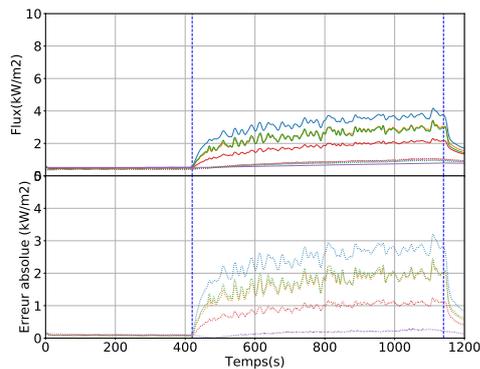
(d) Températures de l'arbre F



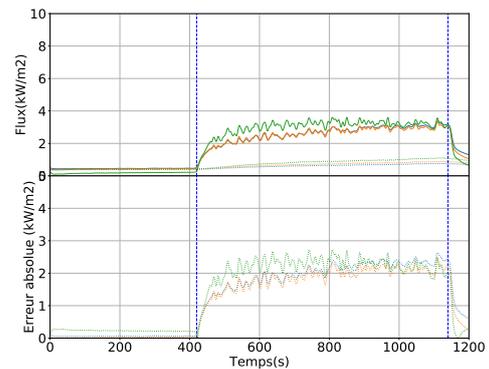
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



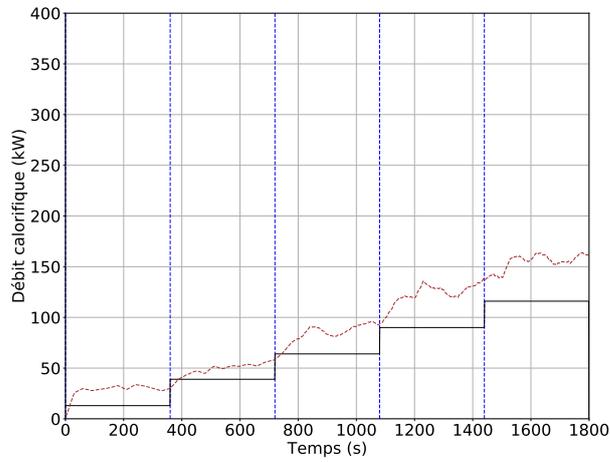
(g) Flux thermiques horizontaux



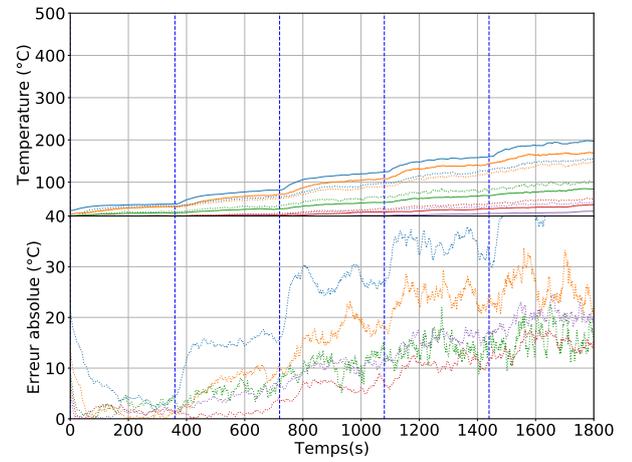
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.13 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 7

**Scénario 8**

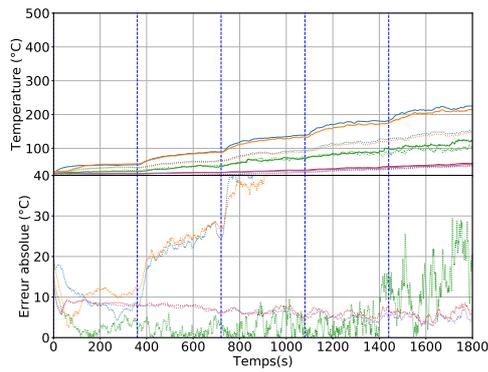


(a) Détermination du débit calorifique

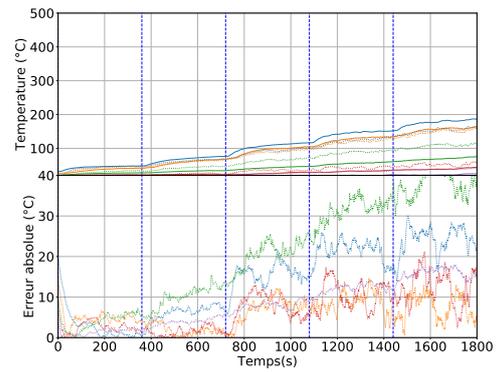


(b) Reconstitution des  $T$  de l'arbre C

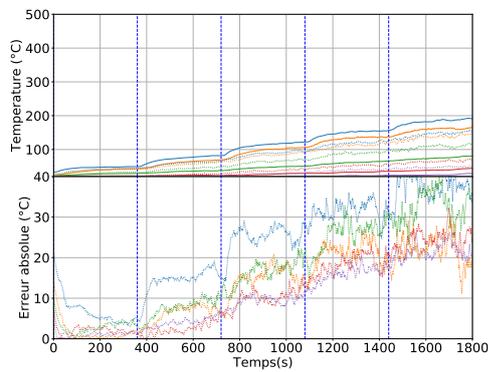
FIGURE E.16 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 8



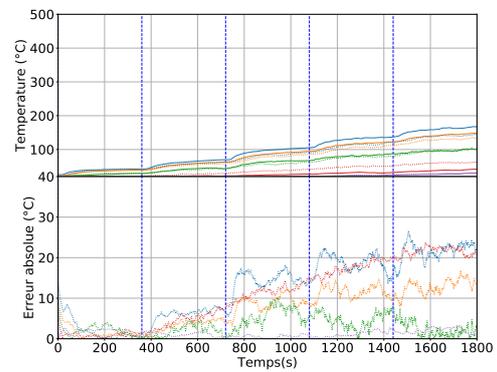
(a) Températures de l'arbre A



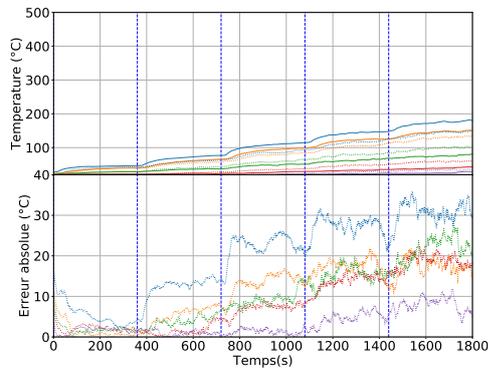
(b) Températures de l'arbre D



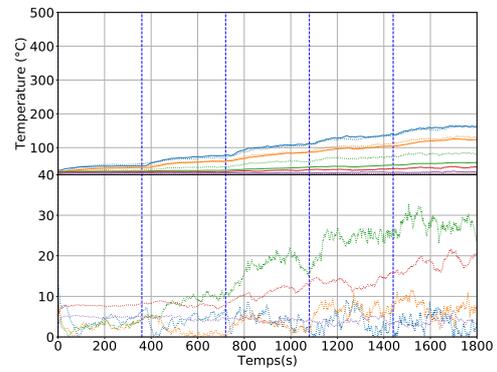
(c) Températures de l'arbre I



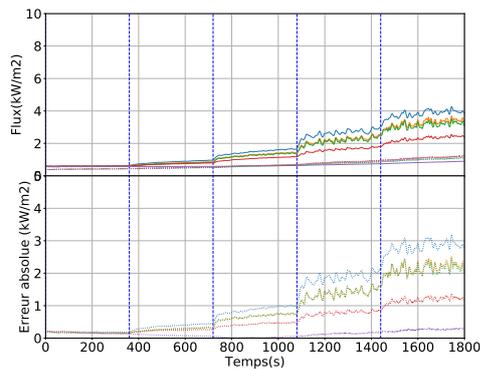
(d) Températures de l'arbre F



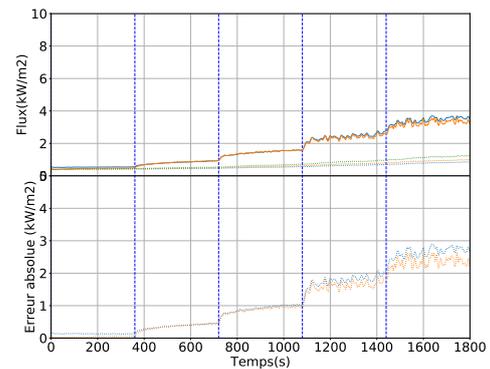
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



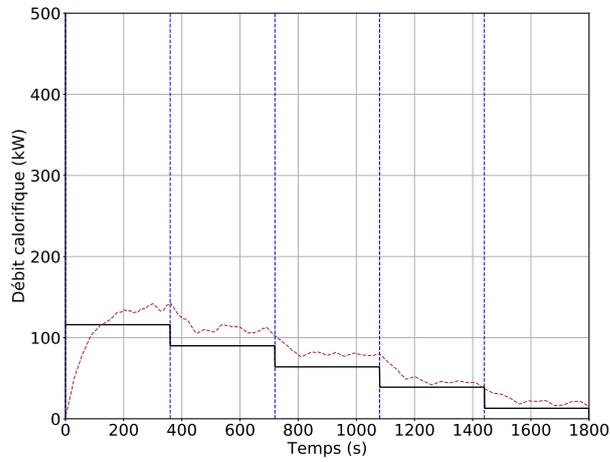
(g) Flux thermiques horizontaux



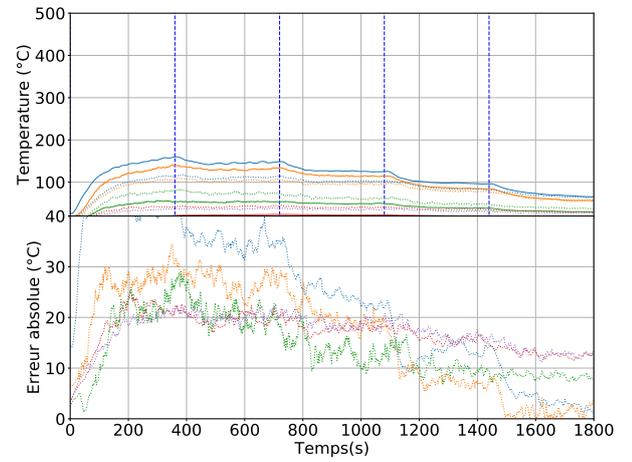
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.15 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 8

Scénario 9

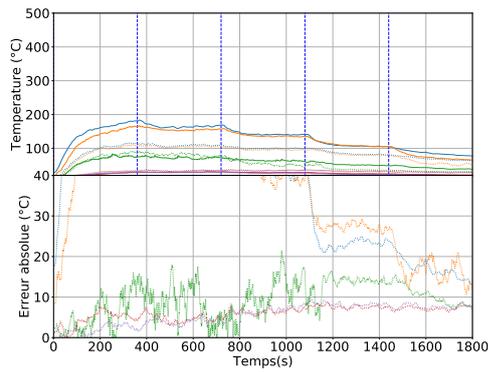


(a) Détermination du débit calorifique

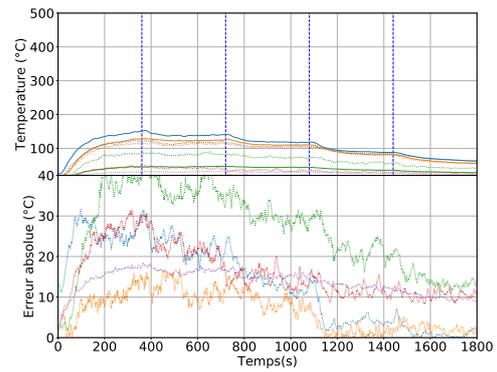


(b) Reconstitution des  $T$  de l'arbre C

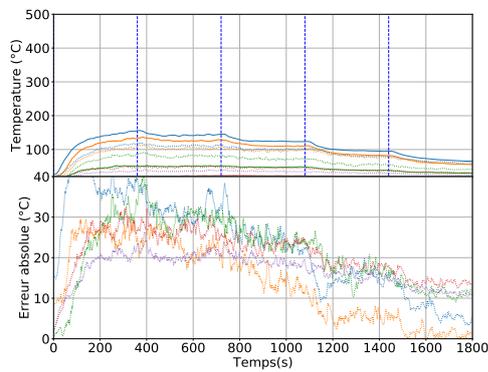
FIGURE E.18 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 9



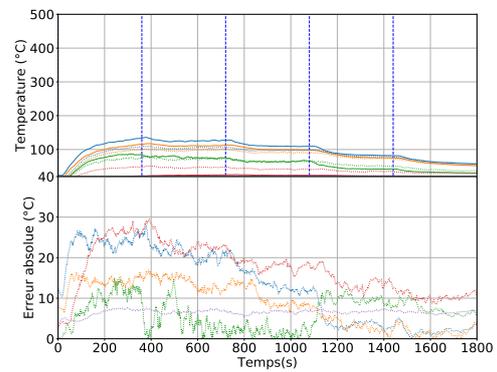
(a) Températures de l'arbre A



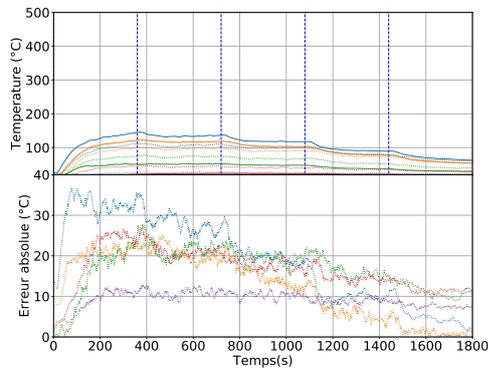
(b) Températures de l'arbre D



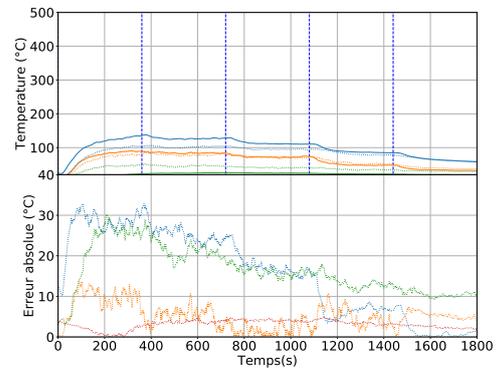
(c) Températures de l'arbre I



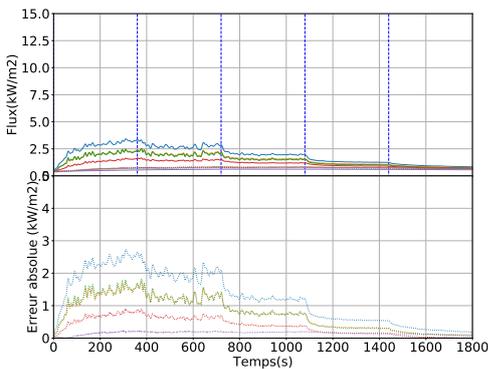
(d) Températures de l'arbre F



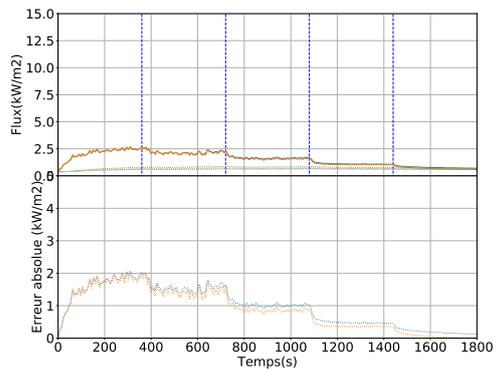
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



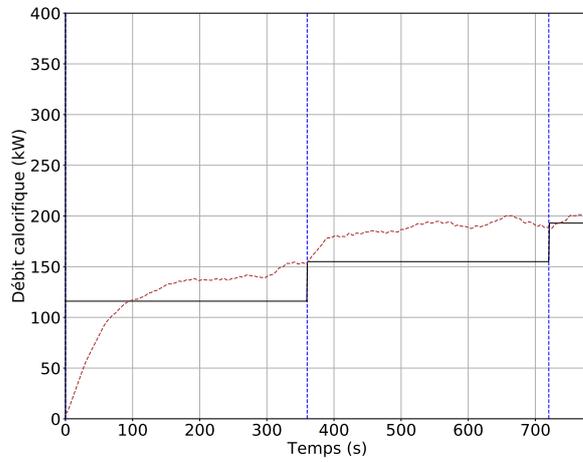
(g) Flux thermiques horizontaux



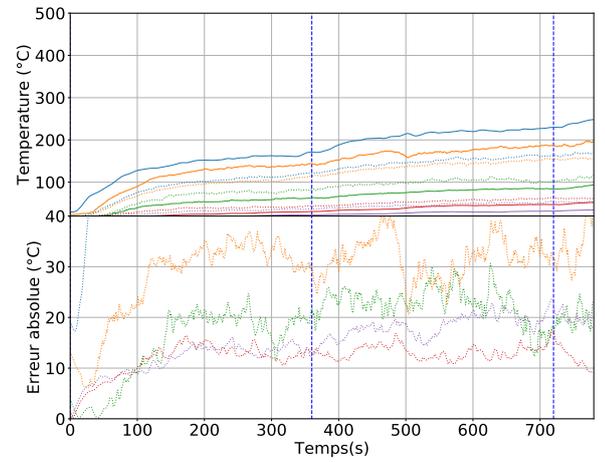
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.17 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 9

Scénario 10

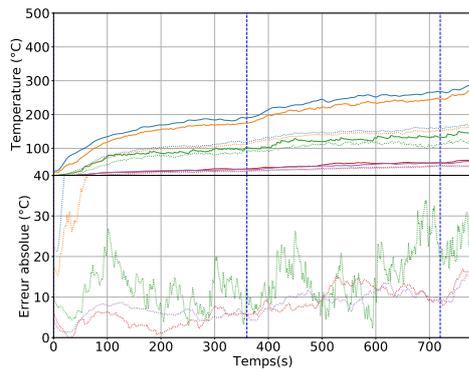


(a) Détermination du débit calorifique

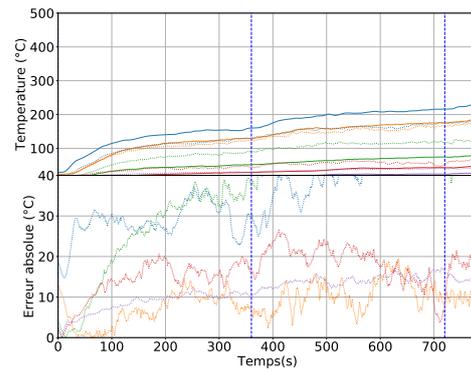


(b) Reconstitution des  $T$  de l'arbre C

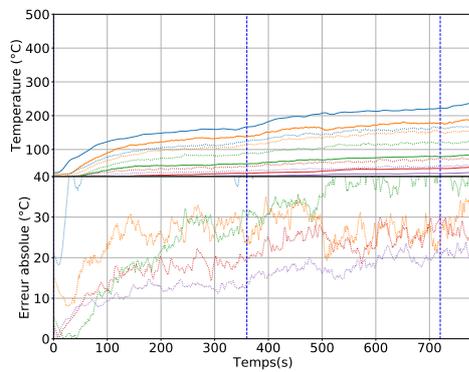
FIGURE E.20 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 10



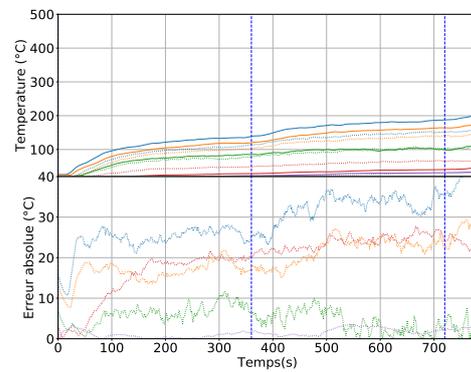
(a) Températures de l'arbre A



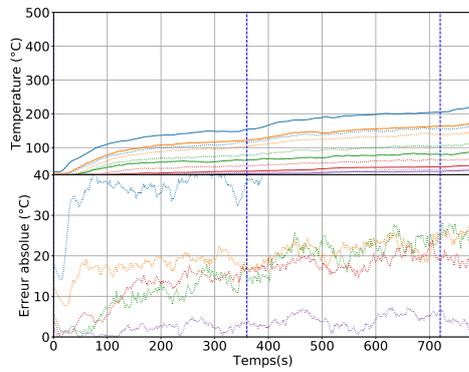
(b) Températures de l'arbre D



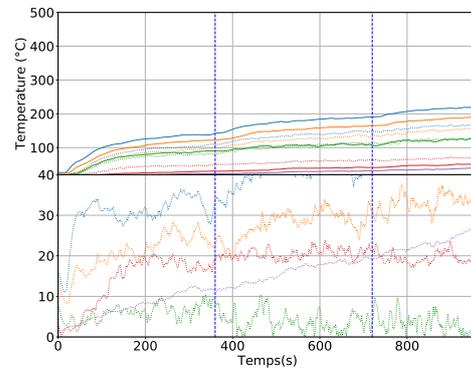
(c) Températures de l'arbre I



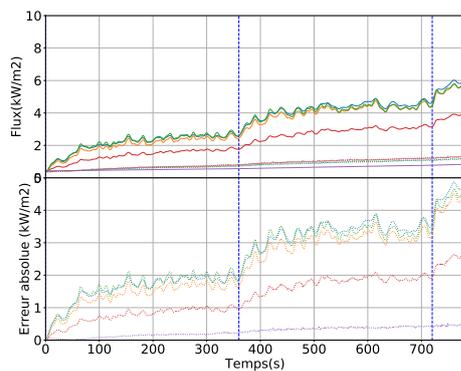
(d) Températures de l'arbre F



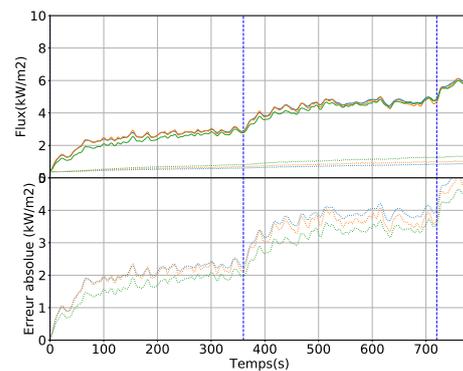
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



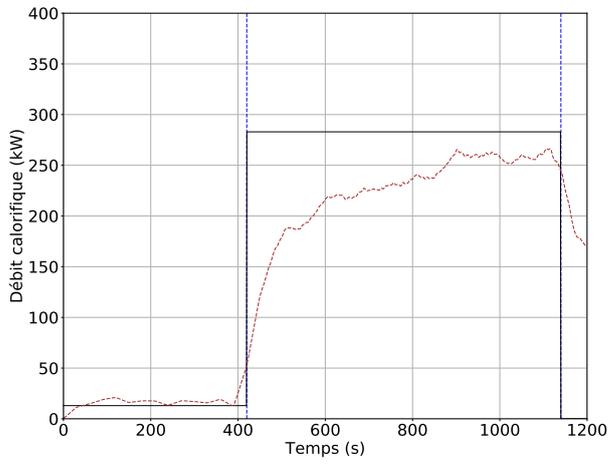
(g) Flux thermiques horizontaux



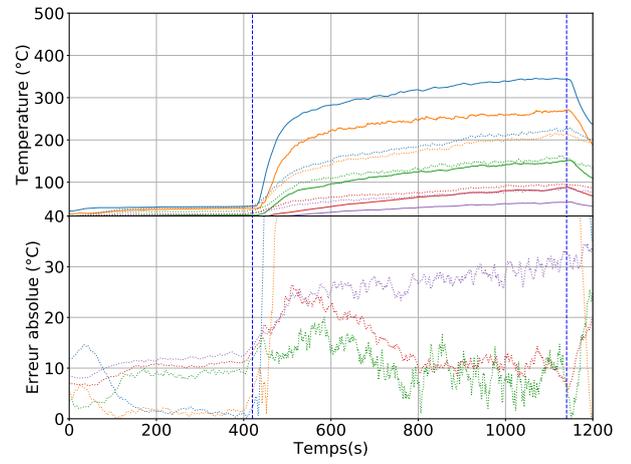
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.19 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 10

**Scénario 11**

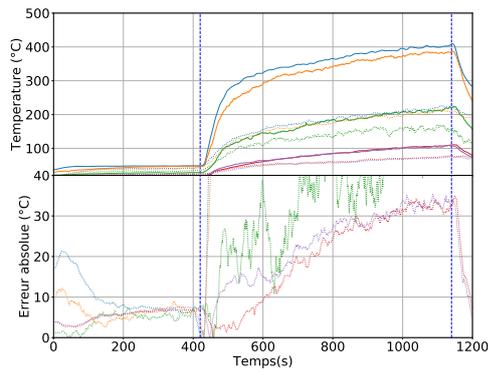


(a) Détermination du débit calorifique

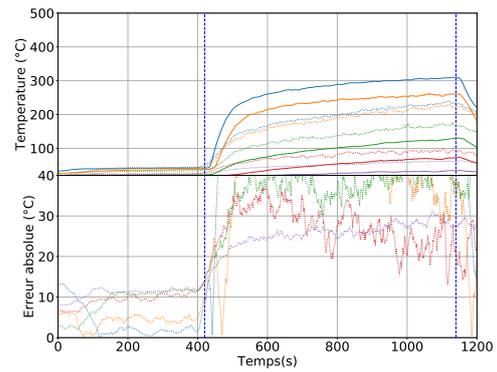


(b) Reconstitution des T de l'arbre C

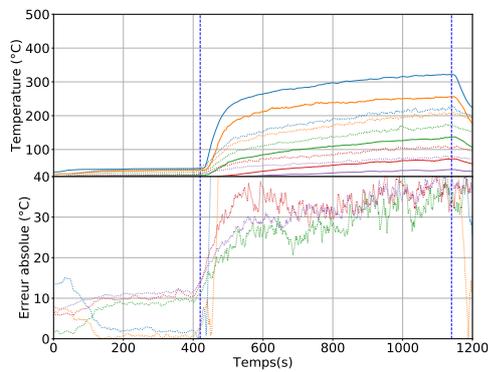
FIGURE E.22 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 11



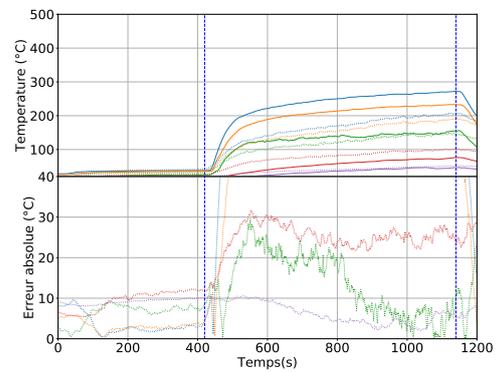
(a) Températures de l'arbre A



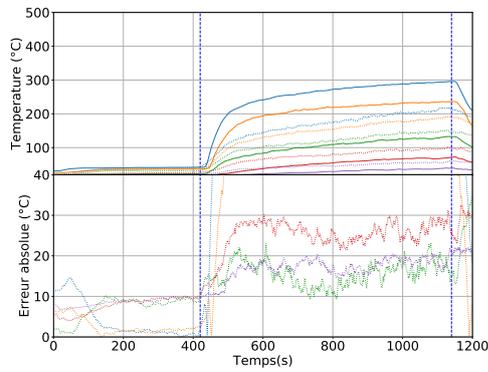
(b) Températures de l'arbre D



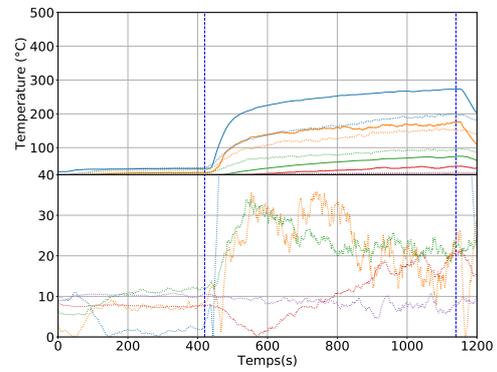
(c) Températures de l'arbre I



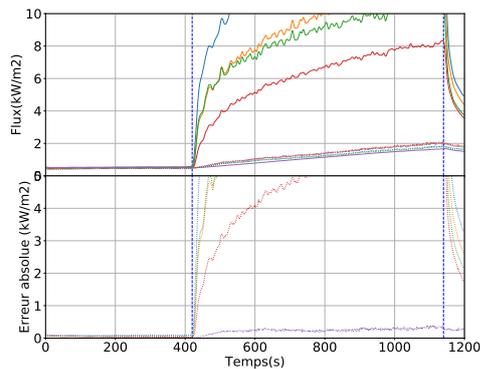
(d) Températures de l'arbre F



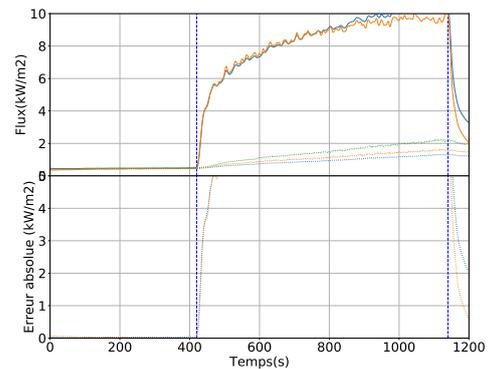
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



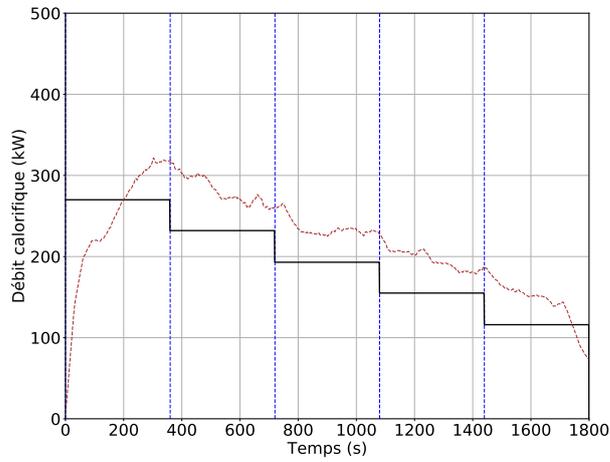
(g) Flux thermiques horizontaux



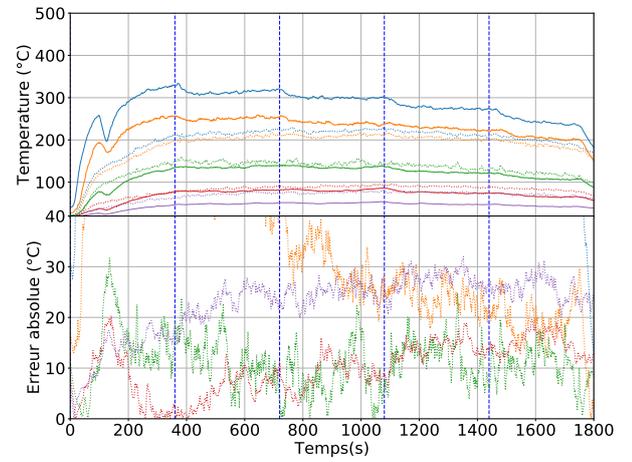
(h) Flux thermiques verticaux

FIGURE E.21 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 11

**Scénario 12**

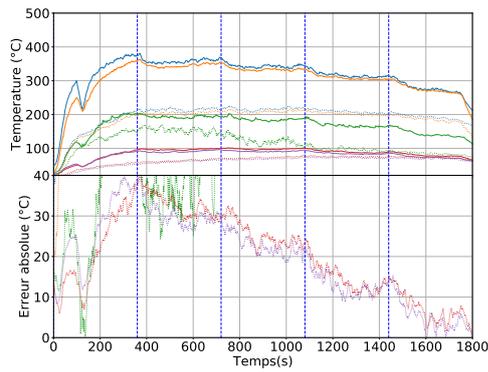


(a) Détermination du débit calorifique

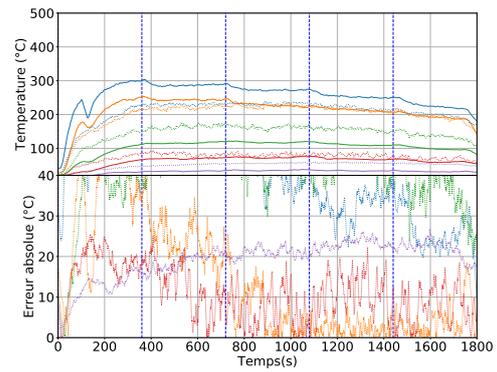


(b) Reconstitution des  $T$  de l'arbre C

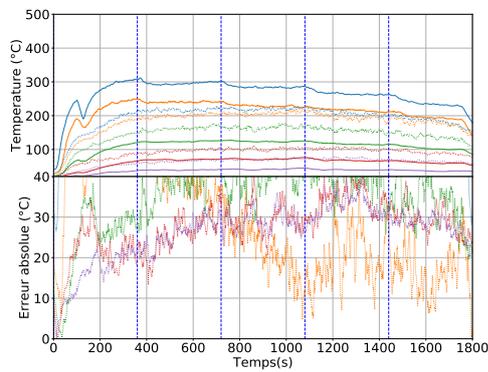
FIGURE E.24 – Détermination du paramètre  $q = [\dot{Q}]$  en fonction des observations  $y = [T]$  du scénario 12



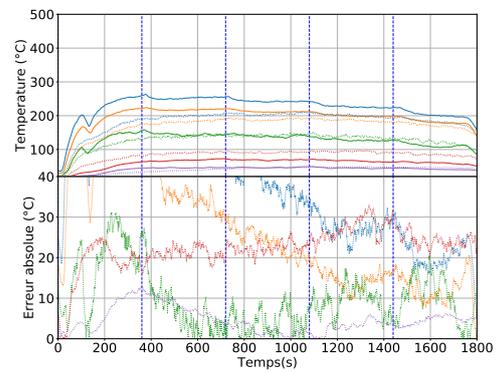
(a) Températures de l'arbre A



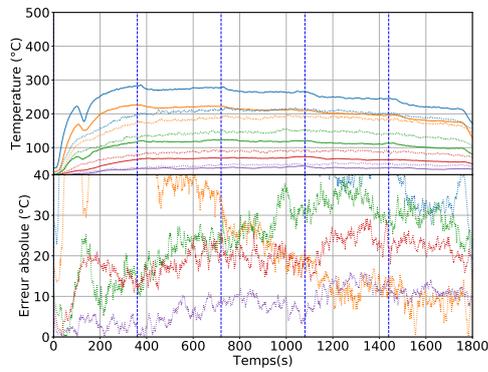
(b) Températures de l'arbre D



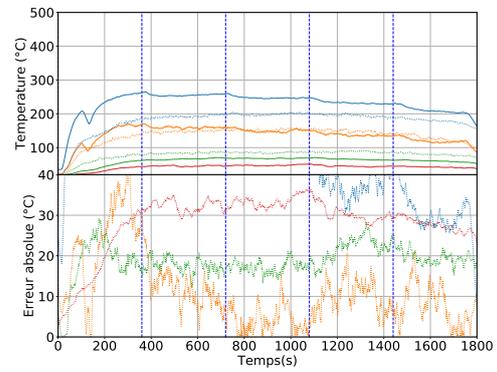
(c) Températures de l'arbre I



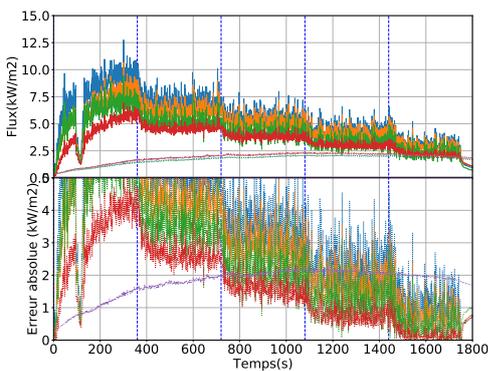
(d) Températures de l'arbre F



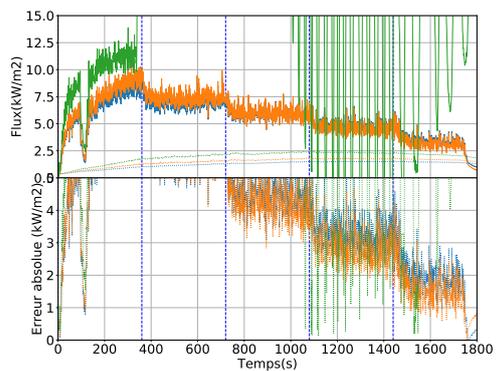
(e) Températures de l'arbre J



(f) Températures de l'arbre G



(g) Flux thermiques horizontaux

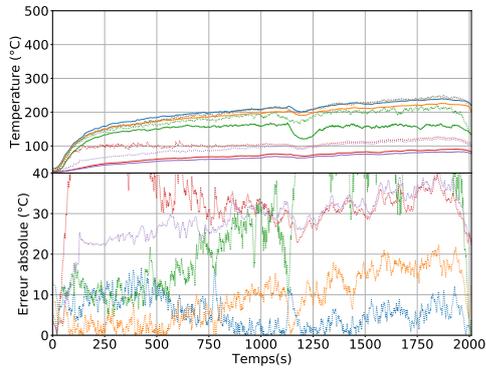


(h) Flux thermiques verticaux

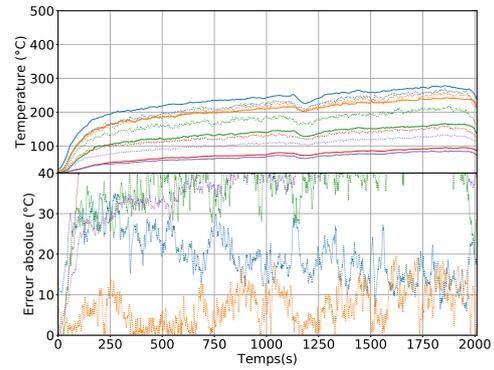
FIGURE E.23 – Évolution de l'ambiance thermique du scénario 12



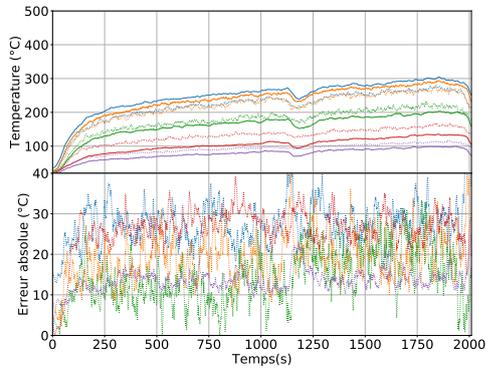
E.1.2 Bac d'hydrocarbure



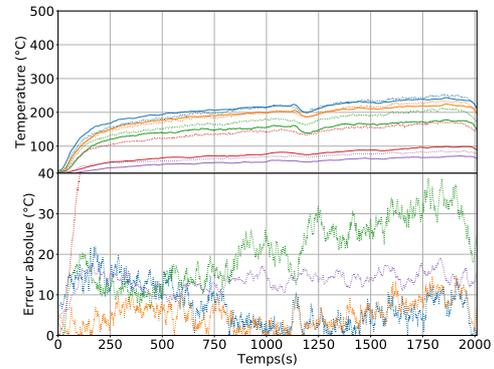
(a) Températures de l'arbre A



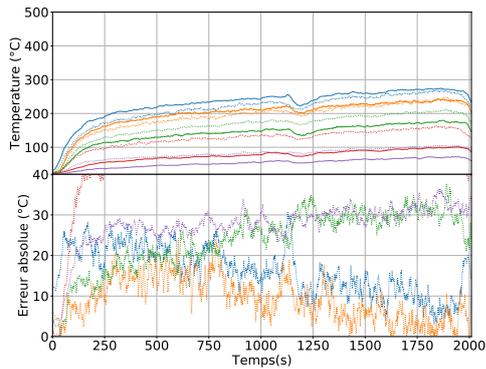
(b) Températures de l'arbre C



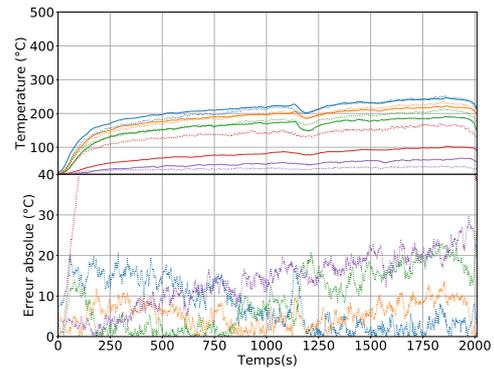
(c) Températures de l'arbre I



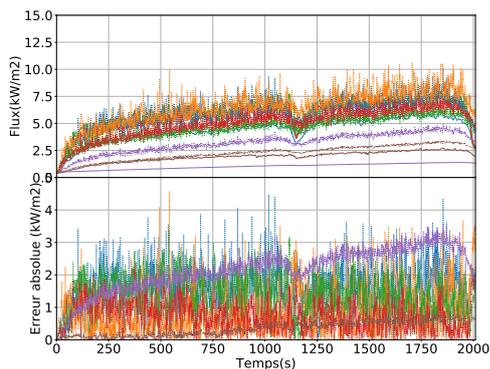
(d) Températures de l'arbre F



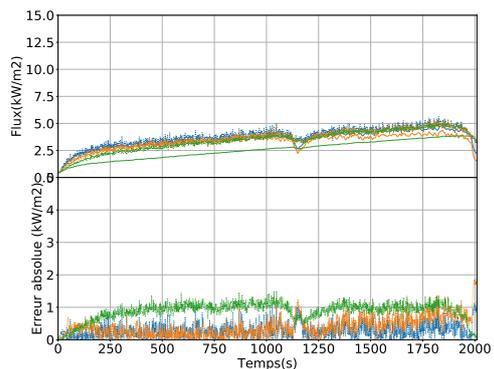
(e) Températures de l'arbre J



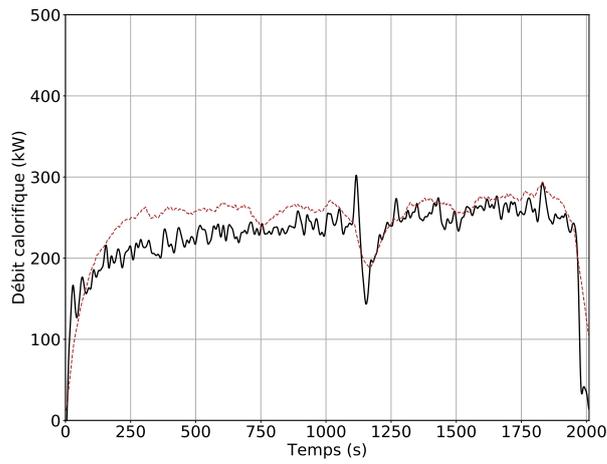
(f) Températures de l'arbre G



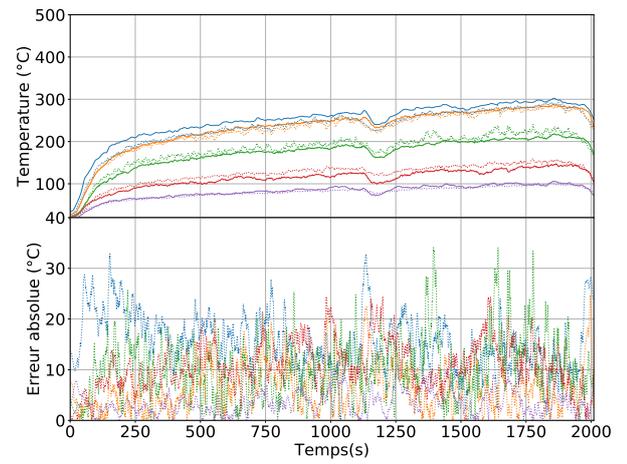
(g) Flux thermiques horizontaux



(h) Flux thermiques verticaux



(a) Détermination du débit calorifique



(b) Reconstitution des T de l'arbre D

FIGURE E.26 – Principaux résultats obtenus pour le scénario « hydrocarbure confiné »

## E.2 Foyers en champ libre

Pour chacun de ces essais, nous représentons uniquement la reconstruction du terme source associée aux mesures de flux utilisés pour le reconstruire.

### E.2.1 Bac d'hydrocarbure

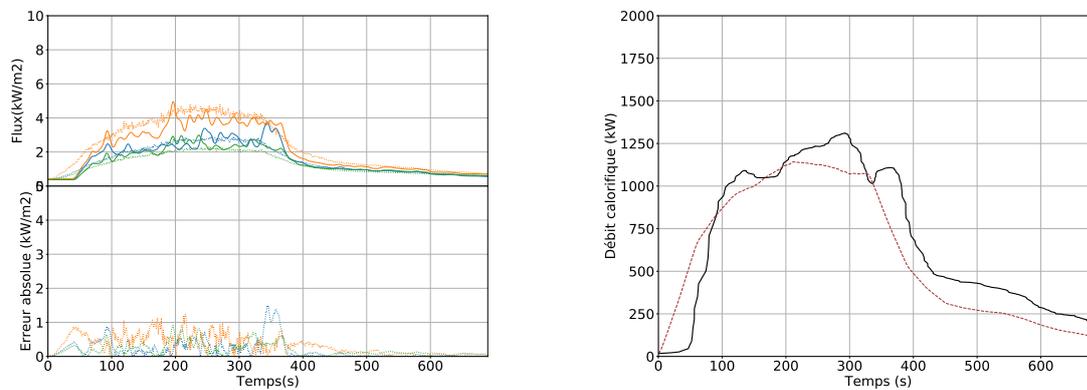


FIGURE E.27 – Principaux résultats obtenus pour le scénario de trois fûts d'hydrocarbure en milieu libre

### E.2.2 Chargement solide

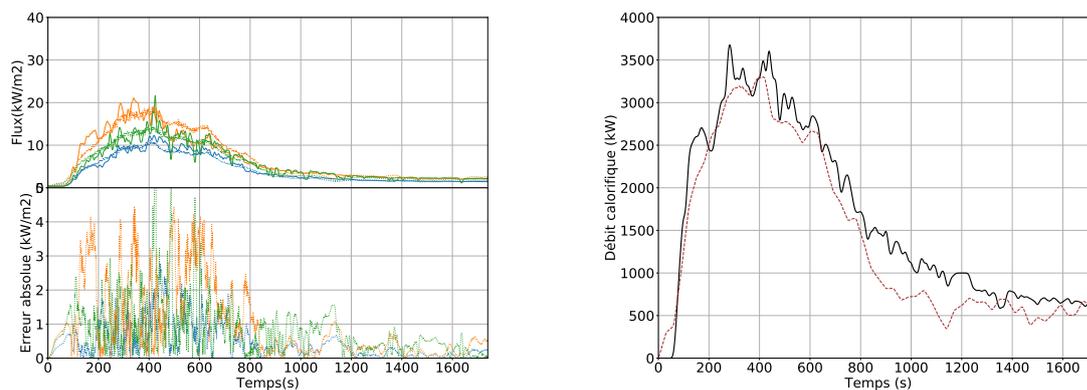


FIGURE E.28 – Principaux résultats obtenus pour le scénario du chargement solide en milieu libre

### E.2.3 Véhicule utilitaire

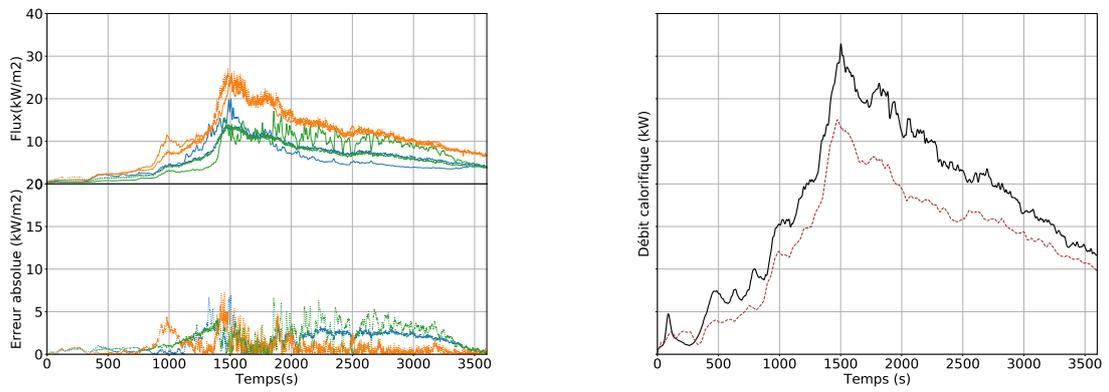


FIGURE E.29 – Principaux résultats obtenus pour le scénario du véhicule en milieu libre



## **Reconstruction de l'évolution temporelle de la puissance thermique dégagée par un foyer d'incendie par une méthode d'optimisation**

**Résumé :** Cette thèse s'inscrit dans le domaine des sciences du feu et trouve ses applications dans l'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI) et de l'expertise post-incendie. Dans ces deux domaines d'application, le recours à la simulation numérique est de plus en plus courant. Pour réaliser ces simulations, la prescription du terme source de l'incendie (i.e. ce qui a brûlé) constitue un élément crucial.

Nous proposons ici une méthode permettant de caractériser un terme source (évolution temporelle du dégagement de chaleur et extension spatiale) à partir de mesures physiques indirectes simples à réaliser, telles que par exemple celles de la température en certains points de l'environnement proche du foyer. Elle fait appel aux algorithmes couramment employés dans les problèmes d'optimisation et s'appuie sur l'utilisation d'un code CFD (Fire Dynamics Simulator). L'idée est d'ajuster à différents instants dans le code de calcul une donnée d'entrée, en l'occurrence la puissance du foyer, afin de minimiser l'écart, à un instant ultérieur, entre les grandeurs simulées et les mêmes grandeurs mesurées expérimentalement.

Pour valider notre approche, des expériences ont été réalisées à l'échelle réelle, impliquant des foyers étalons (i.e. dont l'évolution temporelle de la puissance est imposée). La méthode a ensuite été employée pour caractériser des foyers de complexité croissante : feu de bacs d'hydrocarbure en milieu ouvert, feu de palettes de bois, et feu de voiture.

Au-delà de l'objectif initial visant à reconstruire numériquement l'évolution temporelle d'un terme source dans son environnement réel, cette méthode se présente également comme une alternative intéressante aux techniques expérimentales, telles que la hotte calorimétrique, habituellement utilisées pour caractériser la puissance émise par un foyer.

**Mots clés :** Incendie, Terme source, Méthode d'optimisation, CFD, Expérimentations

## **Reconstruction of temporal evolution of the heat release rate by an optimization method**

**Abstract :** This thesis falls in the field of fire sciences and finds its applications in fire safety engineering and in fire investigation. In these two fields of application, using numerical simulation is more and more a common task. To carry out these simulations, the prescription of the source term of the fire (i.e. what burned) is a crucial element. Here, we propose a method which allows a source term (temporal evolution of the heat release rate and spatial extension) to be characterized from indirect physical measurements that are simple to perform, such as for example temperature measurements at given points in the nearby vicinity of the fire.

This method involves algorithms commonly used in optimization problems and is based on the use of a CFD code (Fire Dynamics Simulator). The idea is to adjust at different times in the simulation an input data, in this case the heat release rate of the fire, in order to minimize the difference, at a later time, between the simulated quantities and the same quantities measured experimentally.

In order to validate our approach, real scale experiments were carried out, involving a gas burner (whose heat release rate evolution over time is imposed). The method was then used to characterize fire of increasing complexity : pool fire, wood pallets fire, and vehicle fire.

Beyond the initial objective of numerically reconstructing the temporal evolution of a fire source in its real environment, this method turns out to be also an interesting alternative to experimental techniques, such as the real-scale calorimeter, usually used to characterize the heat release rate emitted by a fire.

**Keywords :** Fire, Source term, Optimization method, CFD, Experiments