



**Interreg**



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional



INTERMED

# **Livrable T1.3.2 :**

## **Rapport sur les grandeurs thermiques, la production et la circulation des fumées au voisinage d'une construction faisant face à un incendie progressant dans une zone aménagée**



La cooperazione al cuore del Mediterraneo  
La coopération au coeur de la Méditerranée

**Rapport réalisé par l'Université de Corse et l'INRAE, juin 2022**  
**Rédaction : Virginie TIHAY-FELICELLI et Anne GANTEAUME**

## Table des matières

Introduction.....	4
1 Combustion de haies de ciste.....	4
1.1 Dispositif expérimental .....	4
1.2 Caractérisation des combustibles .....	7
1.3 Sollicitations thermiques engendrées par la combustion des haies de cistes.....	10
1.3.1 Phénoménologie et géométrie des flammes .....	10
1.3.2 Flux reçus à 3 m des haies .....	11
2 Reconstitution d'un feu de végétation impactant une construction.....	13
2.1 Cas des haies .....	13
2.1.1 Dispositif expérimental.....	13
2.1.2 Impact du feu sur la construction.....	14
2.2 Cas avec des arbres .....	18
2.2.1 Dispositif expérimental.....	18
2.2.2 Combustion des végétaux et impact sur la construction .....	19
2.2.3 Fumées.....	23
3 Préconisations pour l'aménagement paysager et le choix des matériaux.....	23
Références .....	25

## Introduction

Du fait du changement climatique et de l'expansion des zones rurales, la gravité [1] et la fréquence [2] des incendies de forêt a considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Le nombre de structures détruites chaque année est ainsi passé d'environ 900 dans les années 1990 à près de 3000 dans les années 2000 [1]. Cette augmentation des dommages matériels observés est notamment due à l'accroissement de la densité des habitations individuelles en périphérie des grandes villes. Ces zones où l'urbanisation et les espaces naturels se rencontrent, appelées « interfaces forêt/habitat », sont des espaces sensibles où le risque incendie est préoccupant en raison d'une augmentation des sources d'inflammation et de la vulnérabilité des infrastructures.

La recherche scientifique sur la sécurité incendie a consacré beaucoup d'efforts pour comprendre la dynamique des incendies confinés (feux de bâtiments). Cependant, la recherche sur les incendies de végétation et sur la manière d'atténuer potentiellement la perte de structures est beaucoup moins développée. Il reste ainsi encore de nombreuses zones d'ombre dans la compréhension du potentiel d'inflammation des structures lors d'incendies dans les interfaces forêt/habitat. Pour diminuer la vulnérabilité des constructions dans ces zones, la technique la plus utilisée consiste à diminuer la charge de combustible afin d'affaiblir la puissance des incendies à l'approche des constructions et de ralentir leur propagation. En France, cette réduction de combustible est imposée dans les arrêtés de débroussaillage. Cependant, les prescriptions ont été définies à dire d'experts sans fondements scientifiques. Afin d'apporter des données sur la vulnérabilité des constructions face à un incendie de végétation, l'Université de Corse a décidé de travailler d'une part sur :

- La caractérisation thermique des sollicitations thermiques engendrées par la combustion de haie de végétaux. Ces éléments ont en effet été choisis car ils constituent des vecteurs de propagation des incendies aux interfaces forêt / habitat [3].
- La réalisation de préconisations pour l'aménagement paysager et le choix des matériaux pour réduire la vulnérabilité des constructions aux interfaces forêt/habitat.

Ce livrable présente les résultats expérimentaux obtenus lors de ces travaux. La première partie présente la combustion de haie de ciste seule. La deuxième partie décrit quant à elle les expériences réalisées sur la plateforme d'EXpérimentations, de sensibiLisation et de fOrmation aux Risques Incendies dans les Interfaces (EXPLORII) pour reconstituer un feu de végétation impactant une construction. Enfin, la troisième partie donne des préconisations sur les distances entre les constructions et la végétation ainsi que sur les matériaux à utiliser sur les habitations.

## 1 Combustion de haies de ciste

### 1.1 Dispositif expérimental

La caractérisation des sollicitations thermiques engendrées par la combustion de végétaux a débuté par des feux de haies de cistes afin de mesurer la densité de flux radiatif à 3 m du front de flamme. La distance de 3 m a été choisie car elle correspond à la distance minimale à laquelle la végétation peut être présente suivant les arrêtés de débroussaillage en vigueur en France. Afin de permettre une bonne reproductibilité entre les tests, la haie a été reconstituée avec des branches de ciste de Montpellier placées verticalement dans des cages en treillis soudés en veillant à conserver une charge de combustible de  $8 \text{ kg/m}^3$  correspondant à la charge naturelle d'arbustes de ciste [4]. Pour permettre à la haie de s'enflammer, une litière de frisure de bois de 2 m de large a été ajoutée devant la haie sur toute sa longueur avec une charge de  $1 \text{ kg/m}^2$ . Des fluxmètres radiatifs (MEDTHERM 64P-02-24T) et totaux (MEDTHERM GTW-10-32-485A) refroidis ont été positionnés à 3 m de la haie sur des supports et protégés par des plaques de silicate de calcium. Pour observer la propagation du feu et la géométrie du front de flamme, des appareils photos de type CANON 80D équipées de capteur APSC

couplés à des optiques CANON de distance focale 18mm ont été disposées autour du dispositif. Un total de 7 expériences a été réalisé : 2 tests avec une haie de 6 m de long x 1 m de large x 1 m de haut, 1 test avec une haie de 6 m de long x 1 m de large x 2 m de haut et 4 tests avec une haie de 4 m de long x 1 m de large x 1 m de haut (Figure 1). La disposition des différents appareils de mesure est donnée sur la Figure 2 pour les haies de 6 m et sur la Figure 3. Les lettres R et T indiquent la position des fluxmètres radiatifs et totaux respectivement.



Figure 1 : Photographies des configurations de haie a) de 6 m de large ; (b) de 4 m de large.

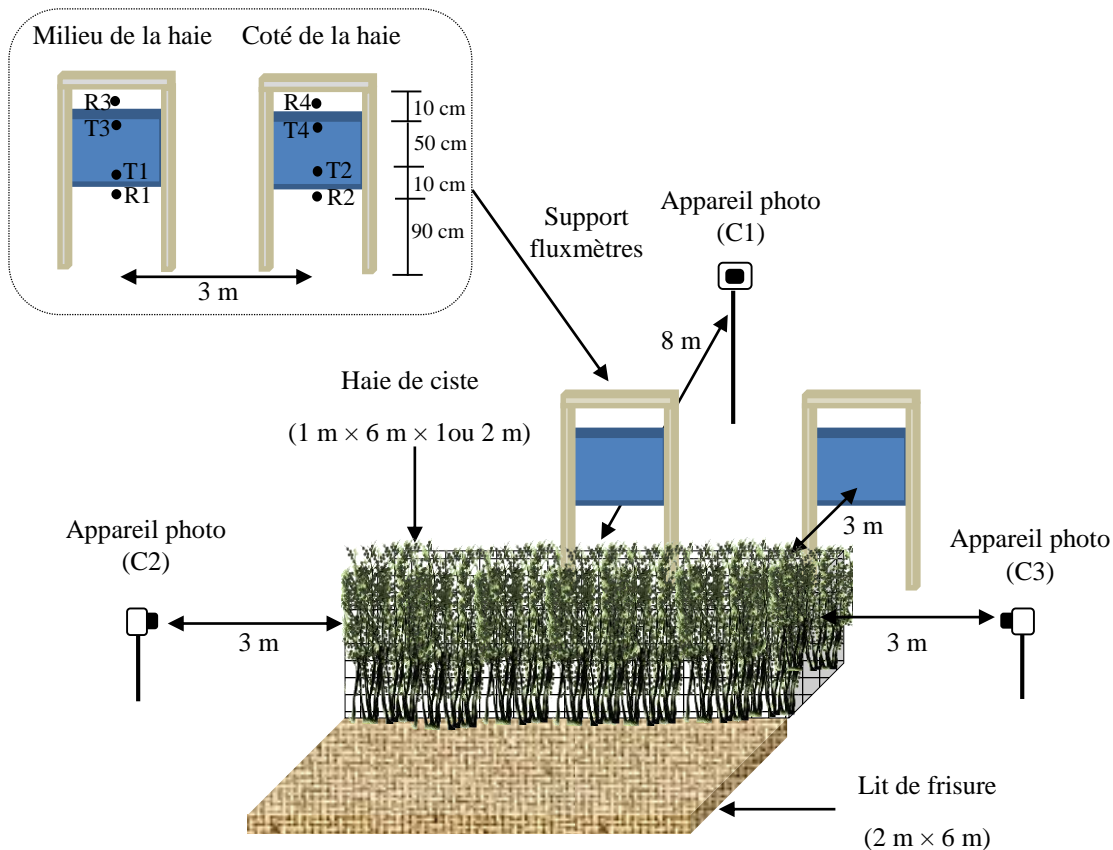


Figure 2 : Position des capteurs pour les tests avec des haies de ciste de 6 m de large.

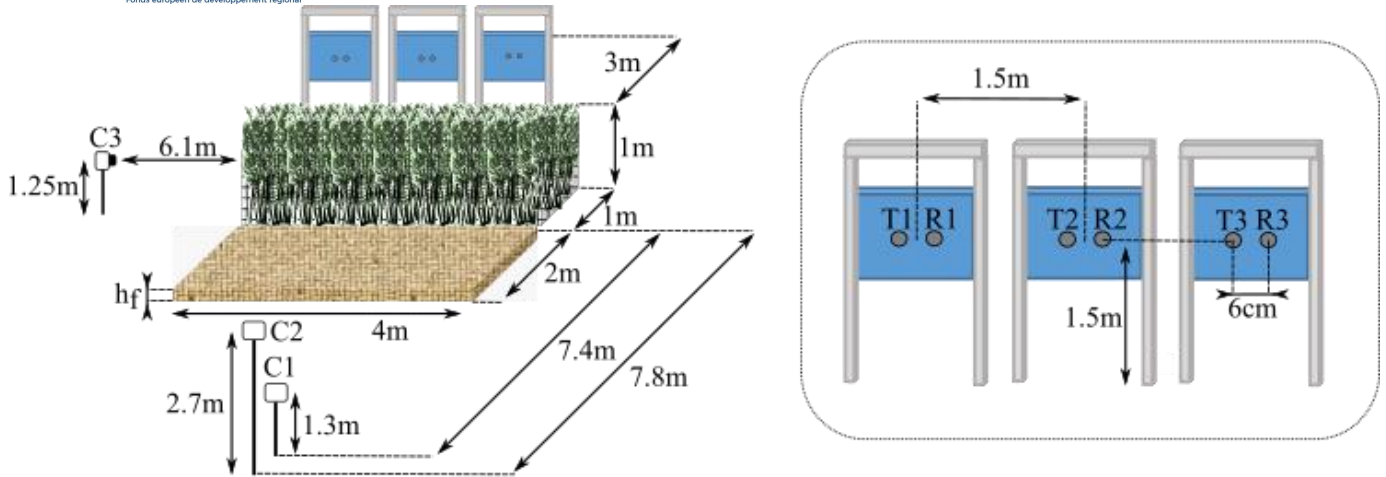


Figure 3 : Position des capteurs pour les tests avec des haies de ciste de 4 m de large.

Pour chaque expérience, les conditions ambiantes (température et humidité relative de l'air, direction et vitesse du vent) ainsi que la teneur en eau des végétaux ont été mesurées. La teneur en eau foliaire des branches de ciste était de 11,3 % et celle de la frisure de 6,8 %. Les conditions hygrométriques (température et humidité de l'air) ont été mesurées avant chaque allumage à l'aide d'un hygromètre ROTRONIC HygroPalm (HP22-A) équipé d'une sonde d'humidité et de température ROTRONIC HygroClip2-S (précision de  $\pm 0.8\%$  pour l'humidité relative et de  $\pm 0.1$  K pour la température extérieure). Pour la mesure du vent incident, un anémomètre GILL INSTRUMENT Wind Sonic a été positionné à de 2,5 m de haut sur le terrain d'essais à une distance de 15 m du dispositif expérimental pour ne pas perturber le flux d'air lors des essais. Le constructeur annonce une précision de  $\pm 2\%$  pour la vitesse et de  $\pm 2^\circ$  pour la direction du vent avec un temps de réponse de 0,25 s. La fréquence d'échantillonnage pour la mesure du vent a été fixée à 1 Hz. Le Tableau 1 présente l'ensemble des statistiques moyennes pour les essais réalisées avec les haies. La direction  $0^\circ$  correspond à l'axe du dispositif. L'intensité de turbulence  $I$  a été définie par :

$$I = \frac{u_{RMS}}{\bar{U}} \quad (1)$$

Avec  $u_{RMS}$  la fluctuation moyenne et  $\bar{U}$  la moyenne du signal de vitesse enregistré par l'anémomètre durant l'essai.

Tableau 1 : Statistiques atmosphériques moyennes pour les essais effectués avec des haies seules.

Essai	Dimension de la haie (m x m x m)	Vitesse U (m/s)	Direction $\theta$ ( $^\circ$ )	Intensité de turbulence (%)	Température de l'air ( $^\circ$ C)	Humidité relative de l'air (%)
1	6 x 1 x 1	2,34 $\pm$ 0.73	-12 $\pm$ 33	31	16,6	37,9
2	6 x 1 x 1	2,47 $\pm$ 1.3	47 $\pm$ 51	54	18,1	37,5
3	6 x 2 x 1	2,06 $\pm$ 0.73	44 $\pm$ 43	35	15,2	38,4
4	4 x 1 x 1	3,07 $\pm$ 1,07	-11,8 $\pm$ 26,0	35	38	26,15
5	4 x 1 x 1	3,53 $\pm$ 1,33	-28,6 $\pm$ 28,9	38	36	28,19
6	4 x 1 x 1	2,36 $\pm$ 1,16	-16,7 $\pm$ 28,5	49	33	28,64
7	4 x 1 x 1	2,10 $\pm$ 1,16	7,3 $\pm$ 42,6	55	48	28,08

A partir des photographies prises de côté, la géométrie des flammes a été déterminées par traitement d'images. Pour cela, nous nous sommes intéressés à la hauteur de flamme  $H_F$  (m), la longueur de flamme  $L_F$  (m),

l'avancée du front de flamme  $A_v$  (m) et l'angle d'inclinaison de la flamme  $\beta$  ( $^\circ$ ). Ces grandeurs sont définies par la Figure 4.

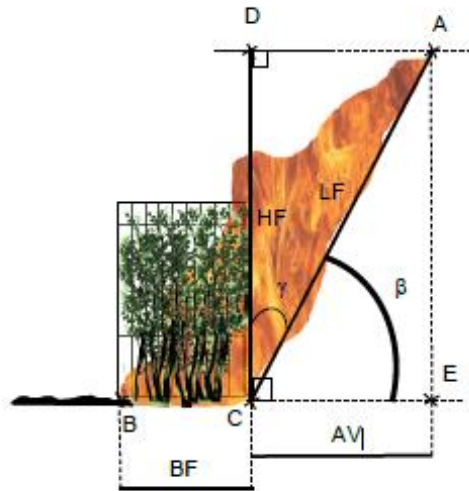


Figure 4 : Définition des grandeurs géométriques du front de flamme pour le brûlage d'une haie.

## 1.2 Caractérisation des combustibles

Une caractérisation des haies de ciste a été réalisée en laboratoire à l'aide d'une versions réduite de la haie ( $L \times l \times H = 0.46 \times 0.38 \times 1 \text{ m}^3$ ) en gardant une charge volumique apparente de  $8 \text{ kg/m}^3$ . La haie a été subdivisée en 8 étages suivant la hauteur ( $Z_1 \rightarrow Z_8$ ) de hauteur 12,5 cm. Pour chaque étage, le combustible a été divisé en 6 familles de particules conformément aux travaux réalisés par Morandini et coll. [4] : les fleurs, les feuilles, les brindilles de diamètre compris entre 0 et 2 mm, les brindilles de diamètre compris entre 2 et 4 mm, les brindilles de diamètre compris entre 4 et 6 mm et les brindilles de diamètre supérieur à 6 mm.

Pour chaque étage  $Z_i$  considérée, la masse de chaque classe de particule a été mesurée à l'aide d'une balance de laboratoire. La teneur en eau a également été mesurée par pesée d'échantillon avant et après mise à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 48 heures. La présente la distribution spatiale en pourcentage massique de chaque classe de particule pour chaque de la haie. Celle-ci peut être décomposée en trois parties distinctes : inférieure, intermédiaire et supérieure. La partie supérieure est majoritairement composée de feuilles, de fleurs et de brindilles de faibles diamètres. A l'inverse la partie inférieure contient une majorité de particule de diamètres supérieurs à 4 mm. Entre ces deux zones, la partie intermédiaire est une zone de transition où l'on retrouve toutes les classes de particules dans différentes proportions. A partir de ces données, la masse volumique apparente de chaque famille de particules a été calculée pour les différents étages (Tableau 2). Etant donné qu'une litière de feuille s'est formée lors de la caractérisation, nous avons ajouté une étage appelée litière avec une épaisseur de 1 mm.

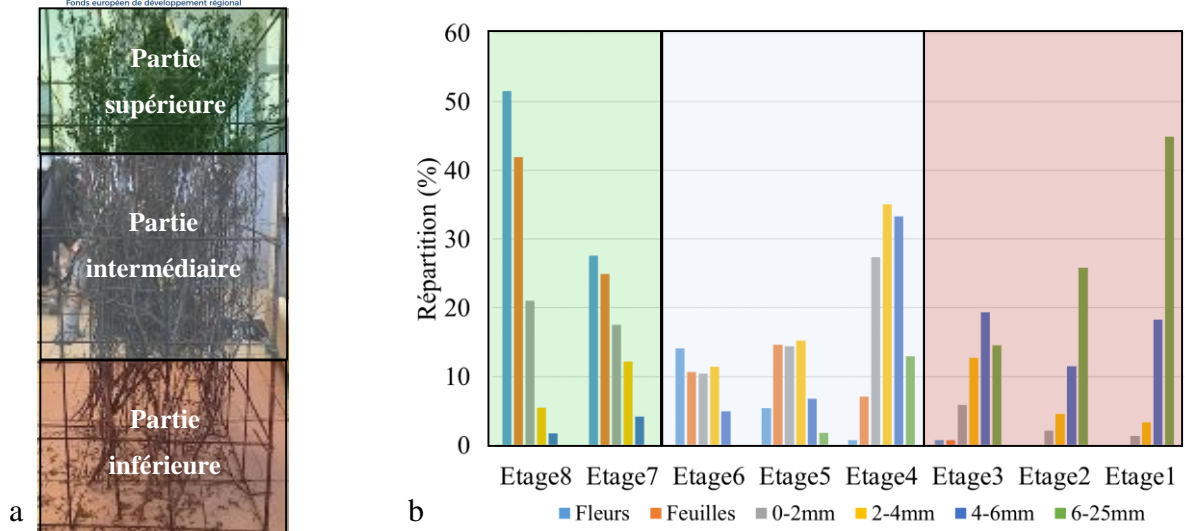


Figure 5 : Répartition spatiale des différentes classes de particules dans la haie reconstituée de ciste.

La masse volumique des différentes classes de particules et leurs rapports surface/volume ont été déterminés en effectuant une étude statistique sur 100 échantillons de chaque famille de particules. Les fleurs ont été assimilées à des sphères de diamètre  $d$ . Les feuilles ont été représentées par à des parallélépipèdes rectangles d'épaisseur  $e$ , de longueur  $L$  et de largeur  $l$ . Les brindilles ont été assimilées à des cylindres droits de diamètre  $d$  et de hauteur  $h$ . Les taux de résidu charbonneux et de cendres ainsi que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) ont été mesurés par le laboratoire SOCOR. Le taux de résidu charbonneux a été déterminé par analyse thermogravimétrique (ATG) sous atmosphère inerte (diazote) où chaque échantillon a été soumis à une vitesse de chauffage de 20°C/min entre 30°C et 800°C. Les taux de cendres ont été obtenus par calcination à 550°C. Les PCI ont été mesurés selon la norme NF EN 18 125. Le Tableau 3 présente les résultats obtenus. Les valeurs obtenues sont proches de celles données par Morandini et coll. [4]. Les variations observées peuvent provenir d'une part de la saison de récolte. En effet, Morandini et coll. [4] ont récoltés des arbustes de ciste durant la saison d'été. Ces derniers ne possédaient donc plus de fleurs. D'autre part, la caractérisation faite par Morandini et coll. [4] a été effectuée sur un houppier naturel vivant et non sur des branches coupées ce qui a tendance à accroître les particules de grandes tailles.

Tableau 2 : Masse volumique apparente ( $\text{kg/m}^3$ ) par étage et par famille de particules

Type de particules	Litière	Etage 1	Etage 2	Etage 3	Etage 4	Etage 5	Etage 6	Etage 7	Etage 8	
<b>Feuilles</b>	148,375	0	0	0,046	0,427	0,881	0,647	1,504	2,539	
<b>Fleurs</b>	0	0	0	0,003	0,003	0,023	0,061	0,119	0,222	
<b>Brindilles</b>	< 2 mm	0	0,178	0,273	0,767	3,593	1,893	1,371	2,306	2,771
	[2;4] mm	0	0,483	0,662	1,865	5,145	2,233	1,676	1,788	0,792
	[4;6] mm	0	2,303	1,444	2,447	4,222	0,853	0,627	0,527	0,216
	> 6mm	0	5,142	2,964	1,672	1,485	0,21	0	0	0



Tableau 3 : Propriétés thermophysiques des différentes familles de particules

Type de particules	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ratio surface/volume $\sigma$ (m <sup>-1</sup> )	Taux de résidu charbonneux $\chi_{char}$ (-)	Taux de cendre à 550°C $\chi_{ash}$ (-)	PCI (kJ/kg)	PCI de la phase gazeuse (kJ/kg)	
Feuilles	241,57	2544,01	0,316	0,032	17949	11115	
Fleurs	550,42	1502,95	0,285	0,058	19548	14289	
Brindilles	< 2 mm	779,06	3425,45	0,281	0,039	18497	12930
	[2 ; 4] mm	865,19	1526,49	0,250	0,021	17927	12989
	[4 ; 6] mm	909,67	905,84	0,238	0,024	17991	13384
	> 6 mm	895,27	612,47	0,250	0,034	18062	13169

Pour compléter, une analyse élémentaire a été réalisée par le laboratoire SOCOR suivant la norme NF EN ISO 16948 (Tableau 4). Il existe peu de différence de composition entre les différentes familles de particules considérées. Par conséquent, nous avons déterminé une formulation moyenne pour le combustible solide de type  $C_xH_yO_z$  dont les coefficients stœchiométriques sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 4 : Analyse élémentaire des différentes classes de particules pour le ciste de Montpellier

Composés	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	
Feuilles	52,0	6,2	33,7	1,7	
Fleurs	50,0	5,6	40,1	0,8	
Brindilles	< 2 mm	51,1	5,8	39,3	0,7
	[2 ; 4] mm	50,1	5,9	41,4	0,4
	[4 ; 6] mm	49,6	5,7	41,7	0,5
	> 6mm	50,1	5,8	40,2	0,4

Tableau 5 : Composition chimique moyenne pour la haie de ciste de Montpellier

C (mol)	H (mol)	O (mol)	N (mol)
4,20	5,83	2,48	0,04

Comme pour la haie, les propriétés de la frisure de pin ont été déterminées. Le Tableau 6 et le Tableau 7 donnent les valeurs obtenues.

Tableau 6 : Propriétés de la frisure de bois.

Masse volumique du matériau $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente $\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Rapport surface/volume $\sigma$ (m <sup>-1</sup> )	Taux de résidu charbonneux $\chi_{char}$ (-)	Taux de cendre à 550°C $\chi_{ash}$ (-)	PCI (kJ/kg)
446	4,29	10269	18,51	0,5	18966

Tableau 7 : Analyse élémentaire de la frisure de pin

C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
51,4	6,2	41,7	0,2

## 1.3 Sollicitations thermiques engendrées par la combustion des haies de cistes

### 1.3.1 Phénoménologie et géométrie des flammes

Les différentes phases de combustion des haies de ciste sont présentées par la Figure 6. Le Tableau 8 présente les grandeurs d'intérêt observées lors de la combustion de ces haies. Les expériences débutent par la propagation du front de feu dans la frisure de bois. L'allumage de la haie a lieu entre 10 s et 21 s ce qui correspond à des vitesses de propagation moyennes comprises entre 9,1 et 20,0 cm/s. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de de Cheney et coll. [5] et Cheney et Gould [6] réalisés sur des parcelles d'herbes avec des hauteurs de combustibles de 0,1 à 0,6 m (vitesse de propagation entre 2 et 200 cm/s). Les différences observées entre les essais sont principalement dues aux caractéristiques du vent lors des expériences (Tableau 1). L'allumage de la haie se produit par contact du front de flamme avec les branches de ciste. La position horizontale de l'allumage diffère suivant les essais principalement à cause du vent. Le front de feu se propage ensuite au sein de la haie. Les particules les plus fines se trouvant dans la partie haute de la haie, cette zone est consommée en premier suivie par la partie basse où sont concentrées les particules les plus épaisses. Le temps de résidence de flamme au sein de la haie varie entre 80 et 109 s. Les flammes ont atteint entre 3,0 et 4,0 m pour les haies de 1 m de haut et ont dépassé 4,1 m pour la haie de 2 m de haut. Ces valeurs sont en accord avec les données trouvées dans la littérature pour la combustion de végétaux à l'échelle du terrain [7-10]. En ce qui concerne l'avancée des flammes par rapport à la haie, nous avons noté des valeurs supérieures à 3,3 m. Une fois les flammes éteintes, on observe une phase de combustion lente. A l'issue des expériences, la quasi-totalité du combustible est consommée.

Tableau 8 : Grandeurs caractéristiques de la combustion des haies

Essai n°	Temps de propagation (s)	Temps de résidence des flammes (s)	Vitesse de propagation (cm/s)	$H_F$ max (m)	$L_F$ max (m)	$A_V$ max (m)	$\beta$ moyen (°)
1	10	80	20,0	3,6	4,7	3,3	45,7° (±11,5)
2	19	89	10,5	3,8	5	3,4	55,0° (±15,2)
3	21	109	9,5	> 4,1	> 4,9	> 3,0	45,8° (±10,2)
4	19	71	10,5	4,0	5,2	3,6	60,3° (±14,5)
5	18	93	11,1	3,0	4,0	3,3	48,9° (±17,2)
6	18	71	11,1	3,4	4,6	3,4	50,0° (±20,7)
7	22	98	9,1	4,0	5,0	3,6	71,9° (±23,7)

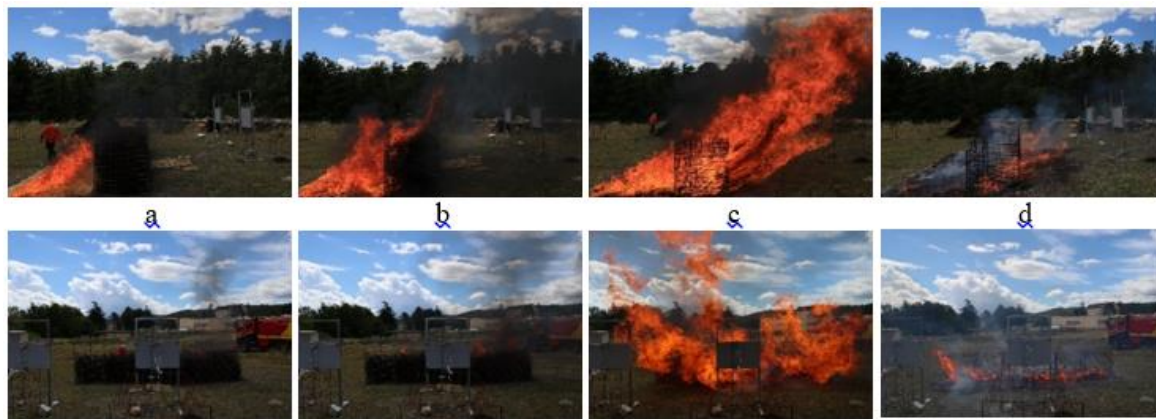


Figure 6 : Photographies de la combustion d'une haie de 1 m de haut (Essai 1) a) Propagation du feu dans la frisure de bois (t = 1 s) b) Allumage de la haie (t = 5 s) c) Brûlage de la haie (t = 19 s) d) Brûlage des particules les plus épaisses (t = 61 s).

### 1.3.2 Flux reçus à 3 m des haies

Les flux enregistrés à 3 m des haies sont présentés par la Figure 7 (haie de 6 m x 1 m x 1 m – essai 2) et par la Figure 8 (haie de 6 m x 2 m x 1 m – essai 3). Pour l'ensemble des expériences, les flux thermiques sont nuls jusqu'à ce que la haie s'allume, cette dernière faisant d'écran durant la propagation du feu de litière. Une fois la haie allumée, les flux enregistrés augmente rapidement jusqu'à atteindre un maximum puis décroissent lentement jusqu'à l'extinction du feu. Le Tableau 9 présente les flux maximum enregistrés pour les différentes configurations à 3 m des haies. Pour l'ensemble des essais, les flux totaux sont très supérieurs aux flux radiatifs montrant que les flammes ont atteint les capteurs. Les sollicitations thermiques les plus importantes ont été enregistrées au niveau du centre de la haie. Compte tenu de la forme des courbes, nous avons décidé de calculer le temps d'exposition pour différents seuils de flux : 5, 8, 12, 15 et 30 kW/m<sup>2</sup> au niveau du centre de la haie et à 1,5 m de haut (Tableau 10). En se basant sur les seuils d'endommagement donnés dans [11], les sollicitations

thermiques engendrées par la combustion des haies auraient endommagé des matériaux en PVC rigide mais n'auraient pas été suffisantes pour endommager ou enflammer du sapin et du chêne.

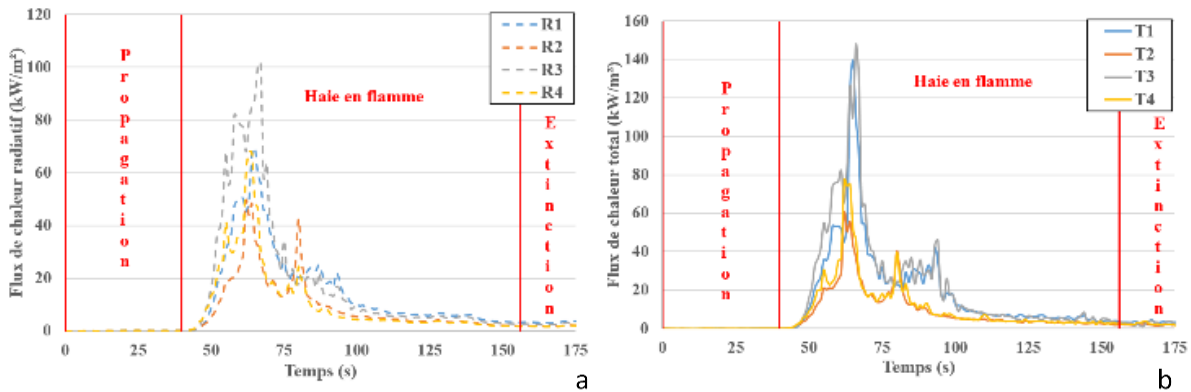


Figure 7 : Flux a) radiatifs et b) totaux mesurés à 3 m durant l'essai 2 (haie de 6 m x 1 m x 1 m)

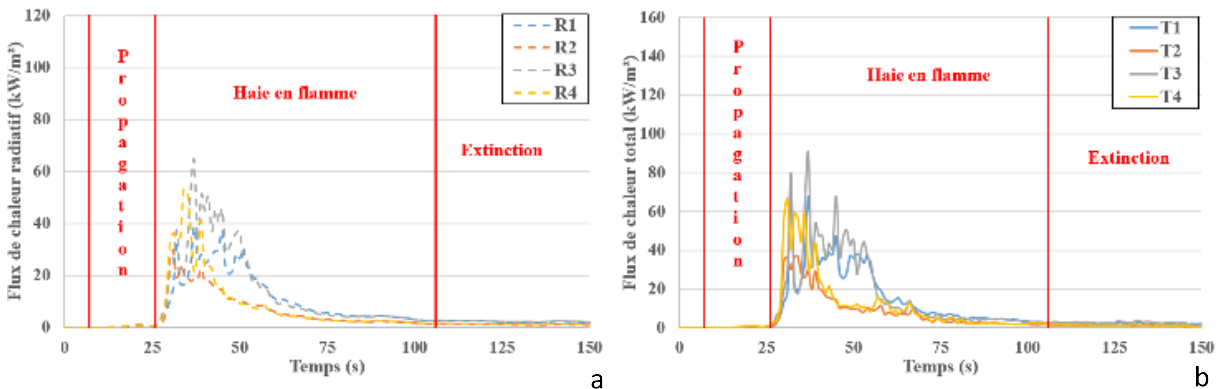


Figure 8 : Flux a) radiatifs et b) totaux mesurés à 3 m durant l'essai 3 (haie de 6 m x 2 m x 1 m)

Tableau 9 : Flux radiatifs et totaux maximums enregistrés à 3 m de la haie

	Haie de 6 m x 1 m x 1 m	Haie de 6 m x 2 m x 1 m	Haie de 4 m x 1 m x 1 m
<b>Flux radiatif maximum à 3 m (kW/m<sup>2</sup>)</b>	64,3	101,8	52,9
<b>Flux total maximum à 3 m (kW/m<sup>2</sup>)</b>	90,2	148,0	90,3

Tableau 10 : Temps d'exposition moyen pour différents seuils de flux à 3 m de la haie, au niveau du centre et à 1,5 m de haut.

Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Temps d'exposition (s)					
	Haie de 6 m x 1 m x 1 m		Haie de 6 m x 2 m x 1 m		Haie de 4 m x 1 m x 1 m	
	Radiatif	Total	Radiatif	Total	Radiatif	Total
5	46,5	55,5	83,0	89,0	41,0	49,0
8	37,0	45,5	53,0	62,0	32,0	36,2
12	28,5	36,5	46,0	51,0	22,0	29,0
15	26,5	30,5	22,0	59,0	19,0	24,5
30	13,0	17	20,0	31,0	8,2	12,5
<b>Endommagement possible</b>	PVC rigide					

## 2 Reconstitution d'un feu de végétation impactant une construction

### 2.1 Cas des haies

#### 2.1.1 Dispositif expérimental

Afin d'analyser l'impact de la combustion de végétaux sur des éléments constructifs, nous avons reproduit une configuration de feu arrivant sur une construction au niveau d'une interface forêt/habitat. Pour cela, nous avons utilisé la plateforme d'EXpérimentations, de sensibiLisation et de fORMation aux Risques Incendies dans les Interfaces (EXPLORII) dont les caractéristiques sont décrites en détail dans le livrable T1.3.1. La Figure 9 présente le dispositif expérimental utilisé. Pour compléter les expériences présentées précédemment, nous avons débuté par l'étude de haie de ciste de 6 m de long sur 1 m de large. La haie reconstituée à partir de branches de cistes coupées a été placée sur la cellule de pesée positionnée à 3 m de la construction. Deux hauteurs de haie ont été considérées : 1 m et 2 m. De la frisure de bois a été déposée de manière homogène avec une charge de 1 kg/m<sup>2</sup> sur la pente de 20° située face à la maison sur une surface de 5 m de long sur 6 m de large afin de permettre l'allumage de la haie. Comme pour les expériences précédentes, les conditions atmosphériques et la teneur en eau des combustibles ont été mesurées pour chaque expérience. Pour la vitesse et la direction du vent, nous avons utilisé un anémomètre sonique 2D situé à 2 m de haut. Pour la direction du vent, l'angle 0° correspond au nord. Une direction de vent de 110° correspond à un vent dans l'axe de la pente vers la construction. La géométrie du front de flamme a été déterminée à l'aide des appareils photos situés sur le côté du dispositif en utilisant les grandeurs définies par la Figure 4.

Sur la façade exposée au feu, se trouvent trois fenêtres en verre double vitrage de 60 cm de large sur 95 cm de haut en bois, PVC et aluminium. Ces fenêtres peuvent être protégées par des volets en bois, PVC ou aluminium. Afin de mesurer la densité de flux de chaleur pouvant impacter les fenêtres, deux couples de fluxmètres radiatif et total ont été placés entre les fenêtres comme indiqué sur la Figure 9. Deux appareils photos numériques avec une fréquence de 1 image par seconde ont été positionnés sur le côté de la construction pour observer la géométrie du front de flamme. Une GoPro a également été placée sur un mat télescopique en bas de la pente pour observer l'arrière du front de feu. Le Tableau 11 présente l'ensemble des caractéristiques des expériences effectuées.

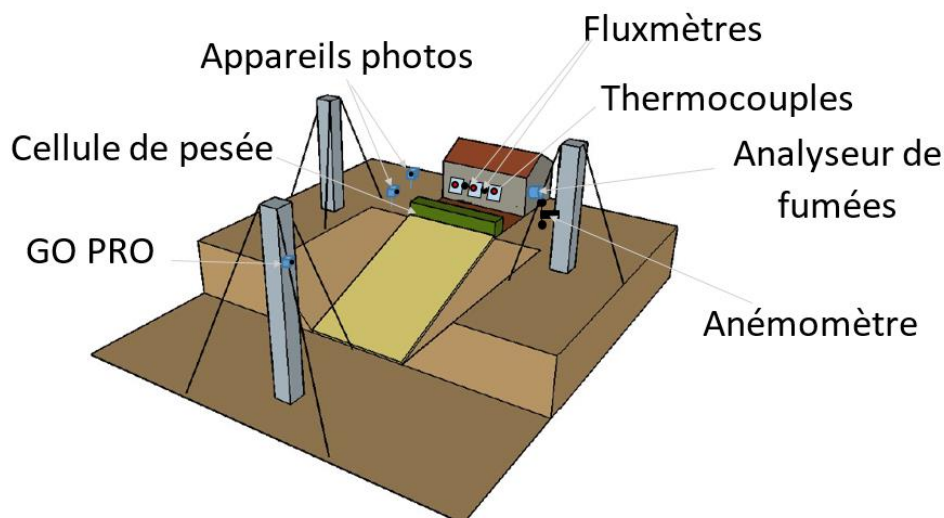


Figure 9 : Dispositif expérimental de reconstitution d'un feu de végétation impactant une construction

Tableau 11 : Caractéristique des expériences réalisées pour représenter un feu de végétation impactant une construction avec une haie de ciste seule

	<b>Essai 8</b>	<b>Essai 9</b>	<b>Essai 10</b>	<b>Essai 11</b>	<b>Essai 12</b>	<b>Essai 13</b>
<b>Dimension de la haie (m × m × m)</b>	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 2 × 1	6 × 2 × 1
<b>Teneur en eau haie (%)</b>	8,7	18,0	10,6	10,6	2,7	2,7
<b>Teneur en eau frisure (%)</b>	6,1	6,1	5,2	5,2	11,8	11,8
<b>Type de volet</b>	Aluminium	Bois	PVC	Sans volet	Aluminium, Bois et PVC	Sans volet
<b>Vitesse moyenne du vent (m/s)</b>	2,1	2,8	1,2	1,8	0,5	1,3
<b>Direction moyenne du vent (m/s)</b>	157,8	154,0	143,8	123,4	188,2	173,3
<b>Température ambiante (°C)</b>	17,7	18,9	22,6	22,0	24,7	30,2
<b>Humidité relative ambiante (%)</b>	34,8	54	44,6	48,9	64,6	47,7

### 2.1.2 Impact du feu sur la construction

Comme pour les haies sans la construction, on retrouve les trois phases de la combustion : propagation dans la frisure, combustion de la haie et extinction (Figure 10 et Figure 11). Le

Tableau 12 résume les grandeurs principales mesurés lors des essais. Les expériences débutent par la propagation du front de feu dans la frisure de bois qui entraîne l'allumage de la haie par contact direct ( $t=0$  s). Une fois allumée, la vitesse de perte de masse de la haie augmente rapidement pour atteindre un pic variant entre 0,8 et 4,2 kg/s suivant les expériences puis décroît jusqu'à l'extinction totale (Figure 12). Les variations observées entre les expériences sont principalement dues à la vitesse et direction du vent qui changent entre les essais ainsi qu'aux teneurs en eau des combustibles. Les sollicitations thermiques les plus intenses ont lieu lors du pic de perte de masse (Figure 13). Durant cette phase, la puissance maximale calculée à partir de la perte de masse en considérant un pouvoir calorifique de 18 413,6 kJ/kg [12] est comprise entre 15,3 et 27,2 MW pour les haies de 1 m de haut et entre 51,0 et 77,0 MW pour les haies de 2 m. En doublant la hauteur des haies, la puissance maximale a donc été multipliée par un facteur d'au moins 2,8. En ce qui concerne les flux maximaux enregistrés au niveau de la construction, ils varient 14,7 et 33,7 kW/m<sup>2</sup> pour le flux radiatif et entre 16,8 et 46,4 kW/m<sup>2</sup> pour le flux total pour les haies de 1 m de haut. Pour les haies de 2 m de haut, nous avons obtenu des valeurs comprises entre 38,8 et 64,5 kW/m<sup>2</sup> pour le flux radiatif et entre 56,5 et 120,3 kW/m<sup>2</sup> pour le flux total. Malgré ces flux importants, il est à noter que la combustion de la haie dure peu longtemps (temps de résidence de flamme inférieure à 80 s). En ce qui concerne la géométrie du front de flamme, les longueurs de flamme maximales varient entre 3,6 m et 6,3 m pour les haies de 1 m et entre 6,7 m et 6,8 m pour les haies de 2 m. Dans les deux cas, les flammes dépassent largement le bas du toit. Par contre, la présence de la maison a tendance à redresser les flammes (angle par rapport au sol compris entre 54,6 et 64,4°) empêchant les flammes d'atteindre directement la façade dans le cas des haies de 1 m. Ce point est une différence majeure

observées entre les expériences avec les haies seules et les brulages sur la plateforme EXPLORII. Les observations post-incendie ont montré que pour les haies de 1 m, seuls les volets en PVC ont subi des dégâts (Figure 14). Les lames se sont en effet légèrement déformées. Cette observation est cohérente avec la température mesurée sur les volets à savoir 167,6°C (Figure 15). Cette valeur est supérieure à la température de perte des propriétés mécaniques du PVC à savoir 75°C [11]. Il faut toutefois remarquer que le volet joue un rôle protecteur pour la vitre puisque la température sur la vitre côté volet n'exécède pas 31°C. Pour les haies de 2 m, nous avons observé la déformation des volets PVC, la combustion (non soutenue) du volet en bois et la fissuration de la vitre extérieure de la fenêtre en bois.



Figure 10 : Photographies des phases de combustion pour une haie de 6 m × 1 m × 1 m (Essai 8) a) Allumage de la haie par le front de flamme (t=1 s) b) Haie en combustion (t=17 s) c) Combustion des particules les plus épaisses (t=32 s)



Figure 11 : Photographies des phases de combustion pour une haie de 6 m × 2 m × 1 m (Essai 13) a) Allumage de la haie par le front de flamme (t=2 s) b) Haie en combustion (t=14 s) c) Combustion des particules les plus épaisses (t=62 s)

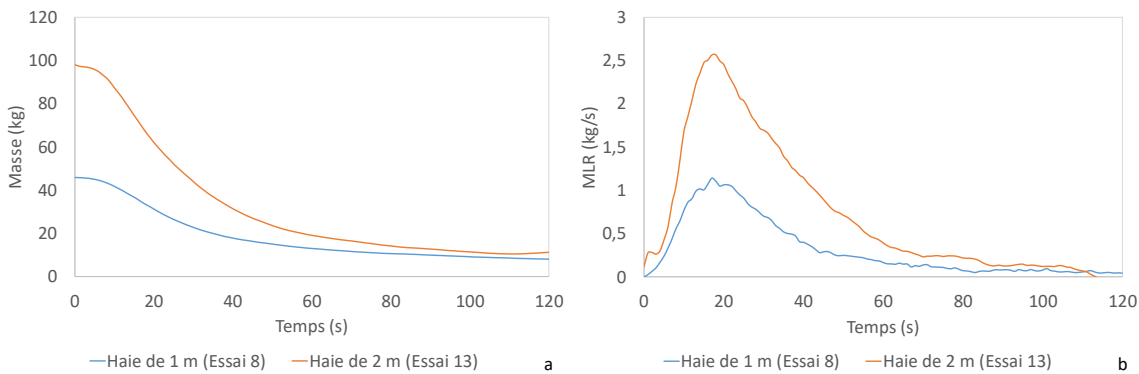


Figure 12 : a) Perte de masse b) Dérivée de la perte de masse (MLR) - de la haie pour les essais 8 et 13

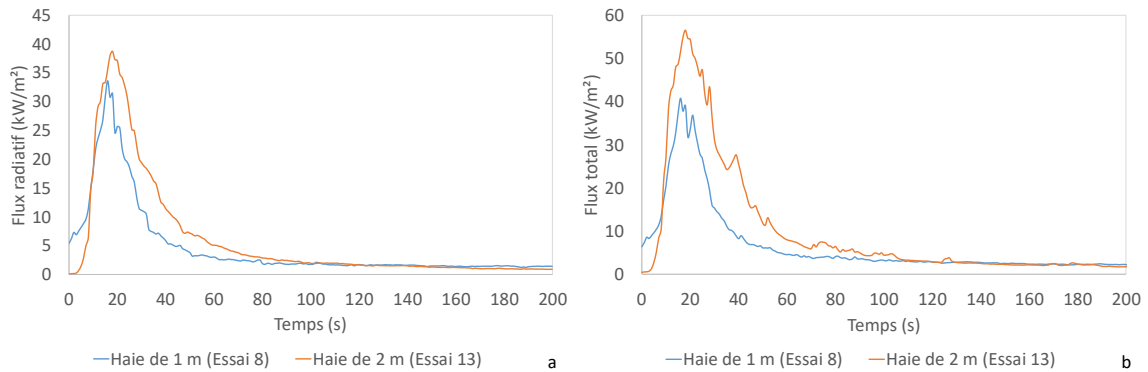


Figure 13 : Flux thermiques enregistrés sur la façade exposée a) Flux radiatifs b) Flux totaux



Figure 14 : Dégâts observés avec une haie de a) 6 m × 1 m × 1 m - b et c) 6 m × 2 m × 1 m



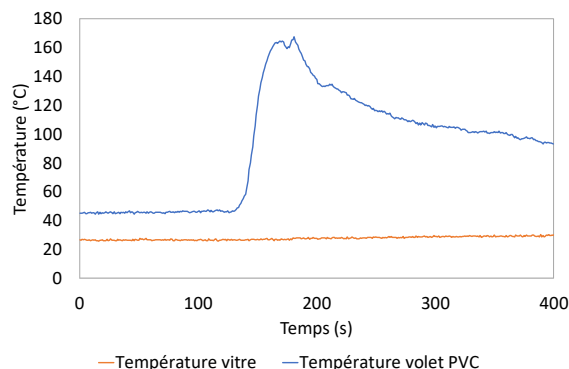


Figure 15 : Températures mesurées sur le volet en PVC et sur la vitre de la fenêtre lors de l'essai 10

Tableau 12 : Grandeurs mesurées lors des essais avec des haies seules sur la plateforme EXPLORII

	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11	Essai 12	Essai 13
<b>Pic de MLR (kg/s)</b>	1,2	0,9	0,8	1,5	4,2	2,8
<b>Perte de masse (kg)</b>	44,3	41,8	47,9	44,9	91,5	89,7
<b>Puissance maximale (MW)</b>	22,3	17,2	15,3	27,2	77,0	51,0
<b>Température maximale relevée sur la façade exposée (°C)</b>	132,1	277,8	167,6	184,9	273,5	98,1
<b>Flux radiatif maximum relevé sur la façade exposée (kW/m<sup>2</sup>)</b>	33,7	19,1	14,7	33,3	63,5	38,8
<b>Flux total maximum relevé sur la façade exposée (kW/m<sup>2</sup>)</b>	46,6	26,7	16,8	46,4	120,3	56,5
<b><math>H_F</math> max (m)</b>	4,0	2,8	4,7	4,8	5,3	5,7
<b><math>L_F</math> max (m)</b>	4,6	3,6	5,0	6,3	6,8	6,7
<b><math>A_V</math> max (m)</b>	3,4	2,5	2,2	4,9	4,5	4,8
<b><math>\beta</math> moyen (°)</b>	58,3 (± 12,8)	61,6 (± 14,4)	64,4 (± 14,1)	54,6 (± 11,8)	51,2 (± 12,0)	55,5 (± 12,0)
<b>Dégâts observés</b>	Pas de dégât	Pas de dégât	Lames des volets PVC déformées	Pas de dégât	Volet PVC déformé, volet bois brûlé sur la face exposée	Vitre extérieure fendue

## 2.2 Cas avec des arbres

### 2.2.1 Dispositif expérimental

Les expériences avec les arbres ont également été réalisées sur la plateforme EXPLORII. Les végétaux qui ont été étudiés sont les suivants :

- Haie de 6 m × 1 m × 1 m reconstituée de ciste avec une charge volumique de 8 kg/m<sup>3</sup> avec 1 ou 3 cyprès dans la haie
- Des cyprès seuls (canopée dense à forte biomasse)
- Un micocoulier seul (canopée aérée à faible biomasse)

L'allumage des haies avec cyprès a été réalisé de la même manière que pour les haies seules c'est-à-dire avec une litière de frisure de bois (charge de 1 kg/m<sup>2</sup>) sur une surface de 5 m de long sur 6 m de large. Pour les cyprès seuls, l'allumage a également été réalisé par une propagation dans une litière de frisure de bois avec une charge de 1kg/m<sup>2</sup>. Par contre, l'allumage du micocoulier a été fait en mettant 2 kg de frisure au niveau de son pied.

Lors des brûlages des arbres seuls (également situés à 3 m de la façade), le dispositif expérimental de la plateforme EXPLORII a été complété par (Figure 16) :

- Une rampe de quatre thermocouples située à quelques centimètres de la canopée de façon à suivre la variation de température émise par les flammes à différentes hauteurs de la canopée.
- Deux fluxmètres situés de part et d'autre de l'arbre (donc perpendiculairement au vent et à la direction des flammes), à 3 m de la canopée et à une hauteur de 1,70 m afin d'enregistrer le flux total et le flux radiatif émis lors du brûlage.

Le délai d'allumage de la canopée, le délai pour atteindre le haut de la canopée (ou la hauteur maximale atteinte par les flammes lorsque la combustion n'a pas pu être complète) ainsi que la durée totale des flammes ont également été enregistrés. La vitesse de propagation des flammes (ROS) a également été mesurée en se basant sur le délai d'allumage du haut de la canopée.

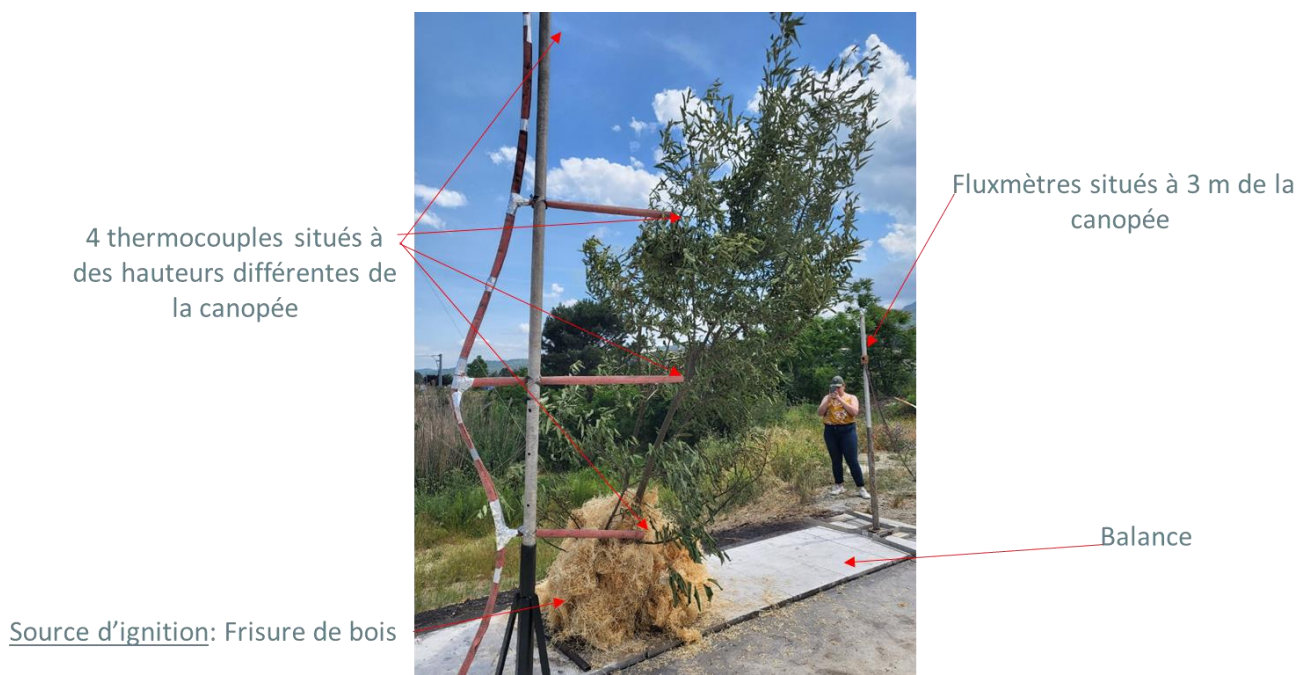


Figure 16 : Dispositif expérimental utilisé pour le brûlage des arbres seuls

Tableau 13 : Caractéristique des expériences réalisées pour représenter un feu de végétation impactant une construction avec des arbres

	Essai 14	Essai 15	Essai 16	Essai 17	Essai 18
<b>Dimension de la haie (m × m × m)</b>	6 × 1 × 1	-	-	6 × 1 × 1	-
<b>Arbres : type, masse, hauteur et couronne</b>	1 cyprès 10,8 kg 3,26 m × 0,5 m × 0,3 m	1 micocoulier 9,9 kg, 3,61 m × 1,7 m × 0,9 m	1 cyprès 51 kg, 3,1 m × 1,3 m × 1,1 m	3 cyprès Cypès 1 : 11,3 kg, 3,2 m × 0,6 m × 0,6 m Cypès 2 : 12,3 kg, 3,6 m × 0,4 m × 0,35 m Cypès 3 : 8,36 kg de 3,4 m × 0,3 m × 0,25 m	1 cyprès 153 kg, 2,7 m × 1,0 m × 0,9 m
<b>Mode d'allumage</b>	Litière de frisure de 6 m × 5 m (charge 1 kg/m <sup>2</sup> )	2 kg de frisure sur le pied	Litière de frisure de 3,1 m × 3,65 m (charge 1 kg/m <sup>2</sup> )	Litière de frisure de 6 m × 5 m (charge 1 kg/m <sup>2</sup> )	Litière de frisure de 3 m × 3 m
<b>Densité apparente de la couronne (kg/m<sup>3</sup>)</b>	3,71	1,23	6,63	3,71	6,63 (10,36*)
<b>Teneur en eau haie (%)</b>	5,4	-	-	8,5	-
<b>Teneur en eau arbre (%)</b>	28,3	45,0	50,7	42,0	136,9 (12,1*)
<b>Teneur en eau frisure (%)</b>	11,2	11,2	11,2	7,3	7,3
<b>Type de volet</b>	Aluminium				
<b>Vitesse moyenne du vent (m/s)</b>	2,1	2,8	2,2	1,6	3,9
<b>Direction moyenne du vent (m/s)</b>	139,3	136,3	133,4	130,6	144,1
<b>Température ambiante (°C)</b>	25,3	29,5	26,5	24,8	28,8
<b>Humidité relative ambiante (%)</b>	42,7	44,1	57,0	52,5	53,3

\* : Valeur obtenue sur combustible mort dans la canopée de l'arbre

## 2.2.2 Combustion des végétaux et impact sur la construction

La Figure 17 présente les différentes étapes de combustion des végétaux testés. Les pertes de masse les plus importantes ont eu lieu pour les expériences incluant des haies. Pour ces essais, comme précédemment le MLR augmente rapidement une fois la haie allumée jusqu'à atteindre un pic (1,4 à 1,5 kg/s) puis décroît ensuite

jusqu'à l'extinction. Pour les arbres seuls, la perte de masse est moins importante mais le MLR présente un plateau entre 0,2 et 0,8 kg/s suivant les essais (Figure 18).



Figure 17 : Photographies des phases de combustion pour l'a) Essai 14 b) Essai 15 c) Essai 16 d) Essai 17 et e) Essai 18

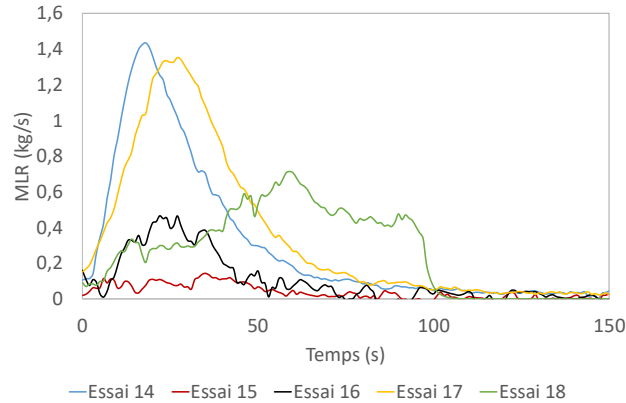


Figure 18 : Dérivée de la perte de masse pour les expériences avec des arbres

Comme pour le cas des haies seules, l'impact le plus important sur la construction a lieu au moment où le pic de perte de masse. Les flux radiatifs mesurés sur la façade exposée varient entre 5,1 et 19,3 kW/m<sup>2</sup> pour les arbres seuls et entre 19,3 et 57,0 kW/m<sup>2</sup> pour les haies avec cyprès. Pour le flux total, les valeurs varient entre 8,0 et 23,8 kW/m<sup>2</sup> pour les arbres seuls et entre 23,8 et 80,7 kW/m<sup>2</sup> pour les haies avec cyprès. La température sur les volets en aluminium n'a pas dépassé 109,2°C. Aucun dégât n'a été observé sur la construction. Concernant les flux radiatifs et totaux enregistrés sur le côté du dispositif, ils ont été inférieurs à ceux reçus par les volets du fait de leur position perpendiculaire au sens de propagation du feu. Les valeurs les plus importantes (8,1 kW/m<sup>2</sup>) ont été observées pour le cyprès dont la biomasse était la plus importante (essai 18). Pour cet arbre, la vitesse de propagation des flammes dans la canopée a été très inférieure (0,036 m/s) par rapport à celle mesurée pour les autres arbres. Ceci s'explique par la forte densité apparente des feuilles de la canopée, surtout celles des feuilles mortes, diminuant ainsi l'aération dans la couronne et donc la propagation du feu. Les valeurs de températures n'ont pas pu être obtenues étant donné que l'arbre s'est écroulé avant la fin du brûlage, écrasant la rampe de thermocouples. Par ailleurs, les températures maximales dégagées par les flammes au niveau de la canopée étaient bien plus importantes (>500°C) que celles enregistrées sur les volets situés à 3m de l'arbre. La canopée la plus aérée (Micocoulier) a mis plus de temps pour s'enflammer (11 s) comparé à celle plus dense des cyprès. La durée de flamme (de même que le délai d'allumage du haut de la couronne) a été la plus longue (164 s) pour le plus gros cyprès, du fait de sa très forte biomasse et sa densité apparente élevée. Au final, les taux de biomasse consommée les plus élevés ont été observés dans les essais couplant un (ou plusieurs arbres) à la haie, avec des combustion complète ou quasi-complète des canopées.

Tableau 14 : Grandeurs mesurées lors des essais avec des arbres sur la plateforme EXPLORII (- : non mesuré)

	Essai 14	Essai 15	Essai 16	Essai 17 (3 arbres)	Essai 18*
<b>Délai d'allumage de l'arbre (s)</b>	3	11	4	7-44	8
<b>Durée totale d'inflammation (s)</b>	33	65	214	51-53	164
<b>Délai d'allumage du haut de la canopée (s)</b>	17	31	23	14-38	75
<b>Pic de MLR (kg/s)</b>	1,5	0,2	0,6	1,4	0,8
<b>Perte de masse (kg)</b>	49,6	5,7	15,8	57,3	40,5
<b>Biomasse consommée arbre (%)</b>	90	50	45	100	85
<b>Température maximale dégagée par les flammes (°C)</b>	-	905	732,3	-	-
<b>Température maximale relevée sur les volets en aluminium (°C)</b>	109,2	42,7	41,1	87,9	59,7
<b>Fux total maximum à 3 m perpendiculairement aux flammes (kW/m<sup>2</sup>)</b>	-	4,3	6,2	-	8,1
<b>Fux radiatif maximum à 3 m perpendiculairement aux flammes (kW/m<sup>2</sup>)</b>	-	3,5	5,2	-	6,2
<b>Flux radiatif maximum relevé sur la façade exposée (kW/m<sup>2</sup>)</b>	57,0	6,1	5,1	19,3	7,4
<b>Flux total maximum relevé sur la façade exposée (kW/m<sup>2</sup>)</b>	80,7	6,6	8,0	23,8	12,0
<b><math>H_F</math> max (m)</b>	4,4	3,8	4,4	4,4	3,2
<b><math>L_F</math> max (m)</b>	5,8	4,1	5,0	5,0	3,6
<b><math>A_V</math> max (m)</b>	3,8	1,5	2,8	2,8	1,9
<b><math>\beta</math> moyen (°)</b>	50,3 (± 9,7)	59,2 (± 15,0)	59,9 (± 12,5)	59,86 (± 12,5)	73,3 (± 13,1)
<b>Dégâts observés</b>	Pas de dégât				

### 2.2.3 Fumées

La Figure 19 présente l'évolution de la concentration en monoxyde de carbone (CO) à l'intérieur et à l'extérieur de la construction pour l'essai 18. Au moment de l'allumage du cyprés indiqué par (1) sur la figure, on remarque une augmentation de la concentration de monoxyde de carbone à l'extérieur de la construction (phase (2)) atteignant jusqu'à 280 ppm. Les fluctuations observées sur la Figure 19 pour l'extérieur sont principalement dues aux variations de vent au cours de l'expérience. La ventilation mécanique contrôlée (VMC) ayant été allumée dans la maison, les fumées entrent dans la construction (phase (3) sur la figure) pour atteindre un maximum d'environ 14 ppm après 700 s. Le pic d'émission apparaît donc après l'extinction du front de flamme lors de la combustion du résidu carbonneux. La limite IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) déterminées par le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health – USA) pour le CO est de 1200 ppm pour une exposition de 30 minutes. Par conséquent, les concentrations mesurées à l'intérieur ou à l'extérieur de la maison ne sont pas suffisantes pour avoir un effet irréversible sur les humains.

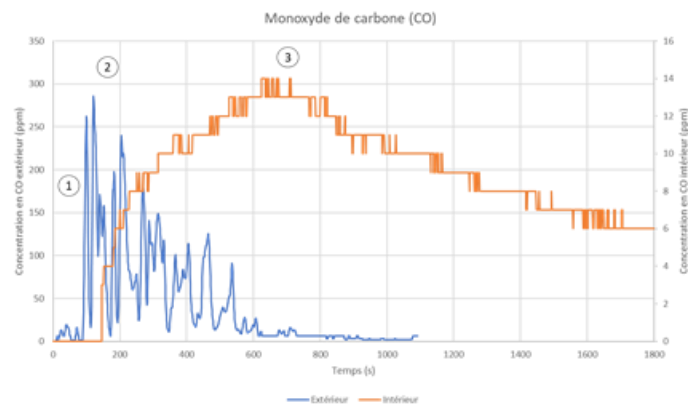


Figure 19 : Concentration de monoxyde de carbone mesurée à l'extérieur et à l'intérieur de la construction au cours de l'essai 18

## 3 Préconisations pour l'aménagement paysager et le choix des matériaux

Sur la base des constatations réalisées à partir des expériences effectuées sur la plateforme EXPLORII, nous avons pu voir que les haies sont les végétaux pouvant induire les impacts les plus importants sur une construction. En se basant sur les dommages observés durant les essais effectués sur la plateforme, nous pouvons préconiser afin d'abaisser la vulnérabilité des constructions lors d'incendie de végétation :

- La pose de volet systématique sur les façades susceptibles d'être exposée à un incendie de végétation
- Le remplacement des menuiseries PVC et bois par des menuiseries en aluminium.
- De retirer les matières combustibles sur les parties inférieures du toit (avant-toits ou gouttières) pour les maisons de plain-pied car les flammes atteignent ces zones.

- D'éteindre la ventilation mécanique contrôlée (VMC) lors d'un incendie pour éviter l'entrée des fumées dans la maison.

En ce qui concerne la distance de sécurité sans végétation autour de la construction, une distance de 3 m semble être suffisante pour des arbres seuls dans le cas de vents inférieurs à 4 m/s. Pour les haies de 1 m de haut et 1 m de large, les dommages sur la construction de plain-pied sont faibles. Néanmoins, les flammes atteignent les parties inférieures du toit pour des vents inférieurs à 3 m/s. Pour éviter cela, il serait judicieux d'accroître la distance de sécurité à au moins 5 m. Ces observations ne sont toutefois valables que pour une maison de plain-pied et peuvent être différentes pour une construction à étage. Avec des haies de 2 m de haut et 1 m de large, une distance de 3 m n'est pas suffisante. Etant donné que l'avancée des flammes peut atteindre 4,8 m pour des vents très faibles, il semble nécessaire d'imposer au moins une distance de 6 m pour ces haies. Ces valeurs doivent toutefois être confirmées pour des conditions de température et de vent proches de conditions estivales typiques.



## Références

- [1] International Association of Wildland Fire | Wild Fire Management Experts, International Association of Wildland Fire. (n.d.). <https://www.iawfonline.org/> (accessed July 3, 2019).
- [2] M. Gollner, R. Hakes, S. Caton, K. Kohler, Pathways for Building Fire Spread at the Wildland Urban Interface, 2015.
- [3] P. Vacca, D. Caballero, E. Pastor, E. Planas, WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level, *Journal of Safety Science and Resilience* 1 (2020) 97–105.
- [4] F. Morandini, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, W.E. Mell, Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions, *Fire Safety Journal* 108 (2019) 102836
- [5] N. Cheney, J. Gould, W. Anderson, The Influence Of Fuel, Weather And Fire Shape Variables On Fire-Spread In Grasslands, *International Journal of Wildland Fire* 3 (1993) 228
- [6] N. Cheney, J. Gould, Fire Growth in Grassland Fuels, *International Journal of Wildland Fire* 5 (1995) 237-247.
- [7] F. Morandini, X. Silvani, L. Rossi, P.-A. Santoni, A. Simeoni, J.-H. Balbi, J. Louis Rossi, T. Marcelli, Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties, *Fire Safety Journal* 41 (2006) 229–235
- [8] X. Silvani, F. Morandini, Fire spread experiments in the field: Temperature and heat fluxes measurements, *Fire Safety Journal* 44 (2009) 279–285
- [9] F. Morandini, X. Silvani, Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires, *International Journal of Wildland Fire* 19 (2010) 570–582.
- [10] M.G. Cruz, B.W. Butler, D.X. Viegas, P. Palheiro, Characterization of flame radiosity in shrubland fires, *Combustion and Flame* 158 (2011) 1970–1976.
- [11] G. Augin, A. Rabilloud, E. Guillaume, Plan de prévention des risques technologiques - Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique (No. E-ING-07/564b-GA/AR). Efectis France et Laboratoire national de métrologie et d'essais. 2008
- [12] K. Meerpoel-Pietri, Prédiction de la vulnérabilité des constructions lors des incendies à l'interface milieu naturel/constructions, Thèse de doctorat Université de Corse, 29 novembre 2021



**Interreg**



UNION  
EUROPÉENNE

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional



INTERMED

## Prodotto T1.3.2:

# Rapporto sulle quantità termiche, la produzione e la circolazione dei fumi in prossimità di un edificio soggetto ad incendio in corso in un'area sviluppata



La cooperazione al cuore del Mediterraneo  
La coopération au coeur de la Méditerranée

**Rapporto realizzato dall'Università della Corsica e dall'INRAE, giugno 2022.**

**Redazione: Virginie TIHAY-FELICELLI e Anne GANTEAUME**

## Contenuti

Contenuti.....	3
Introduzione .....	4
1 Combustione di siepi di cisto.....	4
1.1 Dispositivo sperimentale.....	4
1.2 1.2 Caratterizzazione dei combustibili.....	7
1.3 1.3 Stress termico dovuto alla combustione di siepi di cisto.....	10
1.3.1 Fenomenologia e geometria delle fiamme.....	10
1.3.2 Flussi ricevuti a 3 m dalle coperture.....	11
2 Ricostruzione di un incendio di vegetazione che colpisce un edificio .....	13
2.1 Caso delle siepi.....	13
2.1.1 2.1.1 Dispositivo sperimentale .....	13
2.1.2 2.1.2 Impatto del fuoco sulla costruzione .....	15
2.2 Casi con alberi .....	18
2.2.1 Dispositivo sperimentale .....	18
2.2.2 Combustione di impianti e impatto sulla costruzione .....	20
2.2.3 Fumi.....	23
3 Raccomandazioni per la sistemazione del paesaggio e la scelta dei materiali .....	23

## Introduzione

A causa dei cambiamenti climatici e dell'espansione delle aree rurali, la gravità del fenomeno è in aumento.

e frequenza [2] degli incendi boschivi è aumentata notevolmente negli ultimi decenni. Il numero di strutture distrutte ogni anno è passato da circa 900 negli anni '90 a quasi 3000 negli anni 2000. [1]. L'aumento dei danni materiali osservato è dovuto in particolare all'aumento della densità di abitazioni individuali nelle periferie delle grandi città. Queste aree in cui si incontrano l'urbanizzazione e gli spazi naturali, chiamate "interfacce foresta/abitazione", sono aree sensibili in cui il rischio di incendio è preoccupante a causa dell'aumento delle fonti di accensione e della vulnerabilità delle infrastrutture.

La ricerca scientifica sulla sicurezza antincendio ha dedicato molti sforzi alla comprensione delle dinamiche degli incendi confinati (incendi di edifici). Tuttavia, la ricerca sugli incendi selvaggi e su come mitigare potenzialmente la perdita di strutture è molto meno sviluppata. Pertanto, ci sono ancora molte aree grigie nella comprensione del potenziale di accensione delle strutture durante gli incendi nell'interfaccia foresta/casa. Per ridurre la vulnerabilità degli edifici in queste aree, la tecnica più utilizzata è quella di ridurre il carico di combustibile per indebolire la potenza degli incendi quando si avvicinano agli edifici e per rallentarne la propagazione. In Francia, questa riduzione del carburante è imposta nei decreti di disboscamento. Tuttavia, le prescrizioni sono state definite da esperti senza alcuna base scientifica. Al fine di fornire dati sulla vulnerabilità degli edifici agli incendi, l'Università della Corsica ha deciso di lavorare su

- Caratterizzazione termica degli stress termici generati dalla combustione di siepi di vegetazione. Questi elementi sono stati scelti perché sono vettori di propagazione del fuoco all'interfaccia foresta/habitat [3].
- Lo sviluppo di raccomandazioni per il paesaggio e la scelta dei materiali per ridurre la vulnerabilità degli edifici all'interfaccia foresta/abitazione.

Questo documento presenta i risultati sperimentali ottenuti durante il lavoro. La prima parte presenta la combustione delle sole siepi di cisto. La seconda parte descrive gli esperimenti condotti sulla piattaforma EXperimentation, Sensitisation and Training Platform for Fire Risks at Interfaces (EXPLORII) per ricostruire un incendio di vegetazione che colpisce un edificio. Infine, la terza parte fornisce raccomandazioni sulle distanze tra costruzioni e vegetazione e sui materiali da utilizzare per le abitazioni.

## 1 Combustione di siepi di cisto

### 1.1 Dispositivo sperimentale

La caratterizzazione degli stress termici generati dalla combustione della vegetazione è iniziata con gli incendi di siepi di cisto per misurare la densità del flusso radiativo a 3 m dal fronte di fiamma. La distanza di 3 m è stata scelta perché corrisponde alla distanza minima a cui può essere presente la vegetazione secondo gli attuali ordini di bonifica francesi. Per consentire una buona riproducibilità tra le prove, la siepe è stata ricostituita con rami di cisto di Montpellier posti verticalmente in gabbie di rete saldate, avendo cura di mantenere un carico di combustibile di 8 kg/m<sup>3</sup> corrispondente al carico naturale degli arbusti di cisto [4]. Per consentire alla siepe di accendersi, è stata aggiunta una lettiera di trucioli di legno larga 2 m davanti alla siepe per tutta la sua lunghezza con un carico di 1 kg/m<sup>2</sup>. I misuratori di flusso radiativo raffreddato (MEDTHERM 64P-02-24T) e totale (MEDTHERM GTW-10-32-485A) sono stati posizionati a 3 m dalla siepe su supporti e protetti da lastre di silicato di calcio. Per osservare la propagazione dell'incendio e la geometria del fronte di fiamma, sono state posizionate intorno al dispositivo fotocamere CANON 80D dotate di sensori APSC

accoppiati con obiettivi CANON da 18 mm di lunghezza focale. Sono stati effettuati in totale 7 esperimenti: 2 prove con una siepe lunga 6 m x larga 1 m x alta 1 m, 1 prova con una siepe lunga 6 m x larga 1 m x alta 2 m e 4 prove con una siepe lunga 4 m x larga 1 m x alta 1 m (Figura 1). La disposizione dei diversi dispositivi di misurazione è illustrata nella figura Figura 2 per le siepi di 6 m e sulla Figura 3. Le lettere R e T indicano rispettivamente la posizione dei misuratori di flusso radiativo e totale..



Figura 1 : Fotografie di configurazioni di siepi (a) larghe 6 m; (b) larghe 4 m.

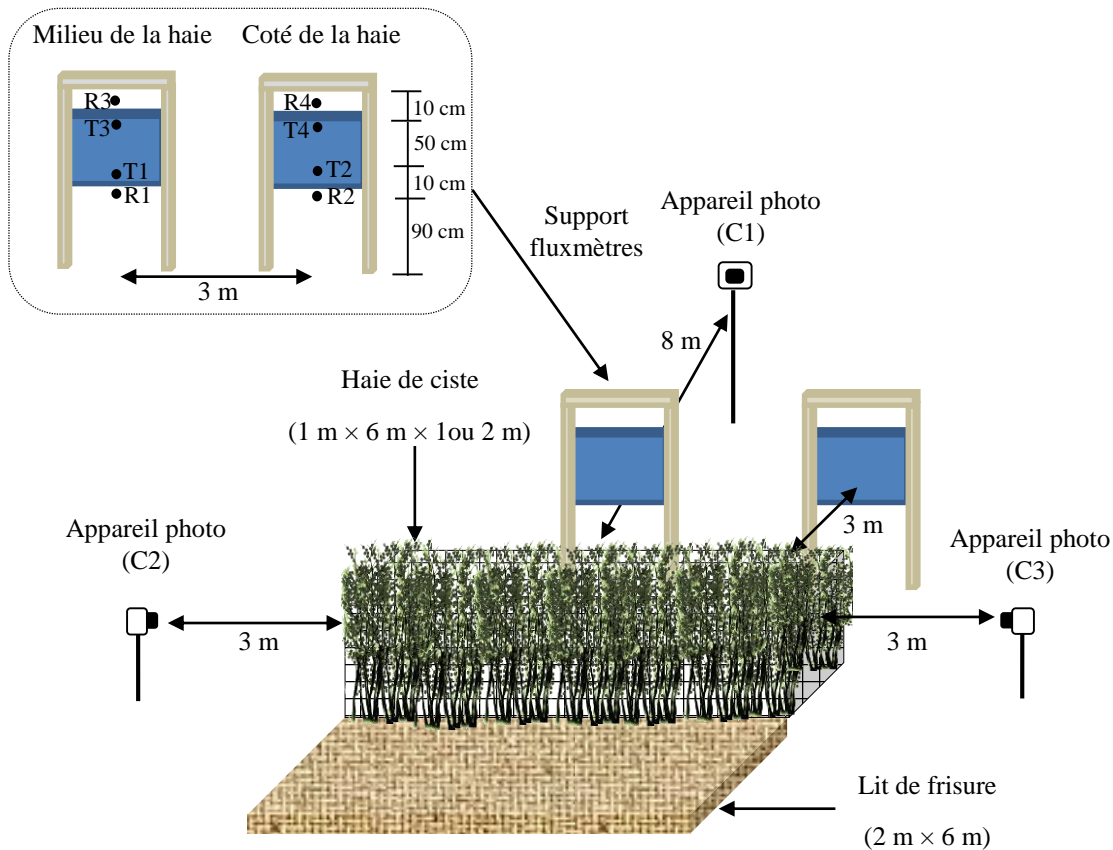


Figura 2 : Posizione dei sensori per i test con siepi di cisto larghe 6 m.

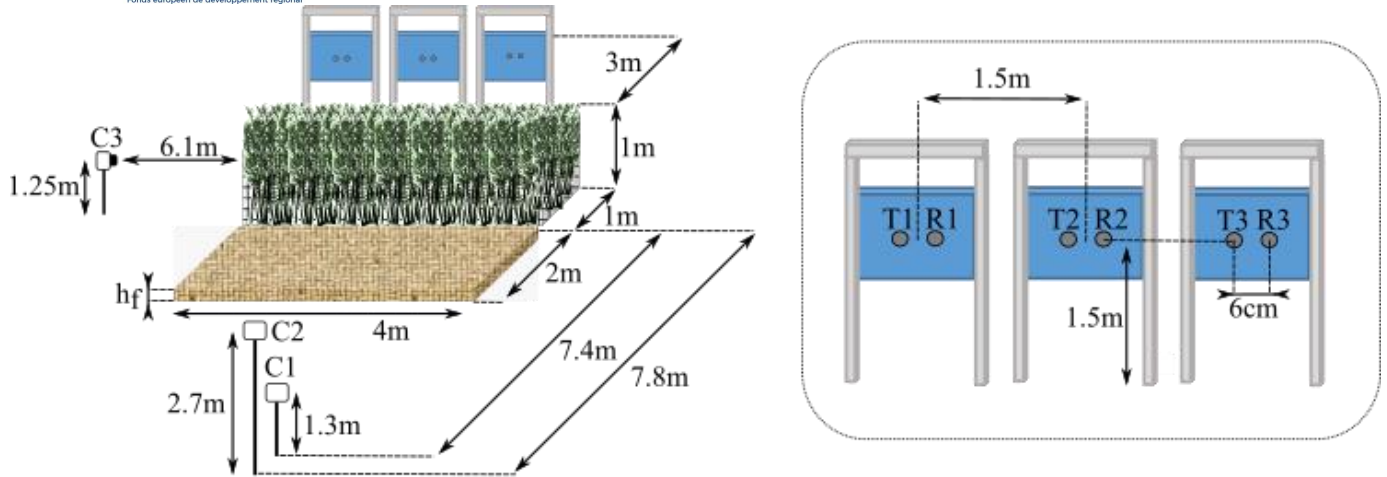


Figura 3 : Posizione dei sensori per i test con siepi di cisto larghe 4 m.

Per ogni esperimento sono state misurate le condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa dell'aria, direzione e velocità del vento) e il contenuto idrico delle piante. Il contenuto idrico fogliare dei rami di cisto era dell'11,3% e quello del riccio del 6,8%. Le condizioni igrometriche (temperatura e umidità dell'aria) sono state misurate prima di ogni illuminazione con un igrometro ROTRONIC HygroPalm (HP22-A) dotato di una sonda di umidità e temperatura ROTRONIC HygroClip2-S (precisione  $\pm 0,8\%$  per l'umidità relativa e  $\pm 0,1$  K per la temperatura esterna). Per la misurazione del vento incidente, un anemometro GILL INSTRUMENT Wind Sonic è stato posizionato a un'altezza di 2,5 m sul sito di prova, a una distanza di 15 m dal dispositivo sperimentale, in modo da non disturbare il flusso d'aria durante le prove. Il produttore dichiara una precisione di  $\pm 2\%$  per la velocità del vento e di  $\pm 2^\circ$  per la direzione del vento con un tempo di risposta di 0,25 s. La frequenza di campionamento per la misura del vento è stata impostata a 1 Hz. Il Tabella 1 presenta l'insieme delle statistiche medie per i test con le coperture. La direzione  $0^\circ$  corrisponde all'asse del dispositivo. L'intensità della turbolenza  $I$  è stato definito da :

$$I = \frac{u_{RMS}}{\bar{U}} \quad (1)$$

Con  $u_{RMS}$  la fluttuazione media e  $\bar{U}$  la media del segnale di velocità registrato dall'anemometro durante la prova.

Tabella 1 Statistiche atmosferiche medie per le prove con le sole siepi.

Essai	Dimensioni della siepe (m x m x m)	Velocità U (m/s)	Direzione ( $^\circ$ )	Intensità di turbolenza (%)	Temperatura dell'aria ( $^\circ$ C)	Umidità relativa dell'aria (%)
1	6 x 1 x 1	2,34 $\pm$ 0.73	-12 $\pm$ 33	31	16,6	37,9
2	6 x 1 x 1	2,47 $\pm$ 1.3	47 $\pm$ 51	54	18,1	37,5
3	6 x 2 x 1	2,06 $\pm$ 0.73	44 $\pm$ 43	35	15,2	38,4
4	4 x 1 x 1	3,07 $\pm$ 1,07	-11,8 $\pm$ 26,0	35	38	26,15
5	4 x 1 x 1	3,53 $\pm$ 1,33	-28,6 $\pm$ 28,9	38	36	28,19
6	4 x 1 x 1	2,36 $\pm$ 1,16	-16,7 $\pm$ 28,5	49	33	28,64
7	4 x 1 x 1	2,10 $\pm$ 1,16	7,3 $\pm$ 42,6	55	48	28,08

Dalle fotografie scattate lateralmente, la geometria delle fiamme è stata determinata mediante l'elaborazione delle immagini. A tal fine, ci siamo interessati all'altezza della fiamma  $HF$  (m), lunghezza della fiamma  $LF$





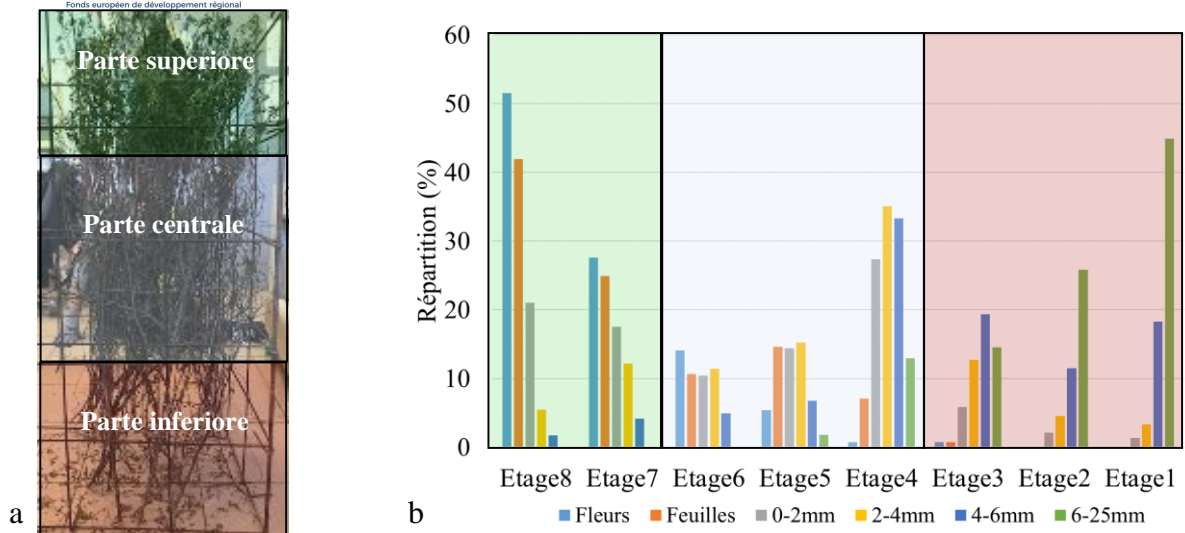


Figura 5 : Distribuzione spaziale delle diverse classi di particelle nella siepe di cisto ricostituita.

La densità delle diverse classi di particelle e i loro rapporti superficie/volume sono stati determinati eseguendouno studio statistico su 100 campioni di ciascuna famiglia di particelle. I fiori sono stati assimilati a sfere di diametro  $d$ . Le foglie sono state rappresentate come parallelepipedi rettangolari di spessore  $e$ , lunghezza  $L$  e larghezza  $l$ . I ramoscelli sono stati rappresentati come cilindri rettilinei di diametro  $d$  e altezza  $h$ . Il residuo carbonioso, il contenuto di ceneri e il potere calorifico netto (NCV) sono stati misurati dal laboratorio SOCOR. Il contenuto di carbone è stato determinato mediante analisi termogravimetrica (TGA) in atmosfera inerte (azoto), dove ogni campione è stato riscaldato alla velocità di  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  tra  $30^{\circ}\text{C}$  e  $800^{\circ}\text{C}$ . I contenuti di ceneri sono stati ottenuti per calcinazione a  $550^{\circ}\text{C}$ . Gli potere calorifico inferiore (PCI) sono stati misurati secondo la norma NF EN 18 125. Il Tabella 3 presenta i risultati ottenuti. I valori ottenuti sono vicini a quelli forniti da Morandini et al [4]. Le variazioni osservate possono essere dovute alla stagione di raccolta. Infatti, Morandini et al [4] hanno raccolto arbusti di cisto durante la stagione estiva. Quest'ultimo non aveva più fiori. D'altra parte, la caratterizzazione effettuata da Morandini et al [4] è stata effettuata su un albero naturale vivo e non su rami tagliati, il che tende ad aumentare le dimensioni delle particelle.

Tabella 2 : Densità di massa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) per stadio e famiglia di particelle

Tipo di particelle	Cucciolata	Piano 1	Piano 2	Piano 3	Piano 4	Piano 5	Piano 6	Piano 7	Piano 8	
Lenzuola	148,375	0	0	0,046	0,427	0,881	0,647	1,504	2,539	
I fiori	0	0	0	0,003	0,003	0,023	0,061	0,119	0,222	
Ramoscelli	< 2 mm	0	0,178	0,273	0,767	3,593	1,893	1,371	2,306	2,771
	[2;4] mm	0	0,483	0,662	1,865	5,145	2,233	1,676	1,788	0,792
	[4;6] mm	0	2,303	1,444	2,447	4,222	0,853	0,627	0,527	0,216
	> 6mm	0	5,142	2,964	1,672	1,485	0,21	0	0	0

Tabella 3 : Proprietà termofisiche di diverse famiglie di particelle

Tipo di particelle		Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Rapporto superficie/volume $\sigma$ (m <sup>-1</sup> )	Tasso di residuo carbonioso $\chi_{char}$ (-)	Contenuto di ceneri a 550°C $\chi_{ash}$ (-)	P (kJ/kg)	PCI della fase gassosa (kJ/kg)
<b>Lenzuola</b>		241,57	2544,01	0,316	0,032	17949	11115
<b>I fiori</b>		550,42	1502,95	0,285	0,058	19548	14289
<b>Ramoscelli</b>	<b>&lt; 2 mm</b>	779,06	3425,45	0,281	0,039	18497	12930
	<b>[2 ; 4] mm</b>	865,19	1526,49	0,250	0,021	17927	12989
	<b>[4 ; 6] mm</b>	909,67	905,84	0,238	0,024	17991	13384
	<b>&gt; 6 mm</b>	895,27	612,47	0,250	0,034	18062	13169

Per completare l'analisi, il laboratorio SOCOR ha effettuato un'analisi elementare secondo lo standard NF EN ISO 16948 (Tabella 4). Le differenze di composizione tra le diverse famiglie di particelle considerate sono minime. Pertanto, abbiamo determinato una formulazione media per il combustibile solido di tipo  $CxHyOz$  I coefficienti stechiometrici sono riportati in Tabella 5.

Tabella 4 : Analisi elementare delle diverse classi di particelle per il cisto di Montpellier

Composti		C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
<b>Lenzuola</b>		52,0	6,2	33,7	1,7
<b>I fiori</b>		50,0	5,6	40,1	0,8
<b>Ramoscelli</b>	<b>&lt; 2 mm</b>	51,1	5,8	39,3	0,7
	<b>[2 ; 4] mm</b>	50,1	5,9	41,4	0,4
	<b>[4 ; 6] mm</b>	49,6	5,7	41,7	0,5
	<b>&gt; 6mm</b>	50,1	5,8	40,2	0,4

Tabella 5 : Composizione chimica media della siepe di cisto di Montpellier

C (mol)	H (mol)	O (mol)	N (mol)
4,20	5,83	2,48	0,04

Come per la siepe, sono state determinate le proprietà del riccio di pino. Il Tabella 6 e il Tabella 7 fornire i valori ottenuti.

Tabella 6 : Proprietà del legno crimpato.

Densità del materiale $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densità di massa $\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	Rapporto superficie/volume $\sigma$ (m <sup>-1</sup> )	Tasso di residuo carbonioso $\chi_{char}$ (-)	Contenuto di ceneri a 550°C $\chi_{ash}$ (-)	PCI (kJ/kg)
446	4,29	10269	18,51	0,5	18966

Tabella 7 : Analisi elementare del riccio di pino

C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
51,4	6,2	41,7	0,2

### 1.3 1.3 Stress termico dovuto alla combustione di siepi di cisto

#### 1.3.1 Fenomenologia e geometria delle fiamme

Le diverse fasi della bruciatura delle siepi di cisto sono presentate dal Figura 6. Il Tabella 8 presenta le quantità di interesse osservate durante la combustione di queste coperture. Gli esperimenti iniziano con la propagazione del fronte di fuoco nel riccio di legno. L'accensione della siepe avviene tra 10 s e 21 s, il che corrisponde a velocità di propagazione medie comprese tra 9,1 e 20,0 cm/s. Questi risultati sono coerenti con il lavoro di de Cheney et al [5] e di Cheney e Gould [6] hanno condotto una ricerca su parcelle erbose con altezze del combustibile di 0,1-0,6 m (velocità di propagazione tra 2 e 200 cm/s). Le differenze osservate tra le prove sono dovute principalmente alle caratteristiche del vento degli esperimenti (Tabella 1). L'accensione della siepe avviene per contatto del fronte di fiamma con i rami del cisto. La posizione orizzontale dell'accensione varia tra le prove, soprattutto a causa del vento. Il fronte di fuoco si diffonde quindi all'interno della siepe. Poiché le particelle più fini si trovano nella parte superiore della siepe, questa area viene consumata per prima, seguita dalla parte inferiore dove si concentrano le particelle più spesse. Il tempo di permanenza della fiamma all'interno della siepe variava tra 80 e 109 s. Le fiamme hanno raggiunto un'altezza compresa tra i 3,0 e i 4,0 m per le siepi alte 1 m e hanno superato i 4,1 m per le siepi alte 2 m. Questi valori sono in accordo con i dati trovati in letteratura per la combustione della vegetazione su scala di campo [7-10]. Per quanto riguarda l'avanzamento delle fiamme rispetto alla siepe, si sono registrati valori superiori a 3,3 m. Una volta spente le fiamme, si osserva una fase di combustione lenta. Alla fine degli esperimenti, quasi tutto il carburante è stato consumato.

Tabella 8 : Valori caratteristici della bruciatura delle siepi

Prova n.	Tempo di propagazione (s)	Tempo di residenza della fiamma (s)	Velocità di propagazione (cm/s)	$H_F$ max (m)	$L_F$ max (m)	$A_V$ max (m)	$\beta$ media (°)
1	10	80	20,0	3,6	4,7	3,3	45,7° (±11,5)
2	19	89	10,5	3,8	5	3,4	55,0° (±15,2)
3	21	109	9,5	> 4,1	> 4,9	> 3,0	45,8° (±10,2)
4	19	71	10,5	4,0	5,2	3,6	60,3° (±14,5)
5	18	93	11,1	3,0	4,0	3,3	48,9° (±17,2)
6	18	71	11,1	3,4	4,6	3,4	50,0° (±20,7)
7	22	98	9,1	4,0	5,0	3,6	71,9° (±23,7)



Figura 6 : Fotografie della combustione di una siepe alta 1 m (Test 1) a) Diffusione del fuoco nel riccio di legno (t = 1 s) b) Accensione della siepe (t = 5 s) c) Bruciatura della siepe (t = 19 s) d) Bruciatura delle particelle più spesse (t = 61 s).

### 1.3.2 Flussi ricevuti a 3 m dalle coperture

I flussi registrati a 3 m dalle siepi sono presentati dalla tabella Figura 7 (6 m x 1 m x 1 m di siepe - prova 2) e dal Figura 8 (siepe di 6 m x 2 m x 1 m - prova 3). Per tutti gli esperimenti, i flussi di calore sono nulli fino all'accensione della siepe, che funge da schermo durante la propagazione dell'incendio della lettiera. Una volta accesa la siepe, i flussi registrati aumentano rapidamente fino a un massimo e poi diminuiscono lentamente fino allo spegnimento del fuoco. Il Tabella 9 mostra i flussi massimi registrati per le diverse configurazioni a 3 m dalle siepi. Per tutti i test, i flussi totali sono molto più alti dei flussi radiativi, a dimostrazione che le fiamme hanno raggiunto i sensori. Le sollecitazioni termiche più elevate sono state registrate al centro della

siepe. Data la forma delle curve, abbiamo deciso di calcolare il tempo di esposizione per diverse soglie di flusso: 5, 8, 12, 15 e 30 kW/m<sup>2</sup> al centro della siepe e a 1,5 m di altezza (Tabella 10). In base alle soglie di danno indicate in [11], le sollecitazioni termiche generate dalla combustione delle siepi avrebbero danneggiato i materiali rigidi in PVC, ma non sarebbero state sufficienti a danneggiare o incendiare l'abete e la quercia.

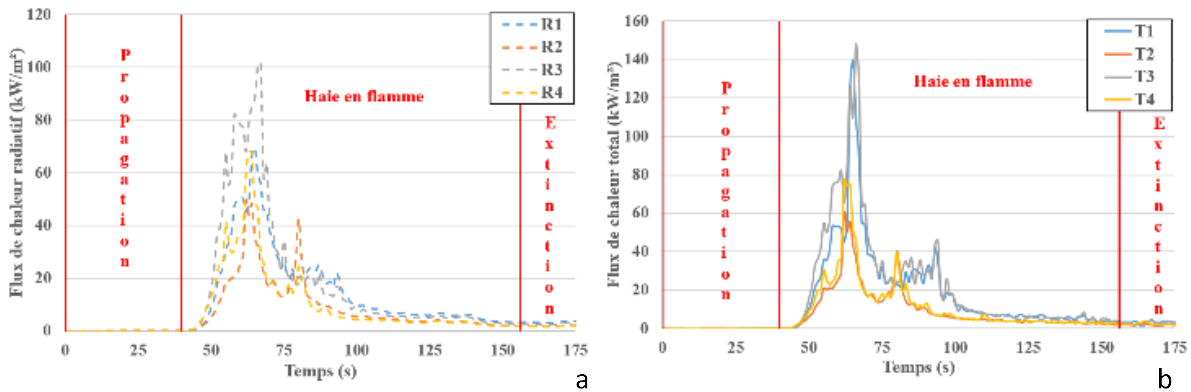


Figura 7 : a) Flussi radiativi e (b) Flussi totali misurati a 3 m durante la prova 2 (6 m x 1 m x 1 m di siepe)

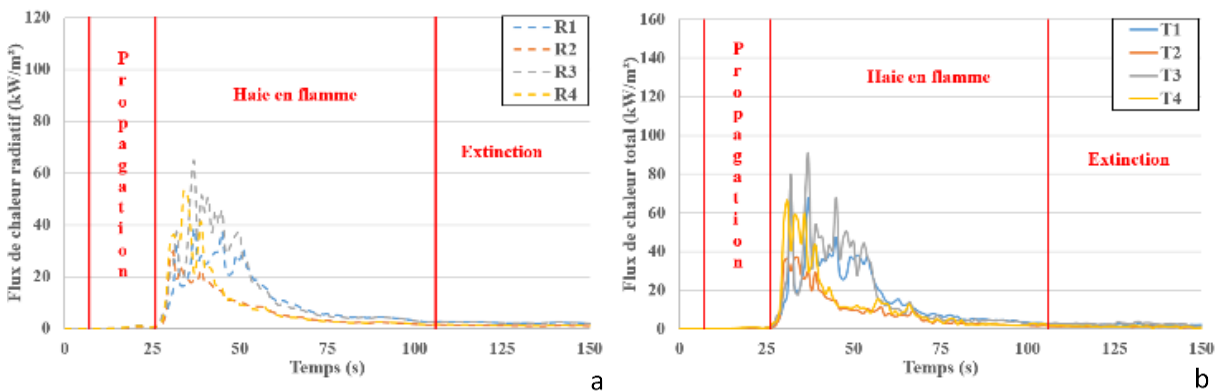


Figura 8 : a) Flussi radiativi e b) flussi totali misurati a 3 m durante la prova 3 (siepe di 6 m x 2 m x 1 m)

Tabella 9 : Flussi radiativi e totali massimi registrati a 3 m dalla siepe

	6 m x 1 m x 1 m di siepe	6 m x 2 m x 1 m di siepe	4 m x 1 m x 1 m di siepe
<b>Flusso radiante massimo a 3 m (kW/m<sup>2</sup>)</b>	64,3	101,8	52,9
<b>Flusso totale massimo a 3 m (kW/m<sup>2</sup>)</b>	90,2	148,0	90,3

Tabella 10 : Tempo medio di esposizione per diverse soglie di flusso a 3 m dalla siepe, al centro e a 1,5 m di altezza.

Flusso (kW/m <sup>2</sup> )	Tempo di esposizione (s)					
	6 m x 1 m x 1 m di siepe		6 m x 1 m x 1 m di siepe		6 m x 1 m x 1 m di siepe	
	Radiativo	Radiativo	Radiativo	Radiativo	Radiativo	Radiativo
<b>5</b>	46,5	55,5	83,0	89,0	41,0	49,0
<b>8</b>	37,0	45,5	53,0	62,0	32,0	36,2
<b>12</b>	28,5	36,5	46,0	51,0	22,0	29,0
<b>15</b>	26,5	30,5	22,0	59,0	19,0	24,5
<b>30</b>	13,0	17	20,0	31,0	8,2	12,5
<b>Possibili danni</b>	PVC rigido					

## 2 Ricostruzione di un incendio di vegetazione che colpisce un edificio

### 2.1 Caso delle siepi

#### 2.1.1 2.1.1 Dispositivo sperimentale

Per analizzare l'impatto della combustione delle piante sugli elementi edilizi, abbiamo riprodotto una configurazione di incendio che arriva su un edificio all'interfaccia foresta/casa. A questo scopo, abbiamo utilizzato la piattaforma di sperimentazione, sensibilizzazione e formazione sui rischi di incendio alle interfacce (EXPLORII), le cui caratteristiche sono descritte in dettaglio nel deliverable T1.3.1. Il Figura 9 presenta l'impostazione sperimentale utilizzata. Per completare gli esperimenti presentati sopra, abbiamo iniziato con lo studio di una siepe di cisto lunga 6 metri e larga 1 metro. La siepe ricostituita da rami di cisto tagliati è stata posta sulla cella di pesatura posizionata a 3 m dalla costruzione. Sono state considerate due altezze di siepe: 1 m e 2 m. I trucioli di legno sono stati collocati in modo omogeneo con un carico di 1 kg/m<sup>2</sup> sulla pendenza di 20° di fronte alla casa, su una superficie di 5 m di lunghezza e 6 m di larghezza, per consentire l'accensione della siepe. Come negli esperimenti precedenti, per ogni esperimento sono state misurate le condizioni atmosferiche e il contenuto d'acqua dei combustibili. Per la velocità e la direzione del vento abbiamo utilizzato un anemometro sonico 2D situato a 2 m di altezza. Per la direzione del vento, l'angolo 0° corrisponde al nord. Una direzione del vento di 110° corrisponde a un vento nell'asse della pendenza verso l'edificio. La geometria del fronte di fiamma è stata determinata con l'ausilio delle telecamere poste lateralmente al dispositivo, utilizzando le grandezze definite dalla Figura 4.

Sulla facciata esposta al fuoco sono presenti tre finestre con doppi vetri di 60 cm di larghezza e 95 cm di altezza, realizzate in legno, PVC e alluminio. Queste finestre possono essere protette da persiane in legno, PVC o alluminio. Per misurare la densità del flusso di calore che potrebbe avere un impatto sulle finestre, sono state posizionate due coppie di misuratori di flusso radiativo e totale tra le finestre, come illustrato in Figura 9. Due telecamere digitali con una frequenza di 1 fotogramma al secondo sono state posizionate sul lato dell'edificio per osservare la geometria del fronte di fiamma. Una GoPro è stata posizionata su un albero telescopico in fondo al pendio per osservare la parte posteriore del fronte dell'incendio. La Tabella 11 mostra tutte le caratteristiche degli esperimenti effettuati.

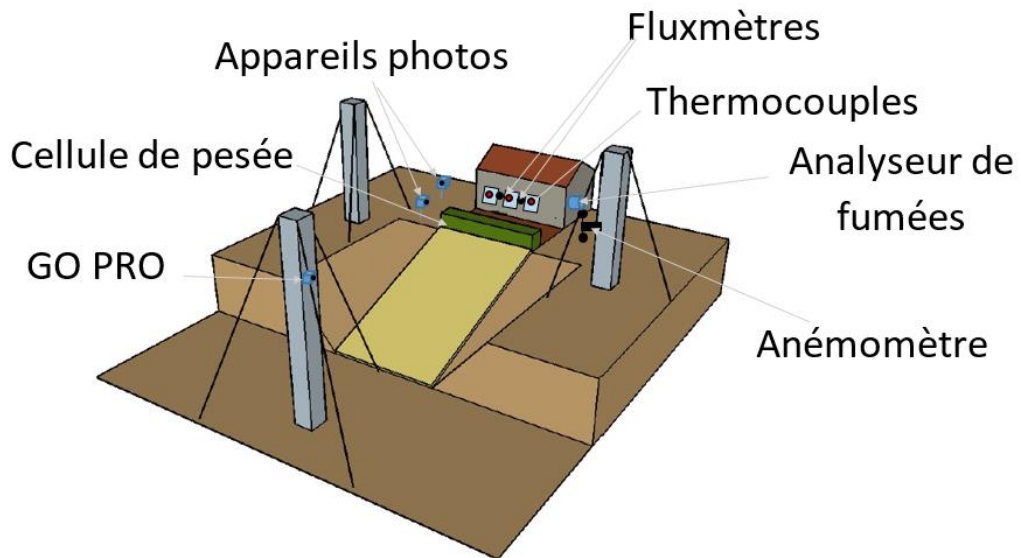


Figura 9 : Dispositivo sperimentale per la ricostruzione di un incendio di vegetazione che colpisce un edificio

Tabemlla 10 : Caratteristiche degli esperimenti effettuati per rappresentare un incendio selvaggio che impatta su un edificio con una siepe di cisto da solo

	Test 8	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13
<b>Dimensioni della siepe (m × m × m)</b>	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 1 × 1	6 × 2 × 1	6 × 2 × 1
<b>Contenuto d'acqua siepe (%)</b>	8,7	18,0	10,6	10,6	2,7	2,7
<b>Contenuto di acqua di frittura (%)</b>	6,1	6,1	5,2	5,2	11,8	11,8
<b>Tipo di otturatore</b>	Alluminio	Legno	PVC	Senza aletta	Alluminio, legno e PVC	Senza aletta
<b>Velocità media del vento (m/s)</b>	2,1	2,8	1,2	1,8	0,5	1,3
<b>Direzione media del vento (m/s)</b>	157,8	154,0	143,8	123,4	188,2	173,3
<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	17,7	18,9	22,6	22,0	24,7	30,2
<b>Umidità relativa ambientale (%)</b>	34,8	54	44,6	48,9	64,6	47,7

## 2.1.2 2.1.2 Impatto del fuoco sulla costruzione

Per quanto riguarda le siepi senza costruzione, si riscontrano le tre fasi della combustione: propagazione nel ricciolo, combustione della siepe ed estinzione (Figura 10 e Figura 11). Il Tabella 12 riassume le principali grandezze misurate durante i test. Gli esperimenti iniziano con la propagazione del fronte di fuoco nel riccio di legno che porta all'accensione della siepe per contatto diretto ( $t=0$  s). Una volta accesa, il tasso di perdita di massa della siepe aumenta rapidamente fino a raggiungere un picco variabile tra 0,8 e 4,2 kg/s a seconda dell'esperimento, per poi diminuire fino alla totale estinzione (Figura 12). Le variazioni osservate tra gli esperimenti sono dovute principalmente alla velocità e alla direzione del vento, che cambiano tra le prove, e al contenuto d'acqua dei combustibili. Le sollecitazioni termiche più intense si verificano durante il picco di perdita di massa (Figura 13). Durante questa fase, la potenza massima calcolata in base alla perdita di massa, considerando un potere calorifico di 18.413,6 kJ/kg [12], è compresa tra 15,3 e 27,2 MW per le siepi alte 1 m e tra 51,0 e 77,0 MW per le siepi alte 2 m. Raddoppiando l'altezza delle siepi, la potenza massima è aumentata di almeno 2,8 volte. I flussi massimi registrati a livello dell'edificio variano tra 14,7 e 33,7 kW/m<sup>2</sup> per il flusso radiativo e tra 16,8 e 46,4 kW/m<sup>2</sup> per il flusso totale per siepi alte 1 m. Per le siepi alte 2 m, abbiamo ottenuto valori compresi tra 38,8 e 64,5 kW/m<sup>2</sup> per il flusso radiativo e tra 56,5 e 120,3 kW/m<sup>2</sup> per il flusso totale. Nonostante questi flussi elevati, va notato che la combustione della siepe non dura a lungo (tempo di residenza della fiamma inferiore a 80 s). Per quanto riguarda la geometria del fronte di fiamma, le lunghezze massime della fiamma variavano tra 3,6 e 6,3 m per le siepi di 1 m e tra 6,7 e 6,8 m per le siepi di 2 m. In entrambi i casi, le fiamme si estendono ben oltre la base del tetto. D'altra parte, la presenza della casa tende a raddrizzare le fiamme (angolo al suolo compreso tra 54,6 e 64,4°) impedendo alle fiamme di raggiungere direttamente la facciata nel caso di siepi di 1 m. Questa è una differenza importante osservata tra gli esperimenti con le sole siepi e le bruciature sulla piattaforma EXPLORII. Le osservazioni successive all'incendio hanno mostrato che per le siepi di 1 m sono state danneggiate solo le persiane in PVC (Figura 14). Le lamelle erano effettivamente leggermente deformate. Questa osservazione è coerente con la temperatura misurata sugli otturatori, ovvero 167,6°C (Figura 15). Questo valore è superiore alla temperatura a cui si perdono le proprietà meccaniche del PVC, ovvero 75°C [11]. Va notato, tuttavia, che l'otturatore svolge un ruolo protettivo per il vetro, in quanto la temperatura sul lato dell'otturatore non supera i 31°C. Per le siepi di 2 m, abbiamo osservato deformazioni delle persiane in PVC, bruciature (non durature) della persiana in legno e crepe del vetro esterno della finestra in legno.



Figura 10 : Fotografie delle fasi di combustione di una siepe di 6 m × 1 m × 1 m (Prova 8) a) Accensione della siepe da parte del fronte di fiamma ( $t=1$  s) b) Bruciatura della siepe ( $t=17$  s) c) Combustione delle particelle più spesse ( $t=32$  s)





Figura 11 : Fotografie delle fasi di combustione di una siepe di  $6\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$  (Prova 13) a) Accensione della siepe da parte del fronte di fiamma ( $t=2\text{ s}$ ) b) Bruciatura della siepe ( $t=14\text{ s}$ ) c) Combustione delle particelle più spesse ( $t=62\text{ s}$ )

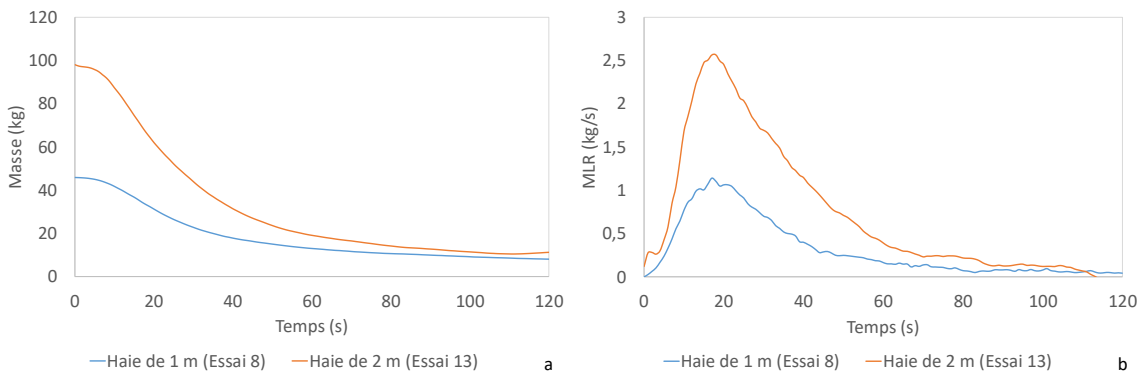


Figura 12 : a) Perdita di massa b) Derivata della perdita di massa (MLR) - della siepe per le prove 8 e 13

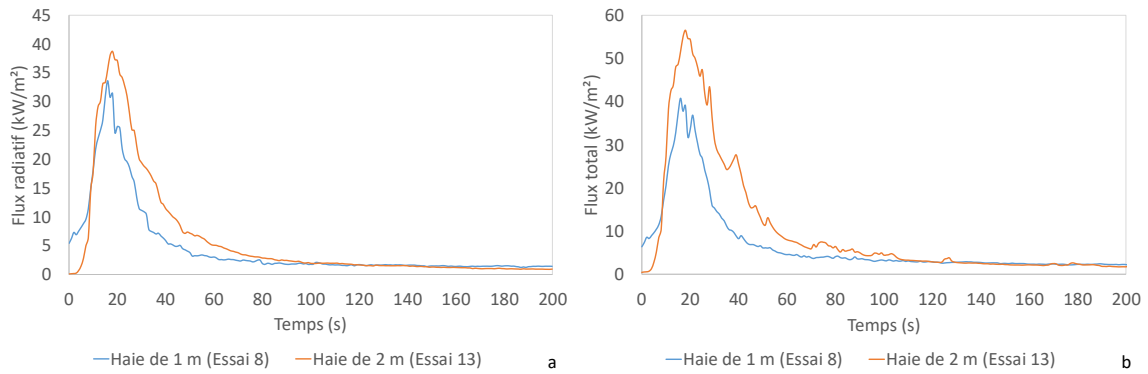


Figura 13 : Flussi termici registrati sulla facciata esposta a) Flussi radiativi b) Flussi totali



Figura 14 : Danni osservati con una siepe di a)  $6\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  - b e c)  $6\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$

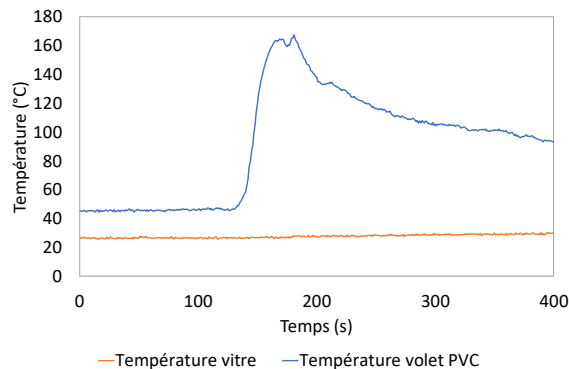


Figura 15 : Temperature misurate sull'avvolgibile in PVC e sul vetro della finestra nel test 10

Tabella 11 : Valori misurati durante i test con le sole siepi sulla piattaforma EXPLORII

	Test 8	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13
<b>MLR di picco (kg/s)</b>	1,2	0,9	0,8	1,5	4,2	2,8
<b>Perdita di massa (kg)</b>	44,3	41,8	47,9	44,9	91,5	89,7
<b>Potenza massima (MW)</b>	22,3	17,2	15,3	27,2	77,0	51,0
<b>Temperatura massima sulla facciata esposta (°C)</b>	132,1	277,8	167,6	184,9	273,5	98,1
<b>Flusso radiante massimo sulla facciata esposta (kW/m<sup>2</sup>)</b>	33,7	19,1	14,7	33,3	63,5	38,8
<b>Flusso totale massimo sulla facciata esposta (kW/m<sup>2</sup>)</b>	46,6	26,7	16,8	46,4	120,3	56,5
<b><math>H_F</math> max (m)</b>	4,0	2,8	4,7	4,8	5,3	5,7
<b><math>L_F</math> max (m)</b>	4,6	3,6	5,0	6,3	6,8	6,7
<b><math>A_V</math> max (m)</b>	3,4	2,5	2,2	4,9	4,5	4,8
<b><math>\beta</math> media (°)</b>	58,3 (± 12,8)	61,6 (± 14,4)	64,4 (± 14,1)	54,6 (± 11,8)	51,2 (± 12,0)	55,5 (± 12,0)
<b>Danno osservato</b>	Nessun danno	Nessun danno	Lame di tapparelle in PVC deformate	Nessun danno	Persiana in PVC deformata, persiana in legno bruciata sul lato esposto	Vetro esterno diviso

## 2.2 Casi con alberi

### 2.2.1 Dispositivo sperimentale

Anche gli esperimenti con gli alberi sono stati condotti sulla piattaforma EXPLORII. Le piante studiate sono le seguenti:

- 6 m × 1 m × 1 m di siepe di cisto ricostituita con un carico volumetrico di 8 kg/m<sup>3</sup> con 1 o 3 cipressi nella siepe
- Cipressi singoli (chioma densa con elevata biomassa)
- Un singolo albero di bagolaro (chioma aerata con bassa biomassa)

Le siepi di cipresso sono state illuminate come le siepi da sole, cioè con trucioli di legno (carico di 1 kg/m<sup>2</sup>) su un'area di 5 m di lunghezza e 6 m di larghezza. Per i soli cipressi, l'accensione è stata effettuata anche mediante propagazione in trucioli di legno con un carico di 1 kg/m<sup>2</sup>. L'albero di bagolaro, invece, è stato illuminato ponendo 2 kg di trucioli alla sua base.

Durante le bruciature di un singolo albero (anch'esso situato a 3 m dalla facciata), il set-up sperimentale della piattaforma EXPLORII è stato completato da (Figura 16) : Un banco di quattro termocoppie posizionate a pochi centimetri dalla chioma in modo da seguire la variazione di temperatura emessa dalle fiamme a diverse altezze della chioma.

Due flussimetri posizionati su entrambi i lati dell'albero (cioè perpendicolari al vento e alla direzione delle fiamme), a 3 m dalla chioma e a un'altezza di 1,70 m per registrare il flusso totale e il flusso radiativo emesso durante l'incendio.

Sono stati registrati anche il tempo di accensione della chioma, il tempo per raggiungere la cima della chioma (o l'altezza massima raggiunta dalle fiamme quando non è stato possibile completare la combustione) e la durata totale della fiamma. La velocità di propagazione della fiamma (VSR) è stata misurata anche in base al tempo di accensione della sommità della chioma.

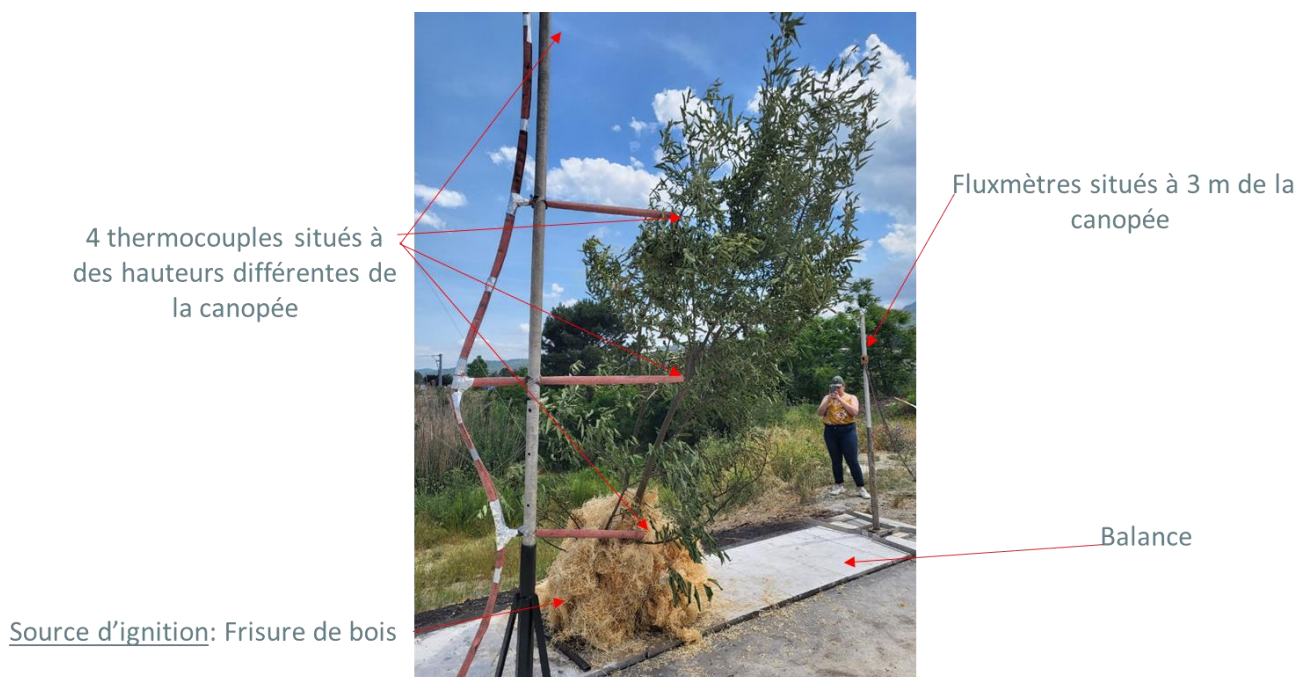


Figura 16 : Set-up sperimentale per la combustione di un singolo albero

Tabella 12 : Caratteristiche degli esperimenti eseguiti per rappresentare un incendio selvaggio che impatta su un edificio con alberi

	Test 14	Test 15	Test 16	Test 17	Test 18
<b>Dimensioni della siepe (m × m × m)</b>	6 × 1 × 1	-	-	6 × 1 × 1	-
<b>Alberi: tipo, massa, altezza e chioma</b>	1 cipresso 10,8 kg 3,26 m × 0,5 m × 0,3 m	1 bagolaro 9,9 kg, 3,61 m × 1,7 m × 0,9 m	1 cipresso 51 kg, 3,1 m × 1,3 m × 1,1 m	3 cipressi Cipresso 1: 11,3 kg, 3,2 m × 0,6 m × 0,6 m Cipresso 2: 12,3 kg, 3,6 m × 0,4 m × 0,35 m Cipresso 3: 8,36 kg di 3,4 m × 0,3 m × 0,25 m	1 cipresso 153 kg, 2,7 m × 1,0 m × 0,9 m
<b>Modalità di accensione</b>	6 m × 5 m di letto di aggraffatura (carico 1 kg/m <sup>2</sup> )	2 kg di curl sul piede	3,1 m × 3,65 m letto di aggraffatura (carico 1 kg/m <sup>2</sup> )	6 m × 5 m di letto di aggraffatura (carico 1 kg/m <sup>2</sup> )	3 m × 3 m lettiera crespa
<b>Densità apparente della corona (kg/m<sup>3</sup>)</b>	3,71	1,23	6,63	3,71	6,63 (10,36*)
<b>Contenuto d'acqua siepe (%)</b>	5,4	-	-	8,5	-
<b>Contenuto d'acqua dell'albero (%)</b>	28,3	45,0	50,7	42,0	136,9 (12,1*)
<b>Contenuto di acqua di frittura (%)</b>	11,2	11,2	11,2	7,3	7,3
<b>Tipo di otturatore</b>	Alluminio				
<b>Velocità media del vento (m/s)</b>	2,1	2,8	2,2	1,6	3,9
<b>Direzione media del vento (m/s)</b>	139,3	136,3	133,4	130,6	144,1
<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	25,3	29,5	26,5	24,8	28,8
<b>Umidità relativa ambientale (%)</b>	42,7	44,1	57,0	52,5	53,3

\* : Valore ottenuto sul combustibile morto nella chioma degli alberi

## 2.2.2 Combustione di impianti e impatto sulla costruzione

Il Figura 17 mostra le diverse fasi di combustione degli impianti testati. Le maggiori perdite di massa si sono verificate negli esperimenti con le siepi. Per questi test, come in precedenza, il MLR aumenta rapidamente una volta accesa la siepe fino a raggiungere un picco (da 1,4 a 1,5 kg/s) e poi diminuisce fino all'estinzione. Per i singoli alberi, la perdita di massa è meno importante, ma l'MLR mostra un plateau tra 0,2 e 0,8 kg/s a seconda del test (Figura 18).



Figura 17 : Fotografie delle fasi di combustione per a) Prova 14 b) Prova 15 c) Prova 16 d) Prova 17 e e) Prova 18

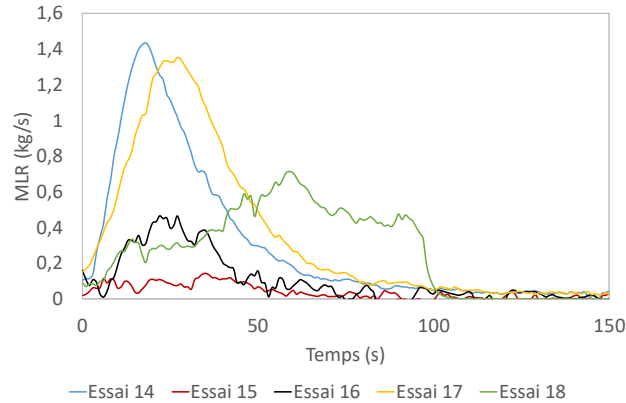


Figura 18 : Derivazione della perdita di massa per gli esperimenti sugli alberi

Come nel caso delle sole siepi, l'impatto maggiore sull'edificio si verifica nel momento di massima perdita di massa. I flussi radianti misurati sulla facciata esposta variano tra 5,1 e 19,3 kW/m<sup>2</sup> per i soli alberi e tra 19,3 e 57,0 kW/m<sup>2</sup> per le siepi con cipressi. Per il flusso totale, i valori variano tra 8,0 e 23,8 kW/m<sup>2</sup> per i soli alberi e tra 23,8 e 80,7 kW/m<sup>2</sup> per le siepi con cipressi. La temperatura delle persiane in alluminio non ha superato i 109,2°C. Non sono stati osservati danni all'edificio. I flussi radiativi e totali registrati sul lato del dispositivo erano inferiori a quelli ricevuti dagli otturatori a causa della loro posizione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'incendio. I valori più alti (8,1 kW/m<sup>2</sup>) sono stati osservati per il cipresso con la biomassa più grande (prova 18). Per questo albero, la velocità di propagazione della fiamma nella chioma era molto più bassa (0,036 m/s) rispetto agli altri alberi. Ciò si spiega con l'alta densità apparente di foglie nella chioma, soprattutto di quelle morte, che diminuisce l'aerazione della chioma e quindi la propagazione dell'incendio. Non è stato possibile ottenere valori di temperatura perché l'albero è crollato prima della fine della combustione, schiacciando la barra della termocoppia. Inoltre, le temperature massime della fiamma nella chioma erano molto più alte (>500°C) rispetto a quelle registrate sugli otturatori situati a 3 m dall'albero. La chioma più aerata (Micocoulier) ha impiegato più tempo per accendersi (11 s) rispetto alla chioma più densa del cipresso. La durata della fiamma (così come il tempo di accensione della chioma) è stata più lunga (164 s) per il cipresso più grande, a causa della sua biomassa molto elevata e dell'alta densità apparente. Alla fine, i tassi di combustione della biomassa più elevati sono stati osservati nelle prove che accoppiavano uno (o più) alberi alla siepe, con bruciature complete o quasi complete della chioma.

Tabella 13 : Valori misurati durante i test sugli alberi sulla piattaforma EXPLORII (-: non misurati)

	<b>Test 14</b>	<b>Test 15</b>	<b>Test 16</b>	<b>Test 17 (3 alberi)</b>	<b>Test 18*</b>
<b>Ritardo di accensione dell'albero (s)</b>	3	11	4	7-44	8
<b>Tempo totale di accensione (s)</b>	33	65	214	51-53	164
<b>Ritardo di accensione della calotta superiore (s)</b>	17	31	23	14-38	75
<b>MLR di picco (kg/s)</b>	1,5	0,2	0,6	1,4	0,8
<b>Perdita di massa (kg)</b>	49,6	5,7	15,8	57,3	40,5
<b>Biomassa consumata albero (%)</b>	90	50	45	100	85
<b>Temperatura massima della fiamma (°C)</b>	-	905	732.3	-	-
<b>Temperatura massima registrata sulle persiane in alluminio (°C)</b>	109,2	42,7	41,1	87,9	59,7
<b>Flusso totale massimo a 3 m perpendicolarmente alle fiamme (kW/m<sup>2</sup>)</b>	-	4,3	6,2	-	8,1
<b>Flusso radiativo massimo a 3 m perpendicolarmente alle fiamme (kW/m<sup>2</sup>)</b>	-	3,5	5,2	-	6,2
<b>Flusso radiante massimo sulla facciata esposta (kW/m<sup>2</sup>)</b>	57,0	6,1	5,1	19,3	7,4
<b>Flusso totale massimo sulla facciata esposta (kW/m<sup>2</sup>)</b>	80,7	6,6	8,0	23,8	12,0
<b><math>H_F</math> max (m)</b>	4,4	3,8	4,4	4,4	3,2
<b><math>L_F</math> max (m)</b>	5,8	4,1	5,0	5,0	3,6
<b><math>A_V</math> max (m)</b>	3,8	1,5	2,8	2,8	1,9
<b><math>\beta</math> media (°)</b>	50,3 (± 9,7)	59,2 (± 15,0)	59,9 (± 12,5)	59,86 (± 12,5)	73,3 (± 13,1)
<b>Danno osservato</b>	Nessun danno				

### 2.2.3 Fumi

Il Figura 19 mostra l'evoluzione della concentrazione di monossido di carbonio (CO) all'interno e all'esterno dell'edificio per la prova 18. Al momento dell'accensione del cipresso indicato con (1) nella figura, si verifica un aumento della concentrazione di monossido di carbonio all'esterno dell'edificio (fase (2)) che raggiunge i 280 ppm. Le fluttuazioni osservate sul Figura 19 Le fluttuazioni osservate all'esterno sono dovute principalmente alle variazioni del vento durante l'esperimento. Quando la ventilazione meccanica controllata (CMV) è stata attivata nella casa, i fumi sono entrati nell'edificio (fase (3) nella figura) raggiungendo un massimo di circa 14 ppm dopo 700 s. Il picco di emissione si verifica quindi dopo lo spegnimento del fronte di fiamma durante la combustione del residuo carbonioso. Il limite IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) determinato dal NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health - USA) per il CO è di 1200 ppm per un'esposizione di 30 minuti. Pertanto, le concentrazioni misurate all'interno o all'esterno dell'abitazione non sono sufficienti per avere un effetto irreversibile sull'uomo.

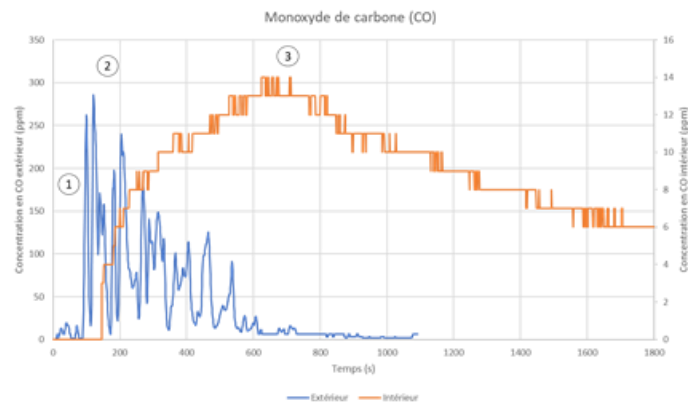


Figura 19 : Concentrazione di monossido di carbonio misurata all'esterno e all'interno dell'edificio durante il test 18

## 3 Raccomandazioni per la sistemazione del paesaggio e la scelta dei materiali

Sulla base dei risultati degli esperimenti della piattaforma EXPLORII, abbiamo visto che le siepi sono le piante che possono avere il maggiore impatto su un edificio. Sulla base dei danni osservati durante i test effettuati sulla piattaforma, possiamo raccomandare le seguenti misure per ridurre la vulnerabilità degli edifici agli incendi selvaggi

- Installazione di tapparelle sistematiche sulle facciate che possono essere esposte a un incendio di vegetazione.
- Sostituzione degli infissi in PVC e legno con infissi in alluminio.
- Rimuovere i materiali combustibili dalle parti inferiori del tetto (grondaie o canali di scolo) per le case a un piano, poiché le fiamme raggiungono queste aree.
- Spegner la ventilazione meccanica controllata (CMV) in caso di incendio per evitare che il fumo entri in casa.

Per quanto riguarda la distanza di sicurezza senza vegetazione intorno all'edificio, una distanza di 3 m sembra essere sufficiente per alberi singoli in caso di venti inferiori a 4 m/s. Per siepi di 1 m di altezza e 1 m di larghezza, il danno all'edificio al piano terra è basso. Tuttavia, le fiamme raggiungono le parti inferiori del tetto



per venti inferiori a 3 m/s. Per evitare ciò, sarebbe opportuno aumentare la distanza di sicurezza ad almeno 5 metri. Tuttavia, queste osservazioni sono valide solo per una casa a un piano e possono essere diverse per un edificio a più piani. Con siepi alte 2 m e larghe 1 m, una distanza di 3 m non è sufficiente. Poiché la propagazione delle fiamme può raggiungere i 4,8 m con venti molto leggeri, sembra necessario imporre una distanza di almeno 6 m per queste siepi. Tuttavia, questi valori devono essere confermati per condizioni di temperatura e vento vicine a quelle tipiche dell'estate.

## Riferimenti

- [1] International Association of Wildland Fire | Wild Fire Management Experts, International Association of Wildland Fire. (n.d.). <https://www.iawfonline.org/> (accessed July 3, 2019).
- [2] M. Gollner, R. Hakes, S. Caton, K. Kohler, Pathways for Building Fire Spread at the Wildland Urban Interface, 2015.
- [3] P. Vacca, D. Caballero, E. Pastor, E. Planas, WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level, *Journal of Safety Science and Resilience* 1 (2020) 97–105.
- [4] F. Morandini, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, W.E. Mell, Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions, *Fire Safety Journal* 108 (2019) 102836
- [5] N. Cheney, J. Gould, W. Anderson, The Influence Of Fuel, Weather And Fire Shape Variables On Fire-Spread In Grasslands, *International Journal of Wildland Fire* 3 (1993) 228
- [6] N. Cheney, J. Gould, Fire Growth in Grassland Fuels, *International Journal of Wildland Fire* 5 (1995) 237-247.
- [7] F. Morandini, X. Silvani, L. Rossi, P.-A. Santoni, A. Simeoni, J.-H. Balbi, J. Louis Rossi, T. Marcelli, Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties, *Fire Safety Journal* 41 (2006) 229–235
- [8] X. Silvani, F. Morandini, Fire spread experiments in the field: Temperature and heat fluxes measurements, *Fire Safety Journal* 44 (2009) 279–285
- [9] F. Morandini, X. Silvani, Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires, *International Journal of Wildland Fire* 19 (2010) 570–582.
- [10] M.G. Cruz, B.W. Butler, D.X. Viegas, P. Palheiro, Characterization of flame radiosity in shrubland fires, *Combustion and Flame* 158 (2011) 1970–1976.
- [11] G. Augin, A. Rabilloud, E. Guillaume, Plan de prévention des risques technologiques - Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique (No. E-ING-07/564b-GA/AR). Efectis France et Laboratoire national de métrologie et d'essais. 2008
- [12] K. Meerpoel-Pietri, Prédiction de la vulnérabilité des constructions lors des incendies à l'interface milieu naturel/constructions, tesi di dottorato Università della Corsica, 29 novembre 2021