



**HAL**  
open science

# Modélisation de la propagation du feu de la litière à la branche chez les espèces ornementales utilisées dans les interfaces habitat-forêt

L. Terrei

► **To cite this version:**

L. Terrei. Modélisation de la propagation du feu de la litière à la branche chez les espèces ornementales utilisées dans les interfaces habitat-forêt. Sciences de l'environnement. 2017. hal-02608628

**HAL Id: hal-02608628**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02608628v1>**

Submitted on 16 May 2020

**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.



Rapport de stage de Master 2 Ingénierie et Sécurité Incendie

**Modélisation de la propagation du feu de la litière à la  
branche chez les espèces ornementales utilisées dans les  
interfaces habitat-forêt**

Lucas Terrei

Année 2016 - 2017

Tuteurs : Anne Ganteaume (IRSTEA), Aymeric Lamorlette (M2P2 Aix-Marseille Université)



# Table des matières

<b>I</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Présentation de la structure d'accueil</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contexte et objectifs</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>Matériel et Méthodes</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>3</b>
1.1	Litière de <i>Abies excelsior</i> . . . . .	3
1.2	Prélèvements de la branche . . . . .	3
1.3	Séchage . . . . .	4
1.4	Calibrage de la branche . . . . .	4
1.5	Brûlage . . . . .	5
1.5.1	Dispositif de base . . . . .	5
1.5.2	Dispositif modifié . . . . .	5
1.5.3	Dispositif final . . . . .	6
1.6	Déroulement du brûlage . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Exploitation de la caméra thermique</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Modélisation</b>	<b>10</b>
3.1	Présentation du logiciel . . . . .	10
3.2	Construction du domaine d'étude . . . . .	10
3.3	Modélisation de la branche . . . . .	11
3.3.1	Première approche . . . . .	11
3.3.2	Position des capteurs de température . . . . .	11
3.3.3	Modélisation finale . . . . .	12
<b>III</b>	<b>Résultats</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>Expériences préliminaires</b>	<b>14</b>
1.1	Comparaison entre thermocouple Ahlborn et thermocouple Omega par l'expérience dite "du briquet" . . . . .	14
1.2	Comparaison entre thermocouple Ahlborn et thermocouple Omega par le brûlage de la litière . . . . .	14
1.3	Variabilité des mesures de perte de masse ainsi que des températures lors des brûlages de litière . . . . .	15
1.4	Confrontation entre expérience et modélisation pour le brûlage de la litière . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Modélisation de la propagation du feu de la litière à la branche</b>	<b>17</b>
2.1	Détermination du seuil maximal de contenu hydrique de la branche . . . . .	17
2.2	Modélisation du cyprès . . . . .	18
2.3	Modélisation du fusain . . . . .	19
2.4	Modélisation du cotonéaster . . . . .	21
2.5	Modélisation du laurier rose . . . . .	23
<b>IV</b>	<b>Discussion</b>	<b>24</b>
<b>V</b>	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>
<b>VI</b>	<b>Annexes</b>	<b>28</b>

## Table des figures

1	Représentation d'un volume élémentaire représentatif d'une branche (ici le cotonéaster). . . . .	2
2	Photos des quatre espèces brûlées avec le cyprès vert (a.), le laurier rose (b.), le fusain du japon (c.), et le cotonéaster (d.). . . . .	4
3	Photo du dispositif expérimental initial. . . . .	5
4	Dispositif expérimental modifié en début de stage. . . . .	6
5	Dispositif final. . . . .	7
6	Photos représentant le brûlage du cyprès. . . . .	8
7	Détermination de la zone d'ignition avec le début d'expérience (a.), image thermique au temps d'ignition relevé à l'aide de la caméra visible (b.) et l'image 2 secondes avant le temps d'ignition (c.). . . . .	9
8	Détermination de la zone d'ignition avec la diminution de la palette de couleur afin de connaître l'endroit le plus chaud de la branche (a.) et mise en évidence en blanc (b.). . . . .	9
9	Étude de la convergence du maillage. . . . .	11
10	Modélisation du brûlage de la branche de cyprès vert. . . . .	12
11	Modélisation du brûlage de la branche de fusain du japon. . . . .	12
12	Modélisation du brûlage de la branche de cotonéaster. . . . .	13
13	Modélisation du brûlage de la branche de laurier rose. . . . .	13
14	Étude de l'efficacité des thermocouples et comparaison avec FDS pour l'expérience du briquet. . . . .	14
15	Comparaison de l'évolution de la température entre les thermocouples Ahlborn et Omega placés par paire à différentes positions lors du brûlage de la litière. Les paires de thermocouples sont placées à des hauteurs de 2, 5, 3 et 15cm respectivement. . . . .	15
16	Comparaison des températures entre les thermocouples Omega placés à deux hauteurs lors du brûlage de la litière (2, 5 et 15cm). . . . .	16
17	Comparaison entre WFDS et expériences de la perte de masse de la litière. . . . .	16
18	Comparaison entre l'évolution des températures moyennes issues de l'expérience et de l'évolution des températures issues de WFDS pour des capteurs placés à la même hauteur que dans l'expérience. . . . .	17
19	Mise en évidence de la modélisation de la perte de masse de la branche du fusain lors du brûlage en fonction du contenu hydrique. . . . .	17
20	Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du cyprès entre WFDS et l'expérience (moyennée sur huit essais). . . . .	18
21	Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de cyprès. . . . .	18
22	Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de cyprès. . . . .	19
23	Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du fusain entre WFDS et l'expérience (moyennée sur huit essais). . . . .	19
24	Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de fusain. . . . .	20
25	Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de fusain. . . . .	21
26	Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du cotonéaster entre WFDS et l'expérience (moyennée sur 7 essais). . . . .	21
27	Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de cotonéaster. . . . .	22
28	Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de cotonéaster. . . . .	22
29	Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage de la branche de laurier rose entre WFDS et l'expérience (moyennée sur 3 essais). . . . .	23
30	Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de laurier. . . . .	23

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Dominique Morvan, de l'université d'Aix-Marseille, qui m'a permis de postuler dans le laboratoire IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) ainsi que Marielle Jappiot, chercheuse et responsable d'équipe, pour son accueil dans l'équipe EMR (Écosystèmes Méditerranéens et Risques).

Madame Anne GANTEAUME, chercheuse au sein de IRSTEA et Monsieur Aymeric LAMORLETTE, Maître de conférence à l'université d'Aix-Marseille, m'ont fait bénéficier de leurs larges compétences scientifiques. Ainsi, je leur exprime toute ma gratitude pour leur soutien, leur attention ainsi que leurs conseils précieux tout au long de mon stage.

Je tiens également à exprimer ma sympathie à tous les autres membres du laboratoire, scientifiques, techniques, stagiaires qui, soit par leur aide, soit par leurs encouragements, ou tout simplement leur amitié, ont rendu mon travail plus facile et plus agréable.

# Première partie

## Introduction

### 1 Présentation de la structure d'accueil

L'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) est un établissement public à caractère scientifique et technologique placé sous la tutelle du ministère de la Recherche et de l'Agriculture. Les recherches menées au sein d'IRSTEA se focalisent sur la qualité de l'environnement, la gestion durable des ressources naturelles et des territoires, les risques naturels et environnementaux. Dans le but de répondre à certaines problématiques, IRSTEA est constitué de neuf sites répartis dans toute la France. Chaque centre de recherche possède ses propres domaines de recherche et développe de nombreux partenariats avec les organismes de recherche, universitaire, mais aussi avec des entreprises.

Le centre d'Aix-en-Provence se concentre sur des thèmes de recherche qui concernent fortement la région comme les écosystèmes méditerranéens, les ouvrages hydrauliques, ou encore le risque incendie. Ces trois grands axes de recherche sont regroupés dans une seule et même unité de recherche Risques, Écosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience (RECOVER). Le stage se déroule dans l'unité EMR (Écosystèmes Méditerranéens et Risques). Ce groupe de recherche, sous la responsabilité de Marielle Jappiot, est constitué de 16 membres permanents, et travaille principalement au développement d'outils d'aide à la décision pour l'aménagement durable du territoire méditerranéen. « La prise en compte de la dynamique écologique des milieux forestiers, du risque d'incendie en lien avec la dynamique spatiale des territoires et du changement climatique constituent la base du développement de ces travaux ».

### 2 Contexte et objectifs

Le département des Bouches-du-Rhône est particulièrement touché par le problème des incendies. On y dénombre en moyenne 182 incendies par an entre 2012 et 2016, avec 378 feux et 4533 hectares de surface incendiée en 2016. Dans ce département, 47% des départs de feu ont lieu dans les interfaces habitat-forêt dont la surface ne représente que 15% de la surface totale du département [1]. Cette interface désigne « l'espace inscrit dans un environnement de 100 mètres autour des bâtis résidentiels situés à moins de 200 mètres d'une forêt, garrigue ou maquis. » [Article L322.3 du Code forestier].

La croissance de l'urbanisme dans ces milieux, ainsi que la forte proportion de départs de feux sont autant de facteurs qui nécessitent l'étude de l'inflammabilité des végétaux présents autour des habitations, et notamment dans les haies ornementales délimitant chaque propriété. En effet, la végétation ornementale a une forte influence sur la propagation du feu de la forêt vers les habitations, notamment dans des zones soumises à un important risque d'incendie, comme en région méditerranéenne.

La propagation des flammes dans les strates de végétation combustible est un processus critique du développement du feu. Bien que l'ignition au niveau de la particule ait été bien étudiée, le processus d'ignition de la plante est moins bien connu, et il est souvent supposé, à tort, que l'ignition d'une feuille correspond à l'ignition de la plante entière.

De précédents travaux de l'équipe ont évalué l'inflammabilité de plusieurs espèces ornementales en prenant en compte aussi bien le combustible mort de surface (litière), que les feuilles fraîches, mais également la propagation du feu de la litière à la première branche [2][3][4]. Ces travaux ont

permis la publication d'un guide qui met en avant la dangerosité des espèces ornementales selon leur inflammabilité et leur combustibilité. Ce guide permet également aux habitants de connaître la distance entre l'espace naturel et la végétation ornementale qu'il est conseillé de retirer afin d'éviter un incendie qui peut détruire à la fois des biens, ainsi qu'un milieu naturel et un écosystème complet [5].

Le travail présenté n'a pas d'intérêt préventif en première intention, mais il est la suite logique des travaux réalisés en laboratoire sur la propagation du feu de la litière à la branche. Il consiste à vérifier s'il est possible de modéliser les expériences de propagation du feu de la litière à la branche avec WFDS (Wildland-Urban Interface Fire Dynamic Simulator) pour déterminer entre autres, les caractéristiques thermiques de la branche, la perte de masse (de la litière et de la branche) chez différentes espèces ornementales utilisées dans les interfaces habitat-forêt du sud-est de la France. WFDS est une extension de FDS (Fire Dynamic Simulator) utilisé majoritairement dans l'ingénierie de la sécurité incendie. L'utilisation de WFDS est courante, mais pas au niveau de l'échelle du laboratoire, c'est à dire à l'échelle d'une branche. En effet, le peu d'études réalisées à cette échelle sont des brûlages contrôlés à l'aide de brûleurs ou de panneaux radiants, et non avec une flamme issue d'une litière non contrôlée. Il est donc intéressant de connaître les résultats issus de ce type de modélisation. Cependant, le logiciel de modélisation comporte des contraintes :

- Les expériences de W.Mell du NIST basées sur les feux de pins (Douglas) ont permis de constater que les données de sortie issues de la modélisation ne peuvent être comparables avec l'expérience seulement pour un contenu hydrique inférieur à 25%. Au delà de ce pourcentage, les données de sortie ne correspondent pas aux données expérimentales [6][7][8].
- Rappelons que ce logiciel est initialement prévu pour des incendies de forêt, et non pour une simple branche, ce qui signifie que la bulk density ou densité apparente de la branche ne doit pas être trop faible, afin encore une fois, de ne pas obtenir de résultats aberrants. Le volume de végétation brûlée doit être au moins égal à un volume élémentaire représentatif de l'arbre. La figure 1 permet de mieux comprendre le terme de volume élémentaire représentatif. Le volume représentatif peut être schématisé par un cercle avec un certain volume ainsi qu'une certaine densité. Le but étant de trouver le cercle qui représente au mieux la bulk density de la branche.



FIGURE 1 : Représentation d'un volume élémentaire représentatif d'une branche (ici le cotonéaster).

Le cercle 1, par exemple, ne présente à aucun moment un volume de branche puisqu'aucune feuille n'est prise en compte, la seule densité présente est celle de l'air. Le cercle 2, quant à lui, englobe des feuilles et des branches mais contient encore beaucoup de vide (ou de volume

ayant la densité de l'air). Le cercle 3, plus grand, est déjà plus représentatif. Cependant, la forme de la branche dans le cercle est encore trop floue. Enfin, le cercle 4 est celui qui permet d'avoir une idée plus générale de forme de branche, de connaître plus précisément la part d'air et de végétation qui peut être présent dans ce type de branche.

- La litière choisie pour les brûlages est de la frisure d'excelsior (sapin). Cette litière ne dépendra pas des espèces végétales étudiées comme dans les travaux précédents. Ce choix se traduit principalement par le fait que la combustion pour ce type de combustible se produit facilement et sans résidus. De plus, le front de flamme induit par l'inflammation de la litière est rectiligne, ce qui permet d'éviter tout changement de flamme durant les brûlages effectués.

Ces limites ont pour conséquences de mettre en place un nouveau protocole expérimental basé sur les manipulations précédentes.

## Deuxième partie

# Matériel et Méthodes

## 1 Expérimentation

Les essais sont réalisés dans la lignée des expérimentations précédemment effectuées dans le laboratoire feu d'IRSTEA. L'étude a pour but d'observer la propagation de la flamme de la litière à la première branche pour plusieurs espèces ornementales. Pour chaque espèce, l'expérience se déroule en quatre temps : prélèvement, séchage, calibrage, brûlage. La litière située sous la branche a un rôle très important dans l'étude de la propagation de la flamme. Cependant, les contraintes de WFDS précédemment citées ont conduit à une modification du dispositif expérimental.

### 1.1 Litière de *Abiès excelsior*

Les litières utilisées par l'unité EMR pour les brûlages provenaient de la même espèce que celle de la branche étudiée ; elles étaient donc directement prélevées sur le terrain [4]. Cependant la masse de ces litières variait, n'était pas homogène en terme de composition, de bulk density et d'épaisseur, et le front de flamme généré n'était pas rectiligne.

La litière d'excelsior simplifie à la fois l'expérience et la modélisation. Ce combustible est très inflammable, le front de flamme est constant tout au long du brûlage. Le fait d'avoir la même litière permet de fixer une masse qui sera constante pour chaque manipulation et de la répartir de façon homogène dans la surface qui lui est consacrée. Il restera à trouver le volume et la masse qu'il faut placer pour avoir une hauteur de flamme qui permette le brûlage de la branche.

La surface initiale de litière est conservée, elle mesure 30cm×40cm ; il suffit donc de déterminer la bonne épaisseur afin que les flammes ne soient ni trop hautes ni trop petites. Différents essais de brûlages ont permis d'opter pour une épaisseur de litière de 1,5cm, avec une masse totale de 15g, répartie sur la surface dédiée.

### 1.2 Prélèvements de la branche

Les espèces étudiées proviennent directement des arbres ou arbustes présents à IRSTEA. Les branches, au même stade de maturation, sont choisies afin de représenter un volume qui soit supérieur au volume élémentaire représentatif de l'arbre, et ainsi d'éviter la limite du logiciel WFDS. Les branches sont mesurées et pesées pour obtenir une homogénéité dans les essais. Les espèces étudiées



sont considérées comme étant parmi les plus présentes dans les interfaces habitat-forêt de la région. La photo 2 permet de différencier chacune de ces espèces.



FIGURE 2 : Photos des quatre espèces brûlées avec le cyprès vert (a.), le laurier rose (b.), le fusain du japon (c.), et le cotonéaster (d.).

Les photos montrent que les branches des différentes espèces ont une géométrie et une forme de feuille qui diffèrent. Les espèces étudiées sont le cyprès vert (*Cupressus sempervirens*) qui est la seule espèce étudiée ici à avoir des feuilles en écailles, le laurier rose (*Nerium oleander*), le fusain du japon (*Evonymus japonicus*), et le cotonéaster (*Cotoneaster franchetti*).

### 1.3 Séchage

Le séchage des espèces est nécessaire afin de pouvoir comparer les résultats avec la modélisation obtenue avec WFDS. Au départ, pour un contenu hydrique compris entre 20% et 25%, les branches étaient séchées à l'air libre. Cependant, de cette façon, le séchage dépendait de façon significative de la météo journalière, entraînant notamment un séchage trop rapide et trop important lors d'épisodes de mistral. Pour parer ce problème, les branches sont placées dans une étuve éteinte et fermée, limitant ainsi de façon significative les conditions de séchage (annexe 0). Le suivi de la déshydratation des branches est calculé à l'aide du FMC (Fuel Moisture Content). Cette formule est présentée par l'équation (1).

$$FMC = \frac{P_F - P_S}{P_S} \times 100 \quad \begin{array}{l} P_F = \text{Poids frais} \\ P_S = \text{Poids sec} \end{array} \quad (1)$$

Chaque jour, le FMC est calculé en plaçant une masse ( $P_F$ ) de végétal frais dans l'étuve pendant 24h à 60°C. Cette masse de végétal provient d'un échantillon de branche qui sera brûlé. Cela signifie qu'il y a autant d'échantillons mis en étuve qu'il y a de branches destinées à être brûlées. Puis, cette végétation complètement sèche est pesée de nouveau pour obtenir le poids sec ( $P_S$ ). Avec des FMC supérieurs à 100% au moment de la récolte, le séchage met donc plusieurs jours avant d'atteindre le pourcentage d'humidité souhaité ; il dépend également de l'espèce étudiée (15 jours pour cyprès contre 8 jours pour le cotoneaster). Dès que le FMC recherché est atteint, les échantillons sont brûlés.

### 1.4 Calibrage de la branche

La bulk density de la branche doit être représentative d'un volume élémentaire de l'arbre pour pouvoir comparer les différentes données mesurées avec le logiciel. Pour cela, chaque échantillon est pesé, taillé et le nombre de feuilles est compté pour que les branches soient les plus homogènes possibles. L'annexe 1 permet d'observer les huit branches de cyprès avant et après calibrage. La masse ainsi que les dimensions des branches, sont données dans le tableau en annexe 2.

Pour déterminer la bulk density, chaque branche doit être schématisée par une forme géométrique (le cyprès en cône, le laurier rose en cylindre, le fusain et le cotoneaster sous forme d'un parallélépipède

rectangle). La masse de la branche est ensuite divisée par le volume de la forme géométrique, ce qui permet ainsi de déduire la bulk density en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 1.5 Brûlage

Le centre dispose d'un laboratoire permettant de réaliser des brûlages de végétation. Le dispositif expérimental a été amélioré pendant le stage.

### 1.5.1 Dispositif de base

La figure 3 permet de visualiser le dispositif initial mis en place pour l'expérience. Le matériel était placé sur un banc d'essai surmonté d'une hotte aspirante afin d'évacuer toutes les fumées. Pour chaque espèce, la hauteur moyenne entre la branche et la litière était mesurée sur le terrain afin d'être reproduite en laboratoire. La litière était prélevée directement sur le terrain au pied de l'espèce étudiée. L'instrumentation était composée de trois thermocouples Ahlborn de type K, de diamètre 1,5mm disposés à des hauteurs différentes afin de suivre l'évolution de la température tout au long du brûlage autour de la branche. Le thermocouple bas était placé 1cm en dessous du point le plus bas de la branche. Le thermocouple du milieu était placé quant à lui à l'aplomb de la branche, soit à 15cm par rapport au bord de la litière où se fera l'ignition. Le thermocouple haut était à 1cm au dessus du point le plus haut de la branche. Une balance, de la marque Ohaus Ranger 3000, reliée à un ordinateur, mesurait directement la perte de masse de la litière pendant le brûlage. Le béton cellulaire, positionné sur la branche permettait de disposer la litière tout en évitant d'endommager la balance. Une règle était placée derrière le dispositif afin de pouvoir évaluer la hauteur de flamme générée par le brûlage de la litière ou de la branche après ignition, et, dans cette optique, un appareil photo permettant de filmer les brûlages était positionné devant le banc d'essai.

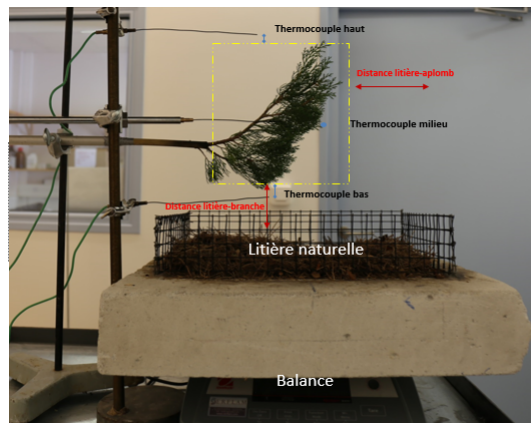


FIGURE 3 : Photo du dispositif expérimental initial.

La litière restant désormais identique pour chaque essai, il est possible de placer la balance sous la branche. En effet, la perte de masse de la litière d'excelsior est totale, quelque soit la masse initiale lors de tous les brûlages. Il suffit donc de faire plusieurs brûlages avec une litière ayant les mêmes caractéristiques (masse, épaisseur, etc.) et l'évolution de la perte de masse sera connue.

### 1.5.2 Dispositif modifié

Le matériel pour les manipulations est identique afin de rester dans la lignée des travaux réalisés par l'équipe de recherche. Le dispositif est quasiment identique (figure 4). Les thermocouples sont

installés de la même manière. Seule la balance se situe désormais sous une potence permettant de fixer la branche pour ainsi connaître la perte de masse du végétal en direct pendant sa combustion. Cette décision a été mise en place lors des essais de brûlage de la litière seule. La branche est placée à 10cm au-dessus de la litière. Ce changement permet de fixer le même dispositif pour toutes les espèces, et ainsi d'assurer la répétabilité des essais. Certes, le dispositif s'éloigne quelque peu de la réalité (la litière n'est pas d'origine, hauteur de la branche fixe), mais il est nécessaire de pouvoir exploiter de façon certaine la modélisation avec l'expérience. Une caméra thermique est ajoutée afin de connaître plus précisément l'endroit et les températures où l'ignition a lieu. L'appareil photo de départ est tout de même conservé. Une fiche de saisie est créée pour chaque essai afin de relever la température et l'humidité ambiante, le poids avant et après brûlage et les dimensions de la branche, le temps où le front de flamme arrive à l'aplomb de la branche, les temps d'ignition, de fin de brûlage de la branche et de fin de brûlage de la litière annoncés et enregistrés grâce à un chronomètre.

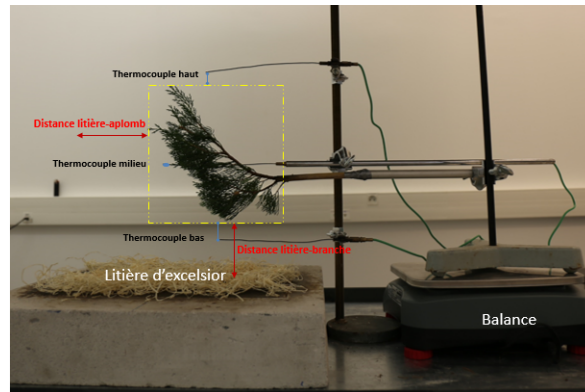


FIGURE 4 : Dispositif expérimental modifié en début de stage.

### 1.5.3 Dispositif final

La première session de brûlage a permis de traiter des données enregistrées pour les comparer avec des données de sorties de WFDS. Les premières comparaisons ont permis de constater que la perte de masse était du même ordre de grandeur que les données de sortie générées par le logiciel. Cependant, les évolutions de températures peuvent avoir des écarts assez importants. Le matériel utilisé pendant l'expérimentation ne permet donc pas de confronter avec précision modélisation et expérience. Les thermocouples ont une vitesse d'acquisition d'une mesure par seconde, ce qui signifie qu'aucune fluctuation de la part de la flamme n'est enregistrée. De plus, la balance permet de connaître la perte de masse à une précision d'un gramme seulement. Les incertitudes de mesures sont très importantes de par le manque de précision de la balance, mais également par rapport à une branche qui ne pèse en général qu'une vingtaine de grammes. Par ailleurs, le protocole expérimental n'est pas assez rigoureux afin de confronter avec précision l'évolution des températures. En effet, étant donné que la position des thermocouples n'est pas mesurée, les capteurs de température ne sont donc pas définis avec précision dans WFDS.

Pour palier ces inconvénients, les thermocouples initiaux sont remplacés par trois thermocouples Omega de type K avec un diamètre de 0,25mm lui permettant une acquisition de données plus importante ( $5 \text{ mesures.s}^{-1}$ ). Les nouveaux capteurs de température sont reliés à une centrale d'acquisition Campbell de type CR800. La prise en main du logiciel PC200 est nécessaire afin de récupérer les données. Désormais, la position des thermocouples est relevée avant chaque essai afin de pouvoir placer à la même position les capteurs de température dans WFDS. Il existe tout de même une incertitude de mesure lors du relevé de position des thermocouples d'environ 1cm. Dans un souci de

répétabilité, la position doit être la plus constante possible sauf si la forme de la branche ne le permet pas. La position des thermocouples a également été changée par rapport aux premiers dispositifs. En effet, après plusieurs brûlages la probabilité pour que l'ignition ait lieu à l'aplomb de la branche est très faible. Le thermocouple placé en-dessous de la branche ne mesure que des températures générées par la litière. Il est donc plus intéressant de placer ces deux thermocouples de chaque côté de la branche. Une balance Mettler Toledo avec une précision de 0,01g remplace l'ancienne balance Ohaus Ranger. La balance est reliée à un ordinateur qui permet d'enregistrer une mesure de la masse par seconde. Ces deux changements majeurs permettent de connaître l'évolution de la température à un point donné de manière plus précise puisque les mesures passent de une par seconde à cinq par seconde, et obtenir une décroissance de la masse beaucoup plus fine lors du brûlage. La figure 5 ci-dessous permet de visualiser le nouveau dispositif expérimental.

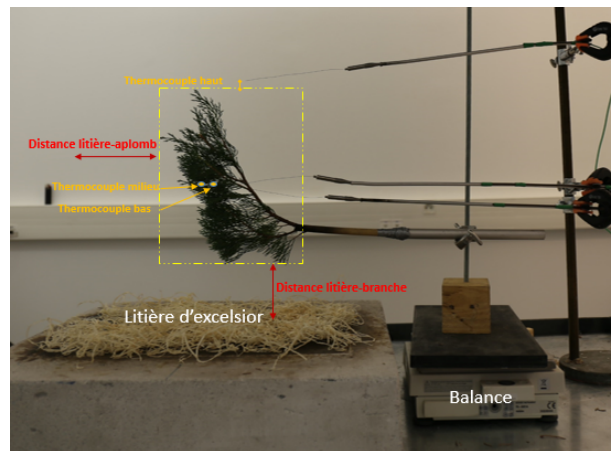


FIGURE 5 : Dispositif final.

## 1.6 Déroulement du brûlage

Une fois que la branche est ajustée à 10cm au-dessus de la litière et à 15cm du début de celle-ci, que la position des thermocouples est mesurée, et que la balance affiche la masse qui correspond à celle de la branche, le brûlage est mis en route en enflammant une mèche de coton imbibée d'alcool (éthanol) située à l'extrémité de la litière opposée à la branche. Dès l'inflammation de la mèche, le chronomètre ainsi que tous les appareils de mesure sont mis en route. Le temps de réglage est bien supérieur à celui du brûlage d'un échantillon. La figure 6 permet d'avoir un aperçu du brûlage d'une branche de cyprès avec une humidité de 20%.

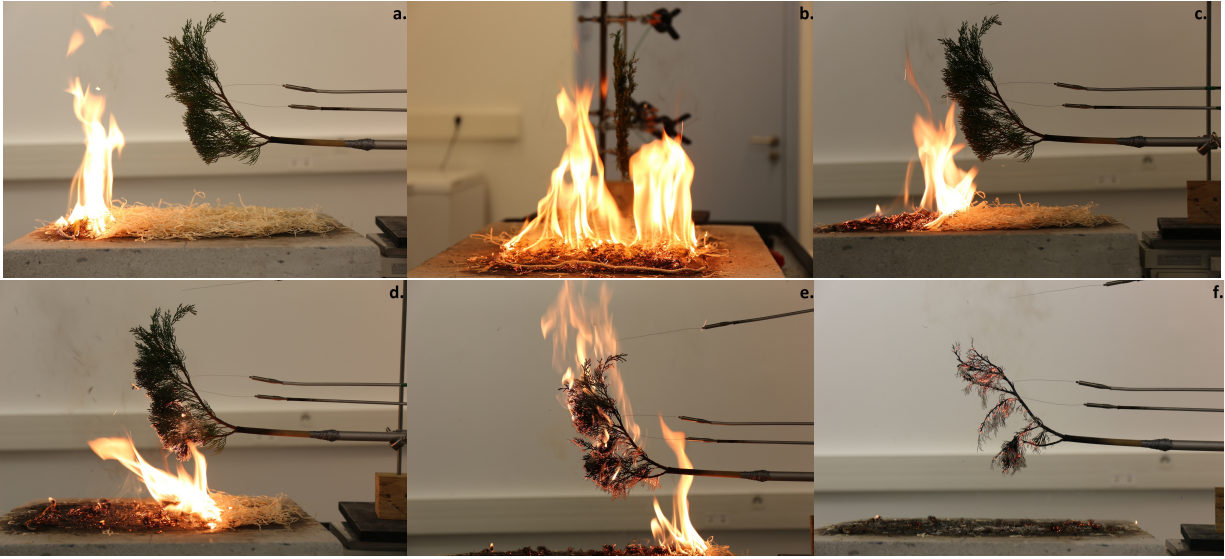


FIGURE 6 : Photos représentant le brûlage du cyprès.

Ces photos représentent les moments clés d'un brûlage. La photo 6a. est prise en début de brûlage, lorsque la mèche imbibée d'alcool est allumée. Le front de flamme est uniforme et avance de façon rectiligne. La photo suivante (6b.) permet d'observer l'avancement de la flamme sous un autre angle. Cette photo met également en avant la forme que la flamme peut avoir durant le brûlage. Cette forme est hétérogène, et peut ainsi faire varier de façon significative les températures captées par les thermocouples. Dans ce cliché par exemple, si le thermocouple se situe entre les deux flammes, au milieu de la litière, alors l'évolution de la température captée par le thermocouple risque de ne pas être représentative de celle du front de flamme. L'illustration 6c. met en avant l'arrivée du front de flamme vers l'aplomb de la branche soit à 15cm du début de la litière. La photo 6d. est prise au moment de l'ignition, c'est à dire au moment où la branche prend feu. Cette photo montre, dans ce cas, que l'ignition n'a pas lieu à l'aplomb de la branche, d'où l'idée de déplacer le thermocouple plus haut et plus proche de la branche pour avoir des températures plus fiables. Le cliché 6e. montre la combustion de la branche, avec des hauteurs de flamme qui peuvent monter jusqu'à 80cm pour certains essais. Enfin, la dernière photographie 6f. permet d'observer l'état de la branche après le brûlage. La combustion des feuilles n'est pas totale, quelques cendres sont encore présentes ainsi que la partie boisée et carbonisée du cyprès. Le tableau en annexe 3 est un récapitulatif des mesures effectuées pendant l'expérience ainsi que les mesures calculées.

## 2 Exploitation de la caméra thermique

Une caméra thermique est placée au même endroit que l'appareil photo afin d'avoir un autre aperçu des brûlages, à la fois de la litière et de la branche. Cette visualisation permet d'avoir une idée des températures captées par la caméra. Les données générées par les thermocouples et les vidéos dans le visible ont montré que l'ignition n'était pas toujours située à la pointe de la branche, et que certains échantillons bougeaient (du fait de la dessiccation) avant cette ignition. Ce mouvement est dû à l'évaporation de l'eau à cause de la forte chaleur que la branche subit. La caméra s'est donc avérée pratique pour déterminer la température à l'endroit de l'ignition (température d'ignition), et pour avoir une idée de l'évolution de la température juste avant l'ignition. Les données sont traitées à l'aide du logiciel de traitement Flir.

Cependant, il n'existe aucune référence avec une technique permettant de déterminer l'ignition d'une branche par caméra thermique. Il faut donc prendre en main le logiciel pour ensuite l'adapter au mieux au cas d'étude. La meilleure technique est de relever le temps exact de l'ignition avec la caméra visible pour ensuite le placer sur celui de la caméra thermique. Le système n'étant pas automatisé, c'est à dire que les caméras ne sont pas lancées en même temps, il faut être vigilant sur le décalage qu'il existe entre les deux vidéos. La figure 7 permet de mettre en évidence la manière qui permet de déterminer le moment d'ignition. Une fois que le temps d'ignition est déterminé, et que les films sont calibrés, il faut dessiner la zone où l'ignition s'est produite avec le logiciel Flir. L'évolution de la température avant l'ignition étant recherchée, la zone est dessinée deux secondes avant celle-ci.

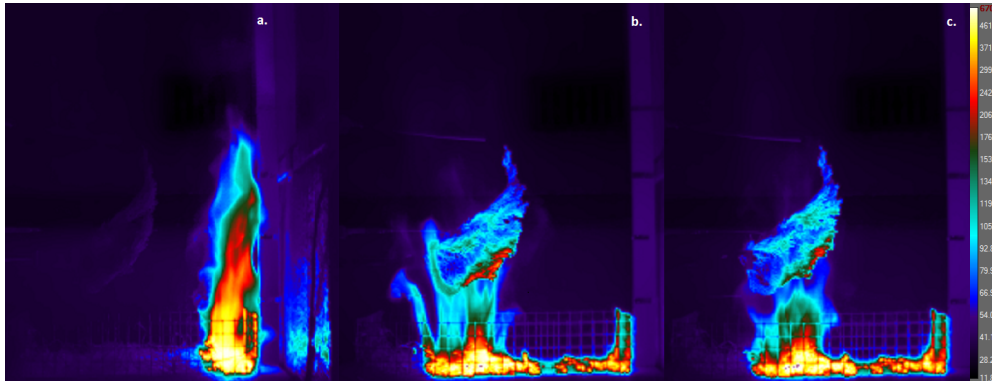


FIGURE 7 : Détermination de la zone d'ignition avec le début d'expérience (a.), image thermique au temps d'ignition relevé à l'aide de la caméra visible (b.) et l'image 2 secondes avant le temps d'ignition (c.).

Pour construire cette zone, il faut au départ se placer au moment de l'ignition, reculer de deux secondes et diminuer la palette de couleurs jusqu'à ce qu'une zone se dessine. Cette diminution des couleurs met en évidence les températures les plus élevées qui semblent dessiner la zone où se produit l'ignition. Il est possible d'attribuer des fonctions comme la température moyenne, minimale ou maximale captée dans la zone choisie pour en déduire l'évolution au cours du brûlage. La photo ci-dessous (fig 8) permet d'observer le traitement de données par caméra thermique.

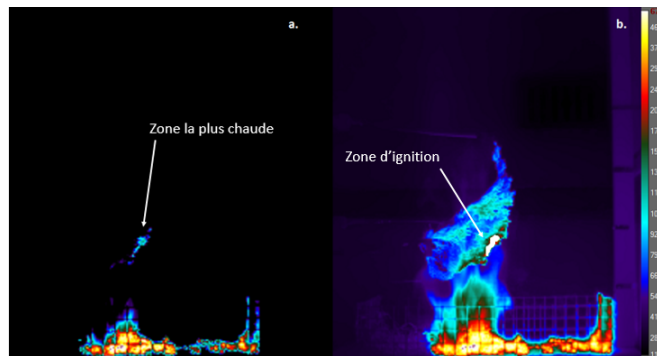


FIGURE 8 : Détermination de la zone d'ignition avec la diminution de la palette de couleur afin de connaître l'endroit le plus chaud de la branche (a.) et mise en évidence en blanc (b.).

La température d'ignition a été déterminée sur les vingt films des brûlages du cyprès. La température d'ignition moyenne est de  $248,8^{\circ}C$  avec un écart type de  $37,58^{\circ}C$ . Cette température

semble correcte. En effet, Babrauskas [9] a démontré qu'expérimentalement la température d'ignition moyenne du bois est de  $250^{\circ}\text{C}$ , ce qui est proche de la valeur déterminée avec le logiciel Flir en supposant que la température d'ignition du bois soit du même ordre de grandeur que celle d'une branche avec une humidité de 20%.

Cette technique fonctionne très bien pour des végétaux ayant une biomasse importante dans leurs branches, mais cela devient tout de suite plus compliqué sur des végétaux tel que le fusain. Le fusain est une espèce qui a des branches avec des feuilles espacées, donc avec une configuration de branche très différente de celle du cyprès. L'ignition se réalise en général sur une feuille seulement, avant que la flamme ne se propage à d'autres. De plus, le mouvement de la branche rend la tâche plus difficile, ce qui signifie que pour le traitement des vidéos en infrarouge, la zone d'ignition doit être dessinée autour de la feuille de façon précise au moment exact de la mise à feu.

## 3 Modélisation

### 3.1 Présentation du logiciel

WFDS est une extension de FDS créée par le NIST qui permet de modéliser en trois dimensions des feux de végétation. Ce logiciel utilise la dynamique des fluides pour résoudre les équations qui régissent le transfert de chaleur, la combustion et la dégradation thermique des combustibles végétaux. La méthode de résolution se sert de la LES (Large Eddy Simulation) pour résoudre les équations de masse, quantité de mouvement et énergie.

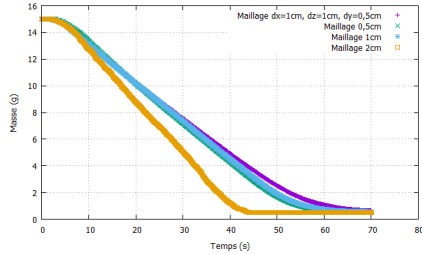
La température moyenne locale est obtenue par l'équation des gaz parfaits. La dissipation de l'énergie cinétique s'effectue par un modèle de fermeture de Smagorinsky pour la turbulence. L'équation de continuité est résolue avec la forme de Stokes dans un repère cartésien [7]. Les discrétisations spatiales sont du second degré. Le taux de libération de chaleur de combustion est modélisé avec le concept EDC (Eddy Dissipation Concept) de Magnussen [10]. Les modèles utilisés pour décrire le transfert thermique dans le combustible végétal sont inclus dans les modèles de CFD (Computational Fluid Dynamics) en incluant la dégradation thermique et la combustion en phase gazeuse.

La végétation est composée d'éléments combustibles thermiquement fins et optiquement noirs. L'émissivité de 0,9 caractérise la végétation naturelle. L'hypothèse du "thermiquement fin" est couramment utilisée dans les modèles de propagation du feu incluant des combustibles naturels fins bien que discutable en particulier pour la combustion de végétaux [11]. Pour simplifier la modélisation, la végétation est représentée comme une forme géométrique simple (cône, cylindre, rectangle) avec une répartition uniforme du combustible. Le transfert de chaleur convectif et radiatif entre la phase gazeuse et la végétation est pris en compte, tout comme la traînée de la végétation. En général, lorsque la température dans le végétal augmente, l'eau s'évapore, suivie de la pyrolyse, puis de l'oxydation du charbon. Pour modéliser ce processus, l'équation de la température pour le combustible du végétal est résolue en supposant une décomposition endothermique en deux étapes : évaporation de l'eau suivie d'une pyrolyse de combustible solide.

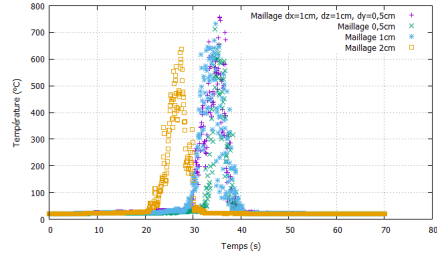
### 3.2 Construction du domaine d'étude

La géométrie dans laquelle les brûlages sont modélisés mesure 40cm, 30cm et 1m selon les axes  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$  respectivement. L'annexe 4 permet de visualiser les dimensions du domaine d'étude. Le repère  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$  sera la référence lorsque la taille des mailles, ou les positions de branche, ou encore de capteurs de température doivent être précisées. Quatre modélisations de 70s sont lancées avec des maillages différents afin de trouver le plus efficace pour le cas d'étude. Le tableau en annexe 5 permet de connaître les temps de calculs, les dimensions et tailles des mailles. Les figures 9a et

9b représentent la perte de masse de la litière, ainsi que l'évolution de la température en un même point. Ces courbes permettent de mettre en avant le maillage qui sera utilisé pour la modélisation des brûlages.



(a) Perte de masse de la litière pour différents maillages.



(b) Évolution de la température pour un même capteur pour différents maillages.

FIGURE 9 : Étude de la convergence du maillage.

La courbe représentant la perte de masse de la litière montre que le maillage choisi, le maillage 1cm et le maillage 0,5cm dessinent une même tendance. Les évolutions de la température à un même point permettent de conforter le résultat. D'après la figure 9, le maillage 1cm présente des bons résultats avec un temps de calcul assez faible (8h). Cependant, le maillage un peu plus précis avec des mailles de 1cm selon  $\vec{x}$  et  $\vec{z}$  et 0,5cm selon  $\vec{y}$  est privilégié simplement pour modéliser plus finement la branche.

Avant d'étudier la propagation de la flamme de la litière à la branche, il est nécessaire de connaître le comportement de la litière seule lors du brûlage. Pour cela, les différents paramètres qui la caractérisent sont implémentés dans WFDS (Annexe 6).

### 3.3 Modélisation de la branche

#### 3.3.1 Première approche

Dans WFDS, la représentation des arbres et de la végétation est une géométrie simple basée sur des cônes, des cylindres, ainsi que des rectangles. La modélisation de l'échelle intermédiaire, c'est à dire d'une branche, ne sera donc jamais précise. Pour débiter et prendre en main le logiciel, une branche de cyprès est modélisée par un unique cylindre. L'annexe 7 permet de visualiser la première modélisation réalisée avec un simple cylindre.

#### 3.3.2 Position des capteurs de température

La position des trois thermocouples lors des expériences étant relevée, il est désormais plus facile de comparer les températures générées par WFDS avec celles des thermocouples. Dans la plupart des cas, la position des thermocouples ne varie pas beaucoup sauf si la géométrie de la branche est trop différente. L'incertitude de mesure dans les manipulations est tout de même de 1cm. Dans WFDS, plusieurs capteurs de température sont modélisés à cause de cette incertitude. Le tableau (annexe 8) met en évidence la position des thermocouples mesurée lors des expériences afin de pouvoir disposer les capteurs de température dans WFDS à des coordonnées identiques.



### 3.3.3 Modélisation finale

La modélisation précise d'une branche avec WFDS n'est pas possible, de par la diversité des formes des branches, mais aussi par les formes géométriques disponibles dans le logiciel. Cependant, modéliser une branche par un seul cylindre n'étant pas assez rigoureux, la branche sera donc construite à partir d'une multitude de petits cylindres qui, une fois placés, représentent mieux l'espèce étudiée. Il faut, pour cela, considérer une géométrie générale de branche pour chaque espèce. Les dimensions de la branche modélisée par WFDS sont du même ordre que celles des branches brûlées en laboratoire. Le tableau en annexe 9 met en évidence les critères d'entrée qu'il faut préciser dans WFDS pour chaque espèce (masse volumique, bulk density, etc.).

**Modélisation du cyprès** La modélisation de la branche de cyprès est créée en tenant compte d'une géométrie la plus générale possible. Les feuilles sont proches et nombreuses, la biomasse est donc élevée. Le FMC de la branche est de 18%, et représente celui mesuré lors des expériences. La branche est modélisée avec 22 cylindres de taille différentes. La figure 10 permet d'observer la géométrie, ainsi que le brûlage du cyprès modélisé.

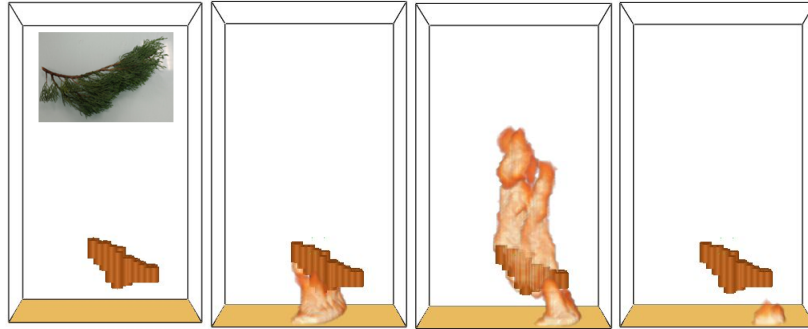


FIGURE 10 : Modélisation du brûlage de la branche de cyprès vert.

**Modélisation du fusain** La géométrie du fusain est différente de celle du cyprès. Les feuilles sont plus espacées, plus grandes (ce ne sont pas des écailles comme pour le cyprès), et leur nombre moins important. Le FMC de la branche est de 20%, et représente celui mesuré lors des expériences. La branche est modélisée avec 73 cylindres de taille égale. La figure 11 permet d'observer la géométrie, ainsi que le brûlage du fusain modélisé.

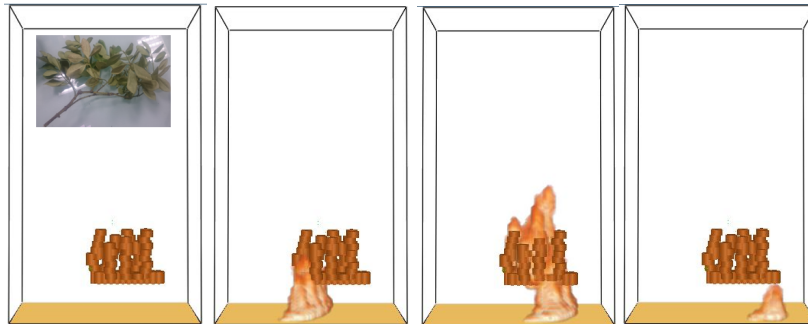


FIGURE 11 : Modélisation du brûlage de la branche de fusain du japon.

**Modélisation du cotonéaster** La géométrie de la branche de cotonéaster est différente de celle du cyprés. Les feuilles sont très espacées, plus petites, et leur nombre moins important encore que dans celle du fusain. Le FMC de la branche est de 10%, et représente celui mesuré lors des expériences. Le faible contenu hydrique dans la branche est dû au séchage très rapide des feuilles. La branche est modélisée avec 95 cylindres de taille égale. La figure 12 permet d’observer la géométrie, ainsi que le brûlage du cotonéaster modélisé.

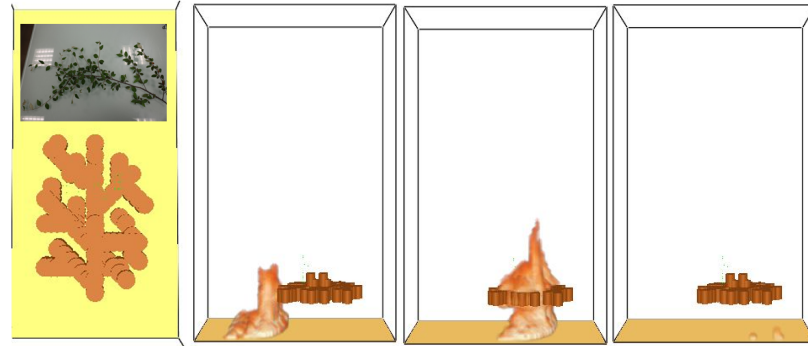


FIGURE 12 : Modélisation du brûlage de la branche de cotonéaster.

**Modélisation du laurier rose** La modélisation de la branche de laurier rose est créée en tenant compte d’une géométrie la plus générale possible. Les feuilles sont proches, longues et nombreuses, la biomasse est donc élevée. Le FMC de la branche est de 18%, et représente celui mesuré lors des expériences. La branche est modélisée avec 161 cylindres de taille différentes. La figure 13 permet d’observer la géométrie, ainsi que le brûlage de la branche de laurier modélisée.

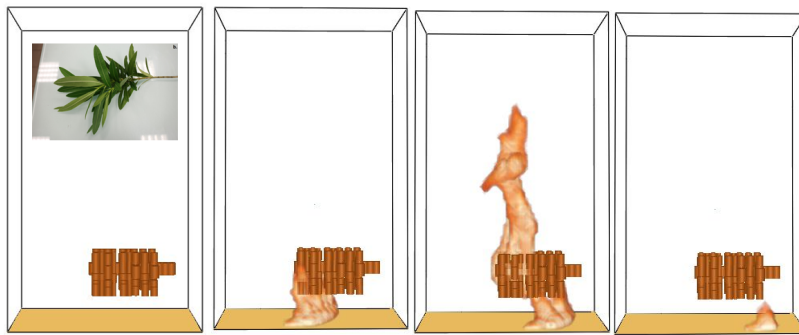


FIGURE 13 : Modélisation du brûlage de la branche de laurier rose.

### Troisième partie

## Résultats

La modélisation du brûlage des branches des quatre espèces est réalisée. Les températures et les pertes de masse sont comparées aux données issues de l’expérience. Des réflexions ont été menées avant les résultats définitifs, comme la nécessité de remplacer les thermocouples initiaux, obtenir des résultats semblables entre modélisation et expérience pour le brûlage de la litière, prouver que les résultats de WFDS sont incorrects pour un contenu hydrique dépassant les 20%, ou encore montrer la variabilité de l’expérience avec les températures relevées par les thermocouples.

# 1 Expériences préliminaires

## 1.1 Comparaison entre thermocouple Ahlborn et thermocouple Omega par l'expérience dite "du briquet"

Il est nécessaire de prouver l'efficacité des nouveaux thermocouples Omega par rapport aux thermocouples Ahlborn initialement utilisés. Une expérience simple est donc réalisée. Une flamme de briquet est placée à environ 2cm en dessous du thermocouple pendant 10 secondes. La même expérience est modélisée sur FDS. Le capteur de température du logiciel n'a pas d'inertie, et permettra ainsi d'avoir un référentiel sur une évolution idéale de la température. La figure 14 permet d'observer les températures relevées par les deux types de thermocouples et FDS.

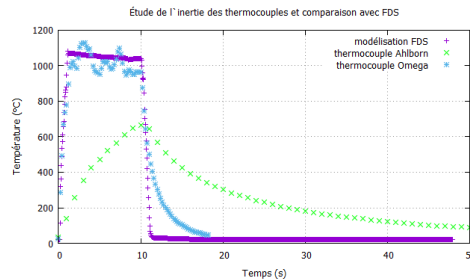


FIGURE 14 : Étude de l'efficacité des thermocouples et comparaison avec FDS pour l'expérience du briquet.

La différence entre les courbes générées par les thermocouples Ahlborn et Omega est flagrante. La croissance des courbes au moment où le briquet se rapproche du thermocouples est immédiate pour FDS et les thermocouples Omega. Un plateau se dessine pendant les 10 secondes d'exposition de la flamme sur le capteur. Enfin, la décroissance se fait directement à  $t=10s$ , lorsque le briquet est éteint. Cependant, sur les courbes des thermocouples Ahlborn, la croissance est beaucoup plus longue, aucun plateau ne se dessine pendant les 10s d'exposition, et les températures maximales ne sont pas captées. La décroissance est beaucoup plus progressive à cause de l'inertie des thermocouples. Ces résultats montrent que ces thermocouples ont une fréquence de mesure faible, ainsi qu'une inertie trop importante pour espérer avoir des résultats rigoureux. Une deuxième expérience qui rejoint plus le cas d'étude est réalisée afin de prouver l'efficacité des nouveaux thermocouple en expérience de laboratoire.

## 1.2 Comparaison entre thermocouple Ahlborn et thermocouple Omega par le brûlage de la litière

L'expérience précédente a permis de constater que le changement d'instrumentation est nécessaire. Une seconde expérience permettant de comparer les thermocouples est réalisée avec cette fois des conditions d'expérience. Les thermocouples Ahlborn et Omega sont placés par paire à des endroits différents afin d'enregistrer les températures à des points précis de la litière ( $H=2,5cm$  et  $H=15cm$ ) et de mettre en évidence la différence de fiabilité dans l'acquisition des données avec deux types de thermocouples, notamment lorsqu'un front de flamme se rapproche de manière rectiligne. La figure 15 permet de montrer la différence d'évolution de la température entre les thermocouples pour les deux positions.

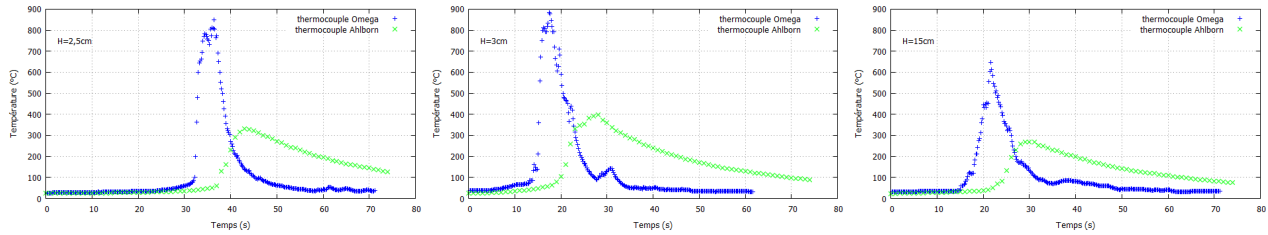
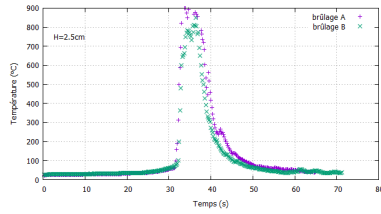


FIGURE 15 : Comparaison de l'évolution de la température entre les thermocouples Ahlborn et Omega placés par paire à différentes positions lors du brûlage de la litière. Les paires de thermocouples sont placées à des hauteurs de 2, 5, 3 et 15cm respectivement.

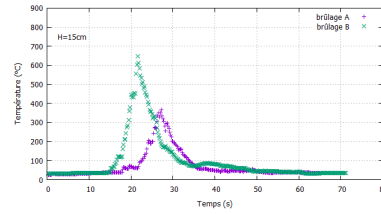
Quelle que soit la hauteur des thermocouples, les allures des courbes montrent bien que les évolutions des températures sont différentes pour les deux types de thermocouple. Les températures maximales captées par les thermocouples Ahlborn sont trois fois moins élevées pour certaines courbes que celles enregistrées par les thermocouples Omega, et sont loin de représenter une température de flamme (entre 300 et 400°C max sur le fig 15). L'inertie et la fréquence de mesure de ces thermocouples ne sont pas assez précises pour espérer avoir des résultats rigoureux qui mettent en évidence l'évolution de la température générée par la litière lors d'un brûlage. Les thermocouples Omega dessinent des évolutions de températures qui semblent réalistes et représentatives d'une température de flamme (jusqu'à 900°C sur la fig 15). Le changement d'instrumentation pour la mesure des températures s'est avéré plus que positif compte tenu de la précision des résultats.

### 1.3 Variabilité des mesures de perte de masse ainsi que des températures lors des brûlages de litière

Le changement de la balance et des thermocouples permettent d'obtenir des résultats plus rigoureux. Il est intéressant d'observer la variation de ces mesures pour des brûlages de litière identique. Le brûlage de la litière seule est réalisé deux fois (brûlage A et brûlage B). La litière est placée sur une balance afin de connaître la perte de masse. Visuellement, les brûlages sont identiques, reste à comparer les données captées par les thermocouples ainsi que par la balance de précision. L'annexe 10 permet de mettre en avant la perte de masse de la litière durant les deux essais. Les courbes montrent bien que l'évolution de la perte de masse de la litière est la même pour les deux essais. La litière brûle pendant un temps compris entre 60 et 65 secondes. Cette observation est validée pour les deux essais. Il est considéré que la perte de masse de la litière est identique pour tous les brûlages. Il faut désormais comparer les valeurs enregistrées par les thermocouples Omega à trois positions différentes pour les brûlages A et B. La figure 16 permet de mettre en évidence l'évolution de ces températures relevées par les thermocouples positionnés à deux hauteurs différentes.



(a) Thermocouple placé à  $H=2,5\text{cm}$



(b) Thermocouple placé à  $H=15\text{cm}$

FIGURE 16 : Comparaison des températures entre les thermocouples Omega placés à deux hauteurs lors du brûlage de la litière (2,5 et 15cm).

La figure 16 montre les évolutions de température à des positions différentes pour les deux essais. Les courbes à  $H=2,5\text{cm}$  (fig 16a) présentent une évolution similaire avec un pic de température maximale qui varie d’une cinquantaine de degrés entre les deux essais. La figure 16b ( $H=15\text{cm}$ ) montre le décalage des courbes dans le temps, avec un pic de température deux fois moins élevé pour l’essai A. Ces décalages de courbe peuvent s’expliquer par la fluctuation de la flamme qui ne permet pas au thermocouple de capter correctement la température souhaitée. Le deuxième graphique montre que le thermocouple qui se trouve à une hauteur de 15cm est confronté de façon importante à la fluctuation, mais également à la hauteur de flamme.

La perte de masse lors des deux brûlages de la litière est identique, celle-ci peut être moyennée. La confrontation entre les courbes des températures montre que l’éloignement des thermocouples par rapport à la flamme entraîne une grande variation dans la mesure des températures. Ce problème ne devrait pas avoir un impact important sur les expériences de brûlages de la branches puisque les thermocouples sont disposés le plus proche possible de la branche.

#### 1.4 Confrontation entre expérience et modélisation pour le brûlage de la litière

Avant de passer au brûlage des branches, le brûlage de la litière seule est étudié. Cette expérience permet de connaître les températures générées à différents endroits par la litière, ainsi que la perte de masse dans le temps, pour comparer les résultats avec la modélisation. Pour rappel, la litière pèse 15g sur une surface de  $30\text{cm}\times 40\text{cm}$  et d’une épaisseur de 1,5cm. La modélisation de la litière est réalisée sur WFDS. Les capteurs de température peuvent être placés à des positions semblables à celles des thermocouples expérimentaux grâce à la mesure de ceux-ci avant chaque brûlage. Les données de sortie sont comparées avec les données enregistrées lors de l’expérience telles que la perte de masse moyenne (figure 17), ou encore l’évolution des températures moyennes (figure 18).

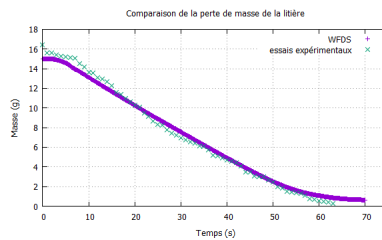


FIGURE 17 : Comparaison entre WFDS et expériences de la perte de masse de la litière.

La masse au début du brûlage est légèrement supérieure à 15g à cause de la mèche d’ignition.

Les deux courbes ont une décroissance proche. La fin de perte de masse modélisée est là aussi très proche de l'expérience, ce qui signifie que le temps de brûlage est identique. Il y a donc une bonne corrélation entre l'expérience et la modélisation.

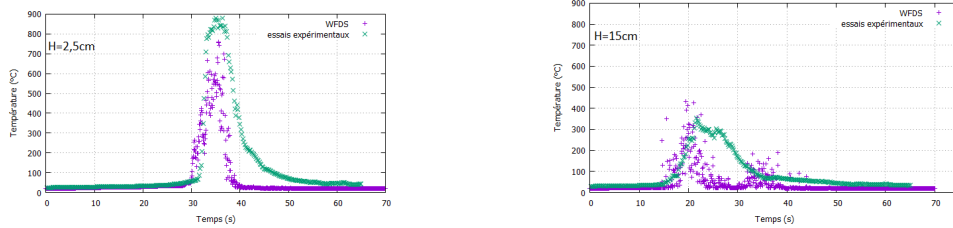


FIGURE 18 : Comparaison entre l'évolution des températures moyennes issues de l'expérience et de l'évolution des températures issues de WFDS pour des capteurs placés à la même hauteur que dans l'expérience.

L'allure des courbes des deux premiers graphiques est très encourageante. Le temps auquel la croissance des courbes débute est quasiment identique, le pic diffère surtout pour le premier graphique avec une différence d'environ  $100^{\circ}C$ . La décroissance de la température est plus longue pour les thermocouples expérimentaux à cause de leur inertie. Le deuxième graphique présente des allures de courbes assez différentes. Les capteurs étant à 15cm de la litière, la fluctuation de la flamme a un rôle important lors de l'enregistrement des températures.

## 2 Modélisation de la propagation du feu de la litière à la branche

### 2.1 Détermination du seuil maximal de contenu hydrique de la branche

En début de rapport, les limites du logiciel ont montré que les résultats sont incorrects pour une modélisation avec des branches ayant un contenu hydrique supérieur à 25%. La figure 19 permet de mettre en évidence ces limites.

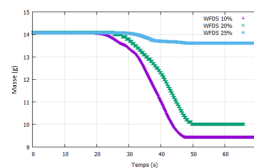


FIGURE 19 : Mise en évidence de la modélisation de la perte de masse de la branche du fusain lors du brûlage en fonction du contenu hydrique.

Le graphique compare la perte de masse de la branche dans le temps en fonction des contenus hydriques à 10%, 20%, et 25%. La courbe avec le FMC de 10% décroît plus vite que celle avec le FMC à 20%, tout simplement parce que le contenu hydrique est plus faible, donc l'inflammation de la branche est plus rapide. La courbe représentant le FMC à 25% ne varie quasiment pas alors que ce contenu hydrique reste très faible par rapport à des végétaux présents dans la nature. Cela confirme bien la restriction nécessaire en terme de FMC de la branche.

## 2.2 Modélisation du cyprès

Les données issues de la modélisation et de l'expérience sont traitées pour les brûlages de branches de cyprès. La figure 20 compare l'évolution de la perte de masse lors du brûlage de la branche de cyprès.

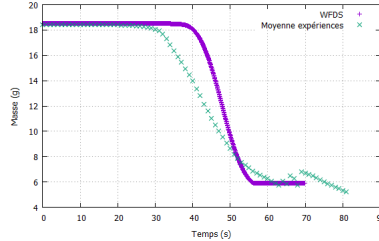


FIGURE 20 : Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du cyprès entre WFDS et l'expérience (moyennée sur huit essais).

Les deux courbes sont décroissantes mais avec un écart de 10 secondes au moment où la décroissance débute. Cela signifie que l'inflammation a lieu dans WFDS même à une échelle qui n'est pas l'échelle d'une forêt ou d'un arbre. Cependant, la décroissance de la courbe issue de l'expérience est moins importante que celle obtenue avec WFDS. La masse finale est quasiment identique pour les deux courbes. La figure 21 représente l'évolution entre les températures lors du brûlage et les températures générées par WFDS à des positions identiques.

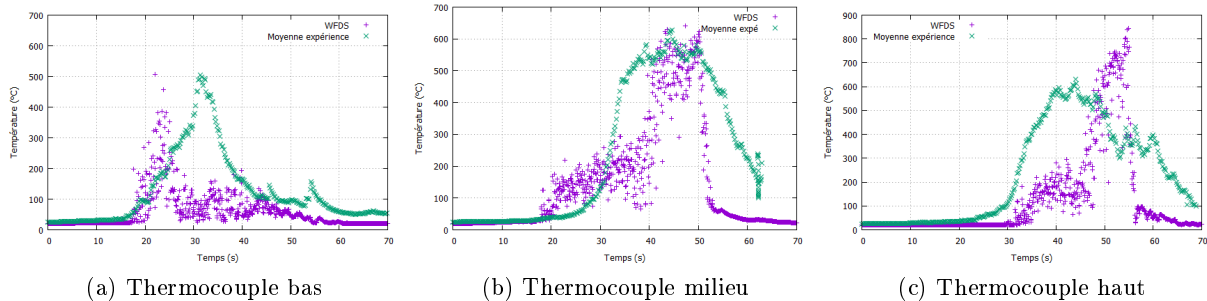


FIGURE 21 : Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de cyprès.

La figure 21a met en évidence l'évolution de la température enregistrée par le thermocouple bas par WFDS et la moyenne des expériences. Les allures des deux courbes sont semblables avec un décalage de 10 secondes entre les deux pics de température. La croissance débute pour les deux cas à  $t=20s$ , les pics de température sont identiques à environ  $500^{\circ}C$ . La décroissance de la courbe représentant l'expérience est beaucoup plus longue que celle de WFDS.

Pour le thermocouple du milieu, les courbes sont assez différentes. La croissance, ainsi que la décroissance des courbes sont différentes. La croissance brutale de la courbe de WFDS a lieu à environ  $40s$  contre  $25s$  pour l'expérience. Cela montre bien que la montée en température se réalise plus rapidement pour l'expérience, d'où la différence entre les pertes de masse. Un plateau se dessine pour les deux courbes à  $550^{\circ}C$  environ, avec des pics de températures à  $620^{\circ}C$ . Ce plateau est légèrement plus long pour l'expérience. Enfin la diminution des températures se fait au même temps avec une décroissance plus longue pour l'expérience.

Le thermocouple du haut montre des courbes de température très différentes, avec une croissance et une décroissance qui ne se ressemblent pas, un pic de température  $250^{\circ}\text{C}$  plus élevé pour WFDS. Les différences entre les courbes issues de WFDS et celles issues de l'expérience, notamment au niveau de la croissance et de la décroissance, peuvent être expliquées par : la variabilité entre les essais, l'inertie des thermocouples qui existe dans l'expérience, le brûlage de la branche plus long en expérience, le mouvement de la branche qui peut venir toucher le thermocouple, ou encore l'endroit où l'ignition a lieu. La figure 22 permet de montrer que les courbes de température entre WFDS et expérience peuvent avoir la même allure pour les essais non moyennés les plus représentatifs.

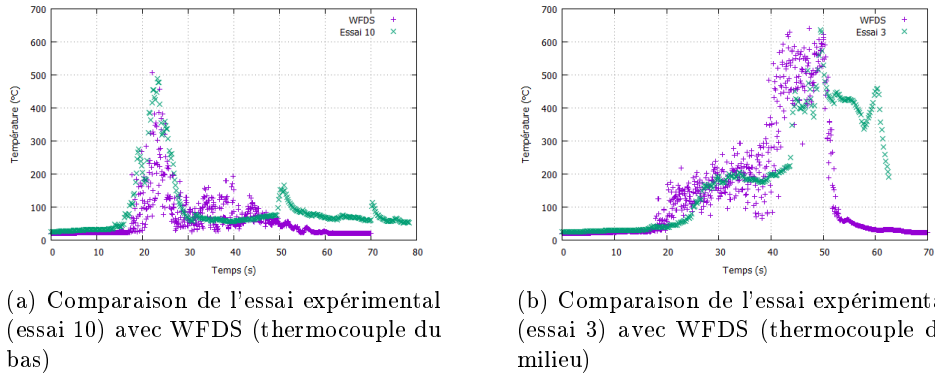


FIGURE 22 : Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de cyprès.

Ces essais démontrent que les courbes de l'expérience peuvent correspondre avec celles de WFDS. Seule la décroissance de la courbe de l'essai 3 varie, les causes de ces différences sont expliquées au-dessus.

### 2.3 Modélisation du fusain

La figure 23 permet de confronter la modélisation et l'expérience en ce qui concerne la perte de masse de la branche de fusain lors du brûlage.

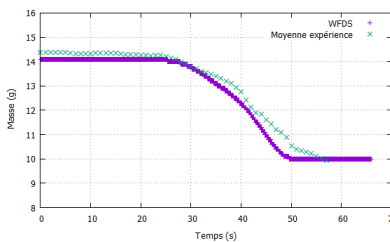


FIGURE 23 : Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du fusain entre WFDS et l'expérience (moyennée sur huit essais).

L'allure des courbes est la même, la décroissance s'effectue au même instant, et les masses finales sont identiques. Il existe un léger écart des courbes lors des décroissances, mais compte tenu de la variabilité des résultats expérimentaux, les résultats sont encourageants. La figure 24 représente l'évolution entre les températures obtenues lors du brûlage et les températures générées par WFDS (thermocouples et capteurs de température placés aux mêmes positions).



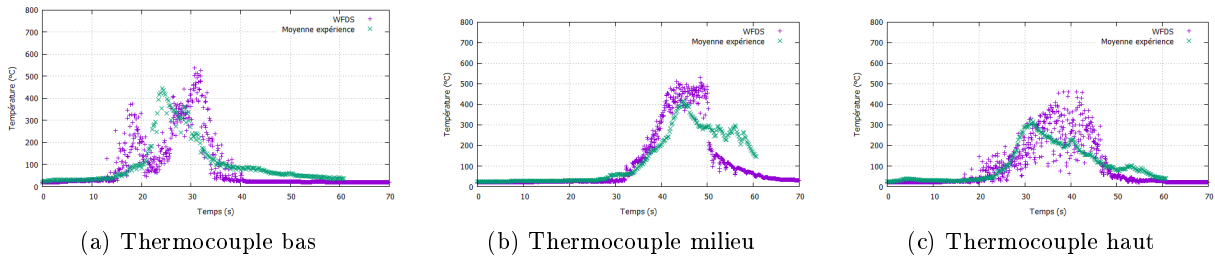


FIGURE 24 : Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de fusain.

La figure 24a met en évidence l'évolution de la température enregistrée par le thermocouple bas par WFDS et la moyenne des expériences. Les courbes sont différentes, il existe deux pics de température selon WFDS contre un seul pour l'expérience. Ces pics sont assez proches en température (WFDS : un pic à  $390^{\circ}C$  et un pic à  $540^{\circ}C$ ; expérience : un pic  $450^{\circ}C$ ), ainsi qu'en temps, mais reste tout de même décalés. Ce décalage peut s'expliquer par la géométrie du fusain construite sous forme de cylindres dans WFDS, et qui peuvent s'enflammer à des temps différents.

Pour le thermocouple du milieu, les courbes sont similaires dans l'ensemble. La courbe de WFDS dessine un plateau à environ  $450^{\circ}C$  de 40 à 50s. Ce plateau n'est pas présent sur la courbe de l'expérimentation, mais il existe cependant un pic de  $450^{\circ}C$  à environ 45s. La décroissance des deux courbes est, quant à elle, différente. Dans l'expérience, les thermocouples étaient souvent très proche de la branche en flamme. Cette décroissance non linéaire est due à la température élevée de la branche à la fin du brûlage captée par le thermocouple.

Enfin, pour le thermocouple du haut (fig 24c), l'évolution des températures est similaire entre la modélisation et l'expérience. WFDS dessine un plateau à environ  $300^{\circ}C$  pendant quasiment 20s, mais avec une disparité entre les valeurs de température assez importante. À 39s, il existe une température de  $50^{\circ}C$  et un autre de  $480^{\circ}C$ . Cette variation est principalement due à la fluctuation de la flamme dans WFDS. La fréquence de mesures étant de  $10 \text{ mesures.s}^{-1}$ , toutes ces fluctuations sont captées par le capteur de température. L'allure de la courbe dessinée par l'expérience dans l'intervalle [30;50]s est assez différente mais reste dans la gamme de valeurs moyennes produites par la modélisation. Le pic de température entre WFDS et l'expérience est différent. La variabilité des essais expérimentaux peut être la cause de ces différences. De façon à mettre en évidence cette variation entre les expériences, la figure 25 présente la comparaison de l'évolution des températures entre WFDS et deux essais (fig 25a), puis entre WFDS et l'essai le plus représentatif de la modélisation. Les courbes de température issues de l'expérience peuvent correspondre à la modélisation, sauf pour le pic de température qui peut varier jusqu'à  $300^{\circ}C$ .

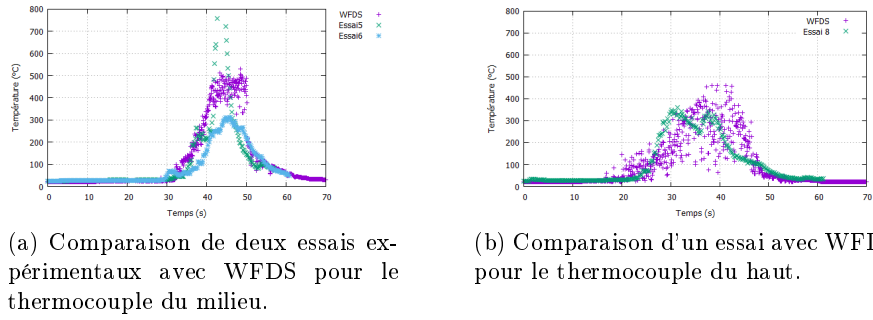


FIGURE 25 : Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de fusain.

La figure 25a montre que les courbes entre expérience et modélisation se rapprochent lors de la croissance, ainsi que de la décroissance. Seul le pic de température diffère. Il y a cependant des cas où la modélisation reflète bien l'essai expérimental (fig 25b). Ce graphique montre que l'essai 8 est plus proche de la modélisation, et que la variabilité des essais a un impact sur les résultats lorsque la moyenne sur les températures est réalisée.

## 2.4 Modélisation du cotonéaster

La figure 26 confronte l'évolution de la perte de masse lors du brûlage de la branche de cotonéaster avec celle de WFDS.

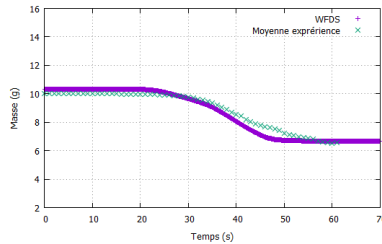


FIGURE 26 : Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage du cotonéaster entre WFDS et l'expérience (moyennée sur 7 essais).

Dans l'ensemble, les deux courbes sont assez proches. La décroissance s'effectue dans les deux cas à environ 20s. La masse finale est identique à 6,5g. Il y a un léger décalage vers les 45s pendant la décroissance, mais comme pour le fusain, compte tenu de la variabilité des résultats expérimentaux, les résultats sont encourageants. La figure 27 représente l'évolution entre les températures moyennées lors du brûlage et les températures générées par WFDS à des positions identiques.

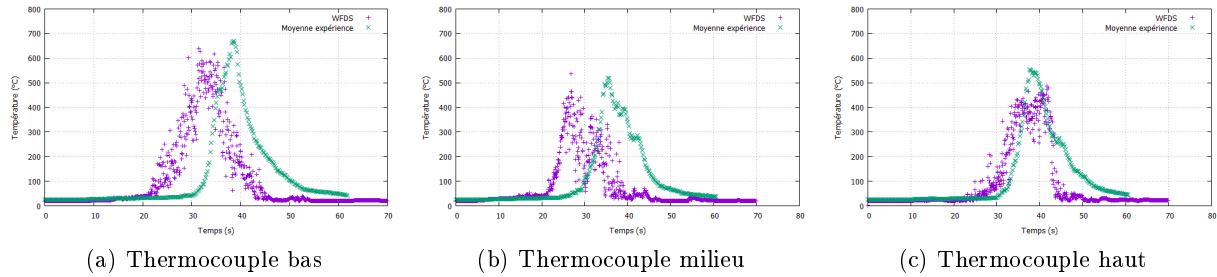


FIGURE 27 : Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de cotonéaster.

La figure 27a met en évidence l'évolution de la température enregistrée par le thermocouple bas par WFDS et la moyenne des expériences. L'évolution des courbes est semblable avec un pic de température de  $669^{\circ}C$  pour l'expérience, contre  $640^{\circ}C$  pour WFDS, soit des températures assez proches en ayant connaissance de la variabilité des expériences d'une part, et la construction de la géométrie du cotonéaster difficile dans WFDS, d'autre part. Cependant, il existe un écart de 10s dans la croissance entre les deux courbes. Par conséquent, le pic, ainsi que la décroissance des courbes sont également décalés. La construction de la géométrie dans WFDS peut être mise en cause. En effet, les feuilles du cotonéaster sont petites et écartées dans la réalité. La modélisation de ce type de géométrie par des cylindres est à la limite du volume élémentaire représentatif dans WFDS et risque de ne pas donner de résultats cohérents.

La figure 27b, pour le thermocouple du milieu, met en évidence des allures de courbes identiques mais décalées de 10s tout comme pour le thermocouple bas (fig 27a). Il existe un décalage entre l'expérience et WFDS en temps pour les deux thermocouples, avec pourtant des courbes de même allure. La différence entre la géométrie dans WFDS et la forme réelle de la branche en est certainement la conséquence.

Enfin, pour le thermocouple haut (fig 27c), les allures de courbe sont quasiment identiques. La décroissance de WFDS est plus rapide, cela s'explique tout comme pour les autres brûlages, par l'inertie des thermocouples, ainsi que par la variabilité entre chaque essai. Le pic de température de l'expérience est supérieur de  $60^{\circ}C$  par rapport à WFDS. Encore une fois, il existe une différence entre WFDS et les essais moyennés. La figure 28 présente la comparaison de l'évolution des températures entre WFDS et deux des essais les plus représentatifs.

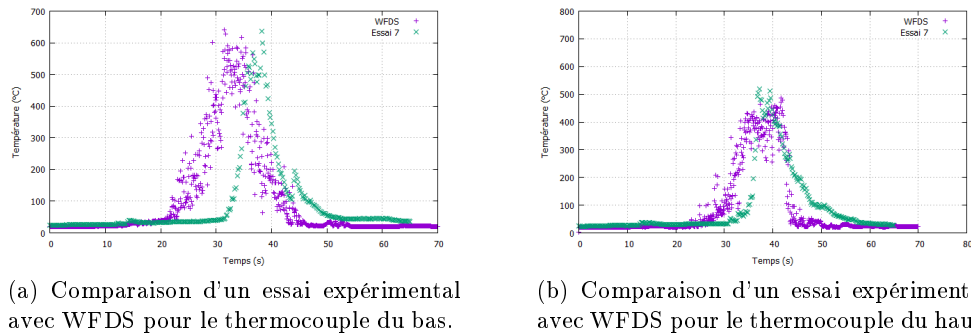


FIGURE 28 : Comparaison des températures de plusieurs essais expérimentaux non moyennés avec WFDS lors du brûlage de la branche de cotonéaster.

La figure 28a montre que les allures des courbes sont très proches, cependant le décalage en temps au niveau des croisances des courbes est toujours présent, comme sur la figure 27a. La différence de forme entre WFDS et l'expérience doit être la raison de cette différence. En effet, dans la réalité, les feuilles de cotonéaster sont petites et très espacées. La modélisation précise sous forme de cylindres est impossible pour ce type de branche, sous peine de se trouver dans une taille de cylindre non représentative d'un volume élémentaire. La figure 28b présente une autre comparaison, pour laquelle la courbe de la modélisation reflète bien l'expérience avec une croissance, un pic de température et une décroissance assez proches. Cette ressemblance peut principalement s'expliquer par le fait que le thermocouple du haut n'est pas réellement dépendant de la forme de la branche, contrairement à la position des thermocouples du milieu et du bas. La modélisation du cotonéaster étant particulièrement compliquée, du fait de la petite taille des feuilles, les capteurs de température dans WFDS (qui sont placés aux mêmes positions dans l'expérience) ne sont donc peut être pas placés au plus près des branches comme dans la réalité.

## 2.5 Modélisation du laurier rose

Le séchage non homogène de cette espèce ornementale a réduit la répétabilité de façon très importante. La figure 29 permet de confronter la modélisation et l'expérience en ce qui concerne la perte de masse de la branche de laurier lors du brûlage.

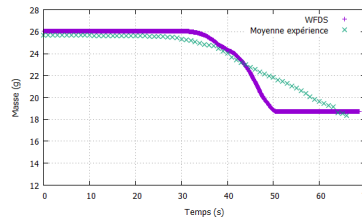


FIGURE 29 : Comparaison de la perte de masse de la branche lors du brûlage de la branche de laurier rose entre WFDS et l'expérience (moyennée sur 3 essais).

Les deux courbes dessinent une partie constante puis décroissante. Cette décroissance débute à 3 secondes d'intervalle, avec cependant une allure de décroissance assez différente. En effet, la décroissance de l'expérience est plus régulière que celle de WFDS. La masse finale est identique à environ 18,5g. La figure 30 représente l'évolution entre les températures moyennées lors du brûlage et les températures générées par WFDS à des positions identiques.

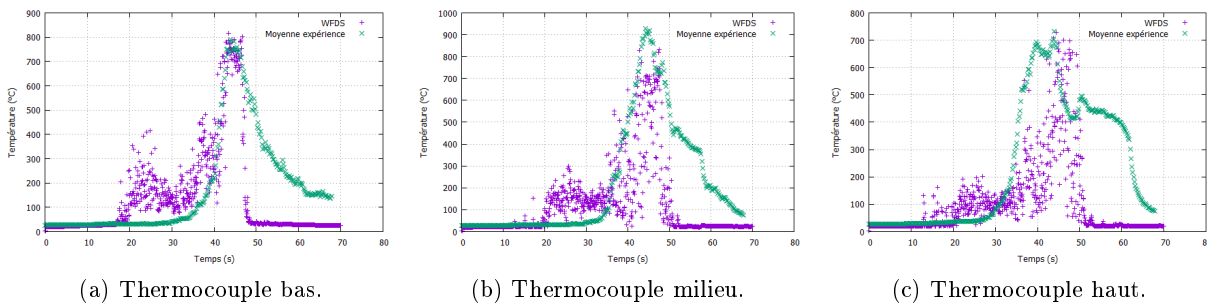


FIGURE 30 : Comparaison des températures générées par la modélisation avec celles enregistrées lors des expériences à trois niveaux différents pour le brûlage de la branche de laurier.

La figure 30a met en évidence l'évolution de la température enregistrée par le thermocouple bas par WFDS et la moyenne des expériences. Les allures des deux courbes sont semblables avec une croissance qui débute pour les deux courbes à 30s. Il existe un pic de température à 25s pour la courbe de WFDS. Ce pic est dû au passage de la flamme sur le capteur de température. Les pics de température sont identiques, et sont tous deux à moins d'une seconde d'écart. La décroissance de la courbe de l'expérience est plus longue à cause de la variabilité des expériences, ainsi que l'inertie des thermocouples.

La figure 30b, pour le thermocouple du milieu, ressemble beaucoup au graphique présenté ci-dessus (fig 30a). La différence est le pic de température qui est de  $927^{\circ}C$  pour l'expérience et de  $827^{\circ}C$  pour la modélisation. Cet écart peut être expliqué par les nombreux paramètres déjà mis en évidence précédemment comme la forme de la branche dans WFDS.

Le thermocouple du haut (fig 30c) montre des courbes de températures différentes. La croissance de la courbe de l'expérience débute avant celle de WFDS à cause de l'ignition plus précoce dans les essais expérimentaux. Le pic de température est identique ( $733^{\circ}C$  pour l'expérience et  $728^{\circ}C$  pour WFDS), et est observé à moins d'une seconde d'écart. Enfin, la décroissance des courbes est différente avec principalement une décroissance beaucoup plus longue pour l'expérience. En observant la figure 29 relative à la perte de masse, la décroissance plus progressive de la courbe obtenue lors de l'expérience montre que la perte de masse est plus longue, et par conséquent, le brûlage est plus long. Les températures générées sont donc normalement plus élevées que pour la modélisation qui présente un temps de brûlage plus bref.

## Quatrième partie

# Discussion

La comparaison entre l'expérience et la modélisation a montré des résultats qui, de façon générale, ne sont pas vraiment concluants lorsque les essais sont moyennés, du fait de la variabilité entre les essais de brûlage. Cependant, lorsque la température d'un seul essai (le plus représentatif) est comparé avec WFDS, les résultats peuvent se montrer plus que positifs. Le peu d'articles publiés sur la comparaison entre WFDS et expérience à l'échelle de la branche ne présentent pas d'essais moyennés, et n'ont pas l'air de prendre le compte de soucis de répétabilité [7][12]. De nombreux points, aussi bien dans la modélisation que dans l'expérience, peuvent avoir une incidence sur les résultats obtenus.

Au niveau des expériences, le séchage des branches dans une étuve fermée et éteinte est une technique perfectible. En effet, le séchage n'est pas homogène en particulier pour la branche de laurier rose. L'achat d'une enceinte climatique, permettant de régler l'humidité et la température de séchage serait pour l'instant la meilleure option. Ensuite, si la litière d'excelsior est un bon combustible, que la masse et le volume sont définis, la répartition de celle-ci lors des brûlages n'est pas complètement homogène, et peut ainsi faire varier le front de flamme, donc l'endroit exact de l'ignition de la branche. Il faut bien sûr ajouter à cela la grande variabilité existante dans l'expérimentation, par exemple le mouvement des branches qui peuvent toucher les thermocouples, et influencer l'enregistrement des températures, et même jouer sur la masse enregistrée par la balance. L'inertie des thermocouples, ou encore la fluctuation de la flamme, qui ne permettent pas à l'instrumentation mise en place de capter de façon optimale les températures souhaitées, sont également des facteurs non négligeables.

Au niveau de la modélisation, le problème majeur (en dehors des contraintes annoncées en début de rapport) est la construction de la géométrie des branches avec seulement des cylindres orientés dans

une seule direction, ce qui limite la précision de la géométrie de la branche. Pour palier ce problème, les branches sont construites avec un certain nombre de cylindres de différentes tailles. Il est donc possible de se demander si la taille d'un cylindre correspond à un volume élémentaire représentatif de branche.

La caméra thermique est utilisée pour connaître l'évolution de la température à l'endroit où l'ignition a lieu. Dans le cadre de ce travail, une technique a été mise en place, mais reste à améliorer, même si la température d'ignition correspond assez bien à la théorie. En effet, certains paramètres doivent être pris en compte tels que la surface d'étude non plane, le mouvement de la branche en particulier pour des végétaux ayant une biomasse faible, l'émissivité de la végétation, l'influence de rayonnement parasite (produit par la litière par exemple).

L'annexe 11 permet de comparer, pour quatre espèces ornementales, les températures maximales, les durées d'inflammation, le temps d'ignition, la perte de masse entre WFDS et l'expérience, ou encore la température d'ignition déterminée par la caméra thermique. Ce tableau montre qu'il existe une différence entre l'expérience et la modélisation, en particulier pour la branche de cyprès, avec, par exemple, un écart de 7s pour le temps d'ignition, une durée d'inflammation de branche 1,8 fois plus importante pour la modélisation, et par conséquent une différence du même ordre de grandeur pour la perte de masse. La différence maximale de température pour le cyprès est de  $200^{\circ}C$  pour le thermocouple du haut. Le cotonéaster et le fusain ont, quant à eux, des valeurs assez proches pour le temps d'ignition, la masse finale, la durée d'inflammation, la perte de masse. Il existe, là aussi, des écart entre les températures avec une différence critique maximale de  $120^{\circ}C$ . Les températures d'ignition enregistrées par la caméra thermique sont autour de  $250^{\circ}C$ , même si des essais supplémentaires sont nécessaires pour le cotonéaster, ainsi que pour le laurier rose, afin de confirmer ces températures d'ignition.

Il est également possible, grâce au tableau de l'annexe 11, de classer de façon assez approximative les quatre espèces étudiées selon leur dangerosité. Ce processus est souvent réalisé par IRSTEA, et permet de classer les principales espèces ornementales présentes dans la région selon leur inflammabilité (capacité d'une branche à brûler) et combustibilité (quantité de combustible de la plante disponible pour brûler) [5]. L'inflammabilité est définie par quatre composantes : l'ignitabilité (capacité à s'enflammer), la sustainabilité (capacité à continuer de brûler une fois enflammée), la combustibilité (capacité à dégager de la chaleur), et la consumabilité (capacité à se consumer au cours du brûlage) [13] [14]. Le tableau 1 permet d'observer le classement établi par l'expérience, ainsi que par WFDS.

Tableau 1 : Classement des espèces selon leur dangerosité.

Composante de l'inflammabilité	Paramètres	Cyprès vert	Fusain	Cotonéaster	Laurier rose
Ignitabilité	Temps Ignition	*	***	****	**
	Température ignition	****	*	**	***
Consumabilité	Pourcentage brûlé	****	**	***	*
	Perte de masse	****	**	*	***
Combustibilité	Température max	***	*	**	****
Sustainabilité	Durée d'inflammation	**	*	****	***

\* Le moins inflammable

\*\*\*\* Le plus inflammable

Les branches étant placées aux mêmes positions par rapport à la litière, l'espèce ayant le temps d'ignition le plus court est la branche présentant l'ignitabilité la plus importante. Les résultats démontrent que la modélisation et l'expérience estiment le cotonéaster comme étant, l'espèce la plus aisément inflammable avec un temps d'ignition à 17s, et inversement pour le cyprès vert l'espèce avec un temps d'ignition compris entre 30 et 37s. La consumabilité peut être déduite en observant la

masse brûlée ainsi que la perte de masse. Les résultats démontrent que la modélisation et l'expérience estiment le cyprès vert comme étant l'espèce qui se consume le plus et le plus vite avec une perte de masse comprise entre  $0,37$  et  $0,68\text{g.s}^{-1}$ , et le cotonéaster l'espèce la moins combustible, avec une perte de masse comprise entre  $0,08$  et  $0,1\text{g.s}^{-1}$ . Le cotonéaster détient également la durée d'inflammation la plus élevée, avec par conséquent, la sustainability la plus importante. Pour terminer, la combustibilité la plus dangereuse est détenue par le laurier rose certainement du fait de la grosseur des feuilles, même si la notion de température maximale est discutable puisqu'elle correspond à une température captée par le thermocouple.

Le classement des espèces selon leur dangerosité est le même pour l'expérience et WFDS. Cela montre que, même si des écarts de valeur existent (annexe 11), le classement de façon générale est identique pour les deux approches. Certains paramètres qui ont permis ce classement peuvent être discutables. Par exemple, le cyprès vert est l'espèce ayant la température d'ignition la plus faible. Cependant, la différence de température entre l'espèce la plus dangereuse et l'espèce la moins dangereuse n'est que de  $12^{\circ}\text{C}$ . De plus, seulement trois essais ont été étudiés avec la caméra thermique pour le laurier rose contre vingt pour le cyprès vert. Il existe donc un soucis de répétabilité en particulier pour le cotonéaster et le laurier rose. Si ce critère est considéré comme étant dangereux pour les quatre espèces compte tenu du faible écart de température ( $12^{\circ}\text{C}$ ), alors le cotonéaster peut être considéré comme l'espèce la plus inflammable avec deux critères d'inflammabilité (ignitabilité et sustainability) pour lesquels l'espèce est la plus dangereuse. Le guide technique publié par IRSTEA considère également le cotonéaster comme étant l'espèce la plus inflammable [5], même si les expériences ne sont pas identiques et que, pour le présent travail, les branches étudiées ne sont pas fraîches.

## Cinquième partie

# Conclusion

Ce stage a eu pour objectif de modéliser la propagation de la flamme de la litière à la première branche d'une haie ornementale avec le logiciel WFDS, initialement prévu pour des feux de forêt à grande échelle. Pour IRSTEA, le but était de savoir si la modélisation avec ce logiciel était possible afin de limiter les expérimentations qui sont longues à mettre en place, et qui mobilisent du personnel.

Pour cela, les données, telles que la température, la perte de masse, ou le temps d'ignition obtenus lors du brûlage de quatre espèces utilisées comme végétation ornementale sont comparés. Les branches de ces quatre espèces ont une géométrie, des formes de feuille, et une biomasse très variées, ce qui permet de couvrir un pannel de végétaux dans la comparaison entre expérience et modélisation. Les contraintes du logiciel ont conduit à de nouvelles expériences, améliorées tout au long du stage avec notamment une balance qui permet d'étudier de façon précise la perte de masse de la branche, ainsi que des thermocouples ayant une inertie et une fréquence de mesure 5 fois plus performante que l'instrumentation utilisée jusqu'à présent. La comparaison entre l'ancienne et la nouvelle instrumentation a montré la nécessité d'avoir du matériel précis pour ce type d'expérience. La modélisation des branches est basée sur des géométries générales de chaque espèce, mais plus précise que les formes basiques utilisées en modélisation. Les résultats montrent une inflammation de la branche lorsque le FMC est inférieur à 25% lors de la modélisation, ce qui est déjà un point positif mais peu réaliste pour reproduire de la végétation fraîche. Dans l'ensemble, au niveau de la modélisation, la perte de masse lors du brûlage correspond à l'expérience, les temps d'ignition peuvent varier, mais la masse finale reste identique. Quant aux températures, il existe de nombreuses différences entre expérience et modélisation, comme discuté précédemment. Cependant lorsque les données

d'un seul essai (le plus performant) sont comparées avec la modélisation, les résultats sont plutôt concluants. Il serait peut être intéressant de doubler le nombre d'essais, ce qui demanderait plus de temps, mais permettrait peut être d'avoir une moyenne sur les essais plus proche de la modélisation. Même si certaines tendances de courbe sont différentes, comme pour le cyprès vert par exemple, le classement de l'inflammabilité des quatre espèces étudiées est le même pour WFDS et pour l'expérience. Encore plus positif, ce classement correspond au classement établi par IRSTEA lors de l'évaluation de l'inflammabilité de la végétation ornementale [5]. Cela signifie que, malgré les différences sur certains résultats, WFDS semble concluant si un classement des espèces ornementales est recherché.

Le problème majeur dans WFDS, comme souvent dans la modélisation de feux de forêt, est le contenu hydrique ici limité à 20%. L'équipe EMR a réalisé des expériences montrant que le FMC critique dans une végétation ornementale, en été, est de 60% au minimum pour certaines espèces, au delà, la plante est considérée comme morte. Cela signifie que cette modélisation ne reflète pas la réalité, même en cas de grande sécheresse. Le logiciel OpenFoam serait la solution afin de palier cette contrainte majeure pour un FMC supérieur à 25%, mais le travail demande de solides connaissances dans la programmation, ainsi que dans les équations mises en jeu.



## Sixième partie

# Annexes



Annexe 0 : Mise en étuve des échantillons.



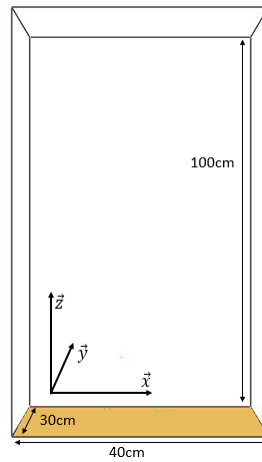
Annexe 1 : Comparaison des branches avant et après calibrage.

Annexe 2 : Dimensions et masse des espèces étudiées.

Espèce	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Épaisseur (cm)	Masse (g)
Cyprès	22	13	4	18
Fusain	29	18	8	14,2
Cotoneaster	34	25	6	10,4
Laurier rose	28,5	19	5,5	26,4

Annexe 3 : Paramètres importants enregistrés et calculés.

Paramètres	Source
<b>Préparation de l'expérience</b>	
Surface des feuilles	Mesurée
Volume des feuilles	Mesuré
Masse volumique des feuilles	Calculée
Rapport surface volume des feuilles	Calculé
<b>Avant brûlage</b>	
Masse de la litière	Pesée (15g)
FMC	Calculé
Volume de la branche	Mesuré
Masse de la branche avant brûlage	Pesée
Bulk density	Calculée
<b>Pendant le brûlage</b>	
Positions des trois thermocouples et de la branche	Mesurées
<b>Pendant le brûlage</b>	
Temps d'aplomb, d'ignition, de fin de brûlage	Chronométrés
Température des thermocouples	Enregistrée
Perte de masse de la branche	Enregistrée



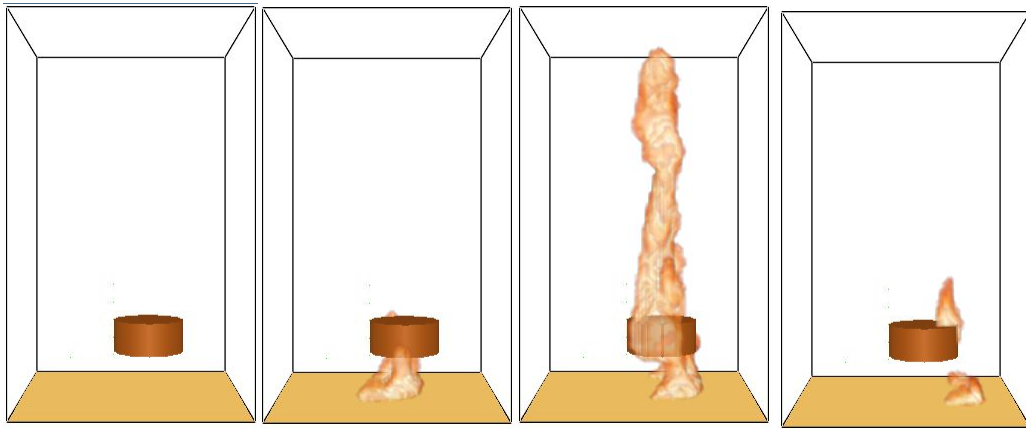
Annexe 4 : Domaine dans lequel les modélisations des branches sont réalisées.

Annexe 5 : Dimensions des mailles et temps de calcul pour l'étude de la convergence.

Maillage	Maille selon $\vec{x}$ (cm)	Maille selon $\vec{y}$ (cm)	Maille selon $\vec{z}$ (cm)	Nombre de maille total	Temps de calcul (1 processeur AMD)
Maillage 0,5cm	0,5	0,5	0,5	1440000	5,5j
Maillage 1cm	1	1	1	180000	8h
Maillage 2cm	2	2	2	22500	25min
Maillage choisi	1	0,5	1	360000	22h

Annexe 6 : Caractéristiques de la litière d'excelsior.

Paramètre (unités)	Paramètre dans WFDS (unités)	Valeur	Source
Température initiale de la branche (°C)	VEG_INITIAL_TEMPERATURE	20	Défaut
Rapport surface volume au niveau de la feuille ( $m^{-1}$ )	VEG_SV	8810	Calculée
Humidité de la branche (g/g)	VEG_MOISTURE	0,06	Calculée
Fraction de charbon (g/g)	VEG_CHAR_FRACTION	0,25	Défaut
Coefficient de traînée (-)	VEG_DRAG_COEFFICIENT	0,375	[7][12]
Masse volumique de la feuille ( $kg/m^3$ )	VEG_DENSITY	633,83	Calculée
Densité apparente ( $kg/m^3$ )	VEG_BULK_DENSITY	8,333	Calculée
Taux de végétation brûlée ( $kg/m^3s$ )	VEG_BURNING_RATE_MAX	1	Calculée
Taux de déshydratation de la végétation ( $kg/m^3s$ )	VEG_DESHYDRATATION_RATE_MAX	0,4	Défaut



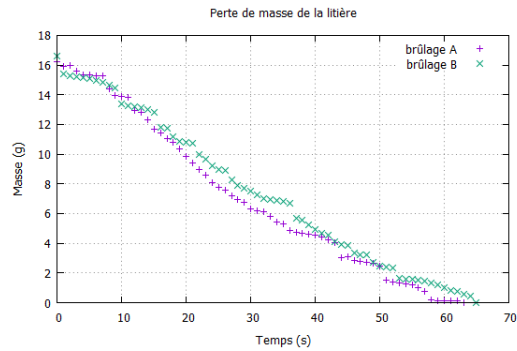
Annexe 7 : Modélisation du cyprès sous forme d'un simple cylindre.

Annexe 8 : Position des thermocouples suivant les axes  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ .

Espèce	Thermocouple bas			Thermocouple milieu			Thermocouple haut		
	$\vec{x}$	$\vec{y}$	$\vec{z}$	$\vec{x}$	$\vec{y}$	$\vec{z}$	$\vec{x}$	$\vec{y}$	$\vec{z}$
Cyprès	19,5	11	17	21	14	19	25	13	25
Fusain	15	13,5	15	22,5	15	21	21	15	31
Cotoneaster	23	10	16	22,5	19	17	24	13,5	21
Laurier rose	20	13	21,5	21,5	15,5	22	21,5	17	37

### Annexe 9 : Caractéristiques des branches dans WFDS.

Paramètre (unités)	Cyprès	Fusain	Cotonéaster	Laurier	Source
VEG_INITIAL_TEMPERATURE ( $^{\circ}C$ )	20	20	20	20	Défaut
VEG_SV ( $m^{-1}$ )	3670	4720	3655	2278	Calculée
VEG_MOISTURE (g/g)	0,18	0,2	0,1	0,18	Calculée
VEG_CHAR_FRACTION (g/g)	0,3	0,3	0,3	0,3	Estimation
VEG_DRAG_COEFFICIENT (-)	0,375	0,375	0,375	0,375	[7][12]
VEG_DENSITY ( $kg/m^3$ )	1251,23	903,06	329,26	933	Calculée
VEG_BULK_DENSITY ( $kg/m^3$ )	9	5,36	2,8	7,3	Calculée
VEG_BURNING_RATE_MAX ( $kg/m^3s$ )	0,64	0,23	0,07	0,9	Calculée
VEG_DESHYDRATATION_RATE_MAX ( $kg/m^3s$ )	0,4	0,4	0,4	0,4	Défaut



Annexe 10 : Comparaison de la perte de masse de la litière pour les deux brûlages effectués.

Annexe 11 : Comparaison des paramètres enregistrés lors des brûlages avec ceux issus de la modélisation.

Composante de l'inflammation	Paramètres		Cyprés	Fusain	Cotonéaster	Laurier rose
Ignitabilité*	Temps ignition de la branche (s)	Expérience moyenne	30	26	17	28
		Modélisation	37	26	17	31
Consumabilité*	Masse finale de la branche après brûlage (g)	Expérience moyenne	~ 6	10	6,6	18,3
		Modélisation	6	10	6,65	18,6
Sustainabilité*	Durée inflammation de la branche (s)	Expérience moyenne	33	28	44	35
		Modélisation	18	24	34	19
Consumabilité*	Perte de masse de la branche ( $g.s^{-1}$ )	Expérience moyenne	0,37	0,18	0,08	0,21
		Modélisation	0,68	0,14	0,1	0,39
Ignitabilité*	Température ignition ( $^{\circ}C$ )	Caméra thermique	248,8	263,7	261	260,5
Combustibilité*	Température max thermocouple bas( $^{\circ}C$ )	Expérience moyenne	504	445	669	789
		Modélisation	507	527	640	817
Combustibilité*	Température max thermocouple milieu( $^{\circ}C$ )	Expérience moyenne	627	416	520	927
		Modélisation	643	531	536	827
Combustibilité*	Température max thermocouple haut( $^{\circ}C$ )	Expérience moyenne	631	323	553	733
		Modélisation	844	459	487	728

\* de l'anglais Ignitability, Sustainability, Combustibility, Consumability [13] et [14]

## Références

- [1] Ganteaume A. and Long-Fournel M. Driving factors in fire density con spatially vary at the local scale in south-eastern france. *International Journal of Wildland Fire*, 24 :650–664, 2015.
- [2] Ganteaume A., Bertin A., Audouard M., Guerra F., Lopez J.M., Morge D., and Travaglini C. How fire propagates from dead surface fuel to the first branch in ornamental vegetation of WUI. In *5th International Fire Behaviour and Fuel Conference*, April 11-15 2016.
- [3] Ganteaume A., M. Jappiot, Lampin C., Guijarro M., and Hernando C. Flammability of some ornamental species in wildland-urban interfaces in southeastern france : Laboratory assessment at particle level. *Environmental Management*, 52(2) :467–480, 2013b.
- [4] Ganteaume A., M. Jappiot, and Lampin C. Assessing thhe flammability of surface fuels beneath ornamental vegetation in wildland–urban interfaces in provence (south-eastern france). *International Journal of Wildland Fire*, 22(3) :333–342, 2013a.
- [5] Ganteaume A. *Le risque incendie dans les interfaces habitat-forêt : évaluer l'inflammabilité de la végétation ornementale*. 2016.
- [6] Grishin A. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Publishing house of the Tomsk state university, 1997.
- [7] Mell W., Maranghides A., McDermott R., and Manzello Samuel L. Numerical simulation and experiments of burning douglas fire trees. *Combustion and Flame*, 156(10) :2023–2041, 2009.
- [8] Morvan D. and Dupuy J.L. Modeling of fire spread through o forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and flame*, 127(1) :1981–1994, 2001.
- [9] Babrauskas V. Ignition of wood : a review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*, 12(3) :163–189, 2002.
- [10] Magnussen Bjørn F. and Hjertager Bjørn H. *On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*, volume 16. 1977.
- [11] Lamorlette A. and Candelier F. Thremal behavior of solid particles at ignition : Theoretical limit between thermally thick and thin solids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82 :117–122, 2015.
- [12] Overholt KJ., Kurzawski AJ., Cabrera J., Koopersmith M., and Ezekoye O.A. Fire behavior and heat fluxes for lab-scale burning of little bluestem grass. *Fire Safety Journal*, 67 :70–81, 2014.
- [13] Anderson HE. Forest fuel ignitibility. *Fire technology*, 6(4) :312–319, 1970.
- [14] Martin RE., Gordon DA., Lee D., Molina DM., Schroeder RA., Sapsis DB., and Stephens S. Assessing th flammability of domestic and wildland vegetation.