



**Interreg**



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional



INTERMED

## Livrable T1.3.3 :

# Rapport sur les sollicitations thermiques reçues par les constructions, la production et circulation de fumées et le comportement du feu dans la végétation d'interface pour les différents scenarii simulés

Rapport réalisé par l'Université de Corse, juillet 2022

Rédaction : Virginie TIHAY-FELICELLI, Yolanda PEREZ-RAMIREZ, Anthony  
GRAZIANI e Paul-Antoine SANTONI



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

## Table des matières

Introduction.....	3
1 Modélisation de la combustion de haies de ciste seules .....	4
1.1 Rappel du dispositif expérimental.....	4
1.2 Configuration numérique pour la combustion des haies seules .....	5
1.3 Résultats numériques .....	6
2 Modélisation des expériences réalisées sur la plateforme EXPLORII avec des haies .....	7
2.1 Rappel du dispositif expérimental.....	7
2.2 Configuration numérique pour la modélisation de la plateforme EXPLORII.....	8
2.3 Résultats numériques .....	9
3 Modélisation d'un scénario d'incendie en interface forêt/habitat .....	11
3.1 Définition des scenarii .....	11
3.2 Configuration numérique d'un scénario en interface forêt/habitat.....	12
3.3 Résultats numériques .....	13
Conclusion .....	19
Références .....	19

## Introduction

Ce rapport fait suite au rapport 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, réalisé dans le cadre du projet INTERMED. Ce dernier a présenté les résultats expérimentaux obtenus sur la caractérisation des sollicitations thermiques engendrées par la combustion de haie de végétaux ainsi que sur les préconisations pour l'aménagement paysager et le choix des matériaux pour réduire la vulnérabilité des constructions aux interfaces forêt/habitat. Compte tenu de la configuration de la plateforme d'EXpérimentations, de sensibiLisation et de fORMation aux Risques Incendies dans les Interfaces, il n'a pas été possible d'étudier des feux de végétation avec des vents moyens ou forts ainsi qu'avec différents aménagements paysagers. Les expériences ont été uniquement réalisées en régime de brise (vent modéré). Nous avons donc voulu créer des scenarii numériques de feu au niveau d'une interface forêt/habitat pour poursuivre l'étude de la vulnérabilité des constructions dans les zones d'interface. Pour s'assurer que les prédictions numériques étaient fiables, nous avons travaillé en 3 phases. Tout d'abord, nous avons modélisé la combustion d'une haie de ciste seule afin de valider le modèle numérique de la haie à l'échelle du terrain. Nous avons ensuite modélisé les expériences réalisées sur la plateforme EXPLORII impliquant des haies afin de valider le code en présence d'une pente et d'un bâtiment. Enfin, des scénarii ont été implantés dans le code de calcul. Ce rapport synthétise l'état d'avancement de ces travaux numériques effectués avec le logiciel **Wildland-Urban Interface Fire Dynamic Simulator (WFDS)**. Ce code est basé sur FDS [1] (Fire Dynamics Simulator), développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) pour prédire les incendies en milieu confiné. Ce code modélise la végétation en feu à travers une approche de milieu poreux [2]. Au cours de la dernière décennie, le code a été largement utilisé pour simuler différents types de feux de végétation allant de la combustion d'aiguilles de pin à l'échelle du laboratoire aux feux de végétation à l'échelle du terrain [3-7]. WFDS résout un problème en phases solide et gazeuse sur un domaine numérique discrétisé avec un maillage cartésien en utilisant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La phase gazeuse turbulente est modélisée avec une approche de simulation aux grandes échelles (LES) et une formulation à faible Mach des équations de Navier-Stokes. La phase solide est représentée par une approche « Fuel Element » (FE) qui consiste à modéliser la végétation surélevée sous forme de particules lagrangiennes statiques de différentes tailles et propriétés réparties dans un volume représentatif des végétaux. Les transferts de chaleur, la force de traînée et la dégradation thermique pour chaque particule de végétation sont approximés par une approche unidimensionnelle (éléments thermiquement minces). La dégradation du combustible solide est représentée par un mécanisme en trois étapes comprenant la déshydratation, la pyrolyse et l'oxydation du résidu carbonneux. Chaque étape est modélisée par une loi d'Arrhenius. La combustion du gaz de pyrolyse est simplifiée par une équation de combustion en une seule étape d'un combustible  $C_xH_yO_z$ . Enfin, le rayonnement est modélisé ainsi que son interaction phase gazeuse/phase solide. Plus de détails sur le solveur sont disponibles dans l'article de Mell et coll. (2009) [3].

La première partie de ce rapport présente tout d'abord la modélisation de la combustion des haies seules à plat. La deuxième partie décrit la modélisation des expériences effectuées sur EXPLORII. Enfin, la dernière partie présente les modélisations de scenarii d'interface forêt/habitat et donne des préconisations sur l'aménagement paysager.

# 1 Modélisation de la combustion de haies de ciste seules

## 1.1 Rappel du dispositif expérimental

Les expériences avec les haies seules ont été réalisées avec des haies reconstituées avec des branches de ciste de Montpellier placées verticalement dans des cages en treillis soudés de 6 m de long  $\times$  1 m large et  $\times$  1 m de haut en veillant à conserver une charge de combustible de  $8 \text{ kg/m}^3$  correspondant à la charge naturelle d'arbustes de ciste [2]. 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. La disposition des différents appareils de mesure est donnée sur la Figure 1. Les lettres R et T indiquent la position des fluxmètres radiatifs et totaux respectivement. 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 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  $\pm 0.1 \text{ K}$  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 réalisés avec les haies. La direction  $0^\circ$  correspond à l'axe du dispositif.

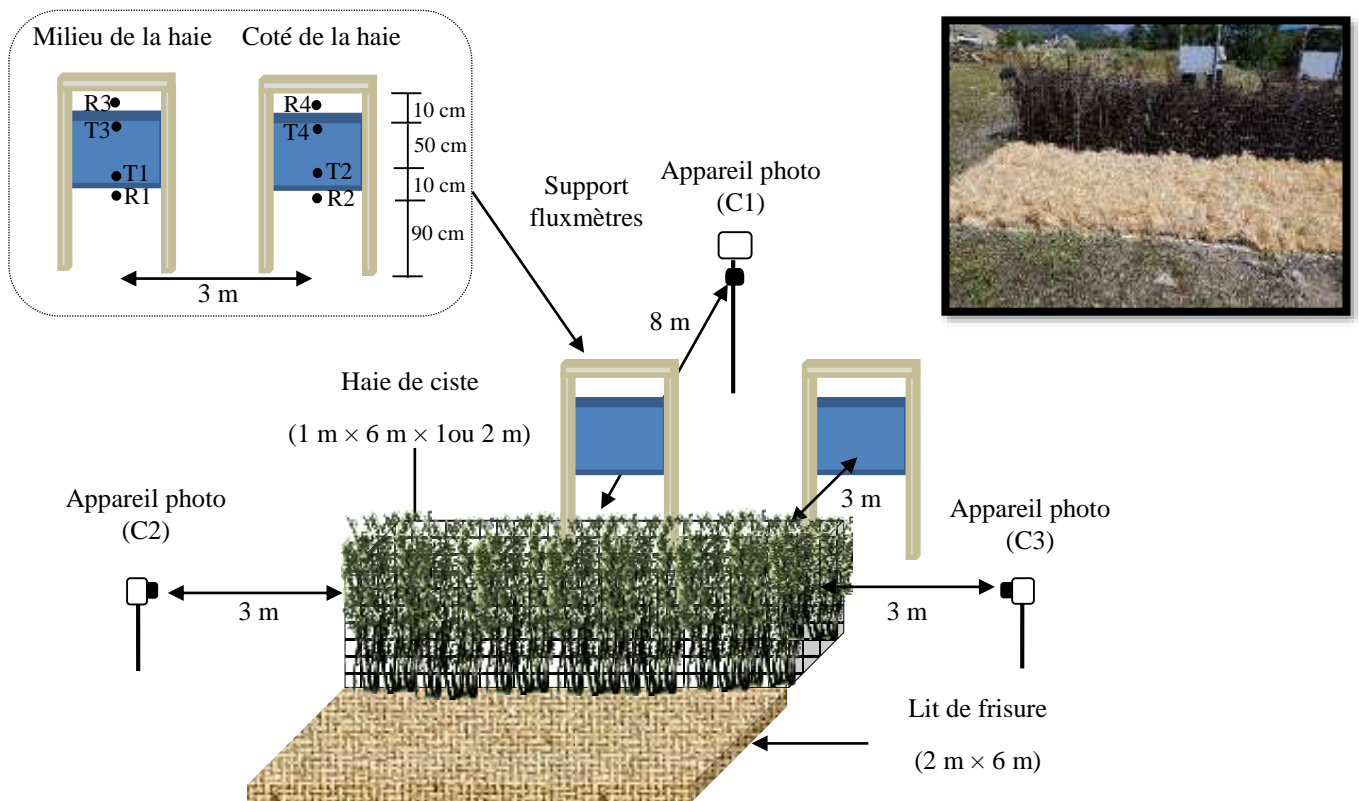


Figure 1 : Position des capteurs pour les tests avec des haies de ciste de 6 m seul.

Tableau 1 : Statistiques atmosphériques moyennes pour l'essai effectué avec une haie seule.

Dimension de la haie (m × m × m)	Vitesse U (m/s)	Direction $\theta$ (°)	Température de l'air (° C)	Humidité relative de l'air (%)
6 × 1 × 1	2,47 ± 1.3	47 ± 51	18,1	37,5

## 1.2 Configuration numérique pour la combustion des haies seules

Pour représenter le brûlage des haies de ciste de 6 m, le volume du domaine numérique a été fixé à  $L \times l \times H = 50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$  et la haie a été positionnée au centre du domaine. Cette taille de domaine permet d'éviter toute interaction entre les conditions aux limites et la solution numérique à proximité des haies. Le domaine a été maillé en utilisant deux tailles différentes de cellules hexaédriques. Pour la zone de  $20 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$  située autour de la haie, la taille de cellule a été fixée à  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 12,5 \text{ cm}$  ce qui était le meilleur compromis entre précision et coût de calcul. Dans le reste du domaine numérique, la taille de maille a été fixée à  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25 \text{ cm}$ . Le vent ambiant a été modélisé avec un profil vertical utilisant une loi de puissance en 1/7 pour lequel la vitesse et la direction moyennes du vent enregistrées pendant l'essai ont été prises en compte :

$$\mathbf{u} = u_{\infty} \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1}{7}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

où  $\theta$  est l'incidence du vent sur le plan x-y et  $z_0$  la hauteur de référence fixée à 2m (altitude de l'anémomètre).

En sortie du domaine, des conditions d'écoulement à pression constante ont été définies. En haut et en bas, des conditions de glissement libre et de paroi ont été respectivement utilisées. Sur les côtés du domaine, des conditions aux limites périodiques ont été considérées pour tenir compte de la direction du vent. Des capteurs numériques de flux radiatif et total ont été positionnés au même endroit que les capteurs expérimentaux. La Figure 2 présente le domaine de calcul avec les conditions aux limites.

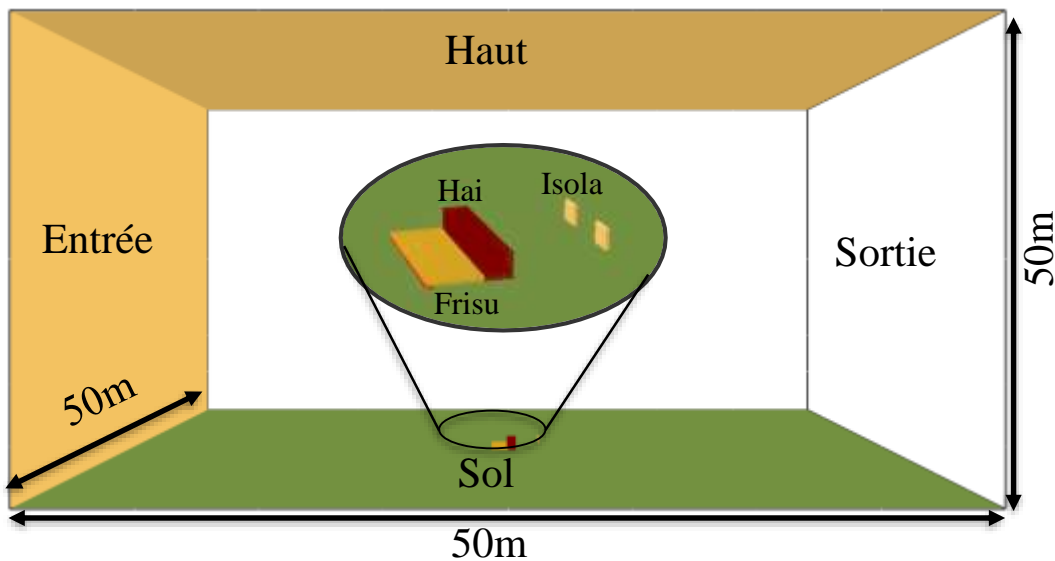


Figure 2 : Représentation avec Smokeview du domaine de calcul utilisé pour la modélisation de la combustion des haies seules.

La haie de ciste a été modélisée selon une approche Fuel Element et a été découpée suivant 6 étages (1 étage tous les 12,5 cm). Par ailleurs, 6 classes de particules ont été considérées : les fleurs, les feuilles et les brindilles de 0-2mm, de 2-4mm, de 4-6mm et de 6-25mm de diamètre. Les caractéristiques et la distribution spatiale de chaque classe de particules ont été obtenues à partir de mesures faites en laboratoire présentées dans le livrable INTERMED T.1.3.2. La litière en frisure de bois a été également modélisée par une approche Fuel Element. Les propriétés thermo-physiques utilisées pour modéliser la frisure de bois et la haie ont été extraites de la littérature [2, 8] à l'exception de la fraction de résidu carbonneux et de la fraction de cendres qui ont été déterminées expérimentalement. La combustion en phase gazeuse a été modélisée par une réaction globale à une étape en considérant un combustible du type  $C_xH_yO_z$  où  $x=2,95$ ,  $y=5,87$  et  $z=2,76$  (obtenus à partir de l'analyse élémentaire du ciste). Les coefficients d'Arrhenius associés au processus de dégradation thermique proviennent de Morandini et coll. et Sanchez-Monroy et coll. [2, 8].

### 1.3 Résultats numériques

La Figure 3 présente une comparaison du front de flamme expérimental et numérique. Pour les résultats numériques, nous avons utilisé une iso-surface de  $200 \text{ kW/m}^3$  du HRRPUV (Heat Release Rate Per Unit Volume) pour représenter le front de flamme. Pour l'ensemble de la combustion, le code de calcul permet de représenter la dynamique du feu dans la haie. Qualitativement, la géométrie de la flamme et son orientation durant les différentes phases de la combustion de la haie sont correctement prédits par le modèle numérique. Ces résultats sont en accord avec les observations faites en laboratoire par Meerpoel-Pietri et coll [7] sur une haie de ciste de Montpellier reconstituée à échelle réduite.

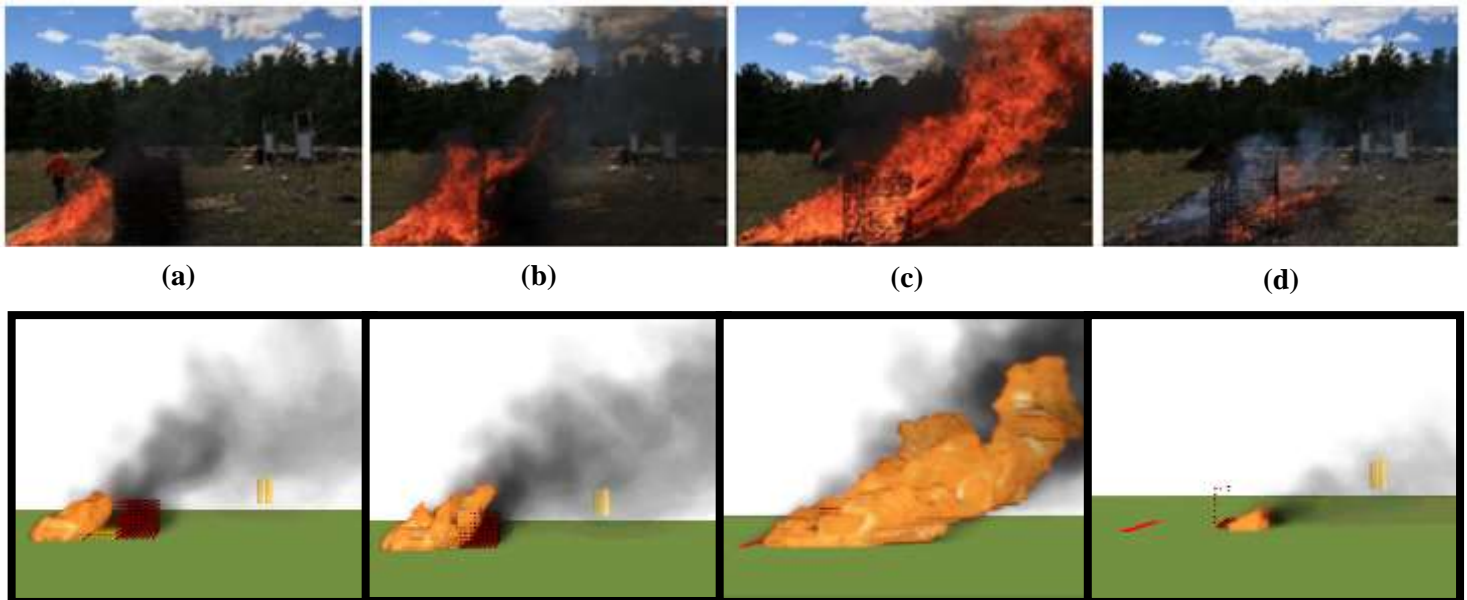


Figure 3 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour la combustion d'une haie de 1 m de haut a) Propagation du feu dans la frisure de bois (t = 1 s) b) Allumage de la haie (t = 5 s) c) Brûlage de la haie (t = 19 s) d) Brûlage des particules les plus épaisses (t = 61 s).

La Figure 4 présente les densités de flux total et radiatif expérimentales et numériques à 3 m de la haie. La comparaison des courbes montre que dans l'ensemble, le code reproduit bien la dynamique des flux de chaleur totaux et radiatifs situés à 3 m de la haie. Les simulations sont en effet très proches des données expérimentales jusqu'à environ 50 s ce qui correspond à la période où la combustion de la haie est la plus intense. A partir de  $t=50s$ , la courbe numérique dévie fortement de la courbe expérimentale jusqu'à atteindre l'extinction. Ces différences sont principalement dues à la non prise en compte par le code de calcul de l'effondrement des particules de grandes tailles en fin de combustion ce qui induit une extinction numérique plus rapide. Cette divergence avait déjà été observée par Meerpoel-Pietri et coll [7] lors de la combustion en laboratoire des haies de taille réduite. Compte tenu de ces éléments, le modèle numérique pour la simulation des haies à l'échelle du terrain a été validé.

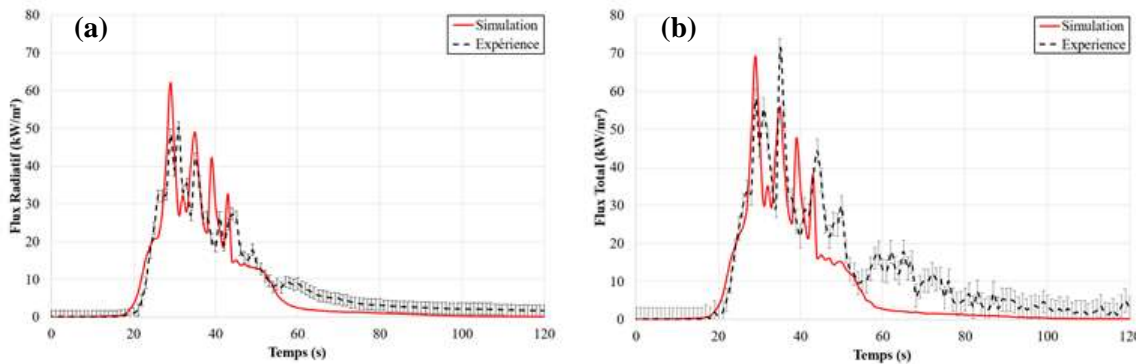


Figure 4 : a) Densité de flux radiative b) Densité de flux total.

## 2 Modélisation des expériences réalisées sur la plateforme EXPLORII avec des haies

### 2.1 Rappel du dispositif expérimental

Pour valider le code de calcul en présence de pente et de bâti, nous avons utilisé les expériences réalisées sur la plateforme EXPLORII avec des haies de 6 m de long sur 1 m de large et 1 m de haut. Comme précédemment, la haie a été reconstituée à partir de branches de cistes coupées et a été placée sur la cellule de pesée positionnée à 3 m de la construction (Figure 5). De la frisure de bois a été déposée de manière homogène avec une charge de  $1 \text{ kg/m}^2$  sur la pente de  $20^\circ$  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. 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. Une GoPro a également été placée sur un mat télescopique en bas de la pente pour observer l'arrière du front de feu. Afin de mesurer la densité de flux de chaleur pouvant impacter la construction, deux couples de fluxmètres radiatif et total ont été placés entre les fenêtres, c'est-à-dire sur la façade à 3 m de la haie. Les résultats expérimentaux présentés ci-dessous correspondent à des moyennes d'expériences pour lesquelles le vent était dans la direction de la pente de la plateforme. Les barres d'erreur montrent la variabilité des données expérimentales.

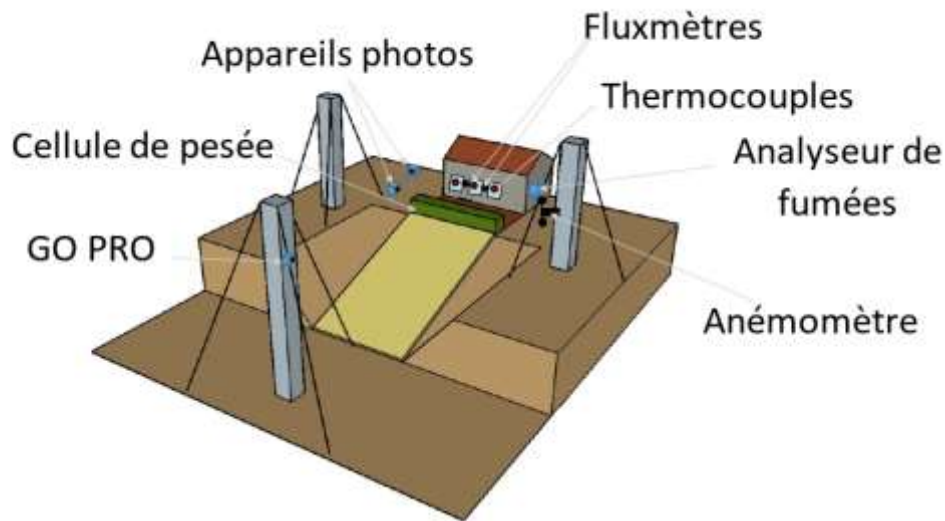


Figure 5 : Dispositif expérimental présent sur la plateforme EXPLORII

## 2.2 Configuration numérique pour la modélisation de la plateforme EXPLORII

Pour représenter les expériences de brûlages réalisées sur la plateforme EXPLORII, le volume du domaine numérique a été fixé à  $L \times l \times H = 96 \times 64 \times 32 \text{ m}^3$  (Figure 6). L'origine du domaine de calcul a été positionné au sommet de la pente à  $20^\circ$ . Cette taille de domaine permet d'éviter toute interaction entre les conditions aux limites et la solution numérique à proximité des haies. Comme précédemment, le domaine a été maillé en utilisant deux tailles différentes de cellules hexaédriques. Pour la zone de  $48 \times 64 \times 16 \text{ m}^3$  située autour de la haie, la taille de cellule a été fixée à  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 12,5 \text{ cm}$  ce qui était le meilleur compromis entre précision et coût de calcul. Dans le reste du domaine numérique, la taille de maille a été fixée à  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25 \text{ cm}$ . Le vent ambiant a été modélisé avec un profil vertical utilisant une loi de puissance en  $1/7$  (Equation 1) avec comme vitesse  $2,6 \text{ m/s}$  à l'altitude de l'anémomètre (soit à une hauteur de  $7,75 \text{ m}$  par rapport au bas de la pente) et un vent dans l'axe de la pente. En sortie du domaine, des conditions d'écoulement à pression constante ont été définies. Pour les faces supérieure et inférieure du domaine, des conditions de glissement libre et de paroi ont été respectivement utilisées. Sur les côtés du domaine, des conditions aux limites périodiques ont été considérées pour tenir compte de la direction du vent. Des capteurs numériques de flux radiatif et total ainsi que des capteurs de températures numériques ont été positionnés au même endroit que les capteurs expérimentaux. La modélisation de la végétation (haie ornemental et frisure de pin) est identique à celle utilisée pour les simulations de brûlage des haies de ciste seules (paragraphe 1.2). Les façades, les fenêtres et le toit de la maison ont été modélisés. Par contre, l'intérieur n'a pas été pris en compte pour les simulations.



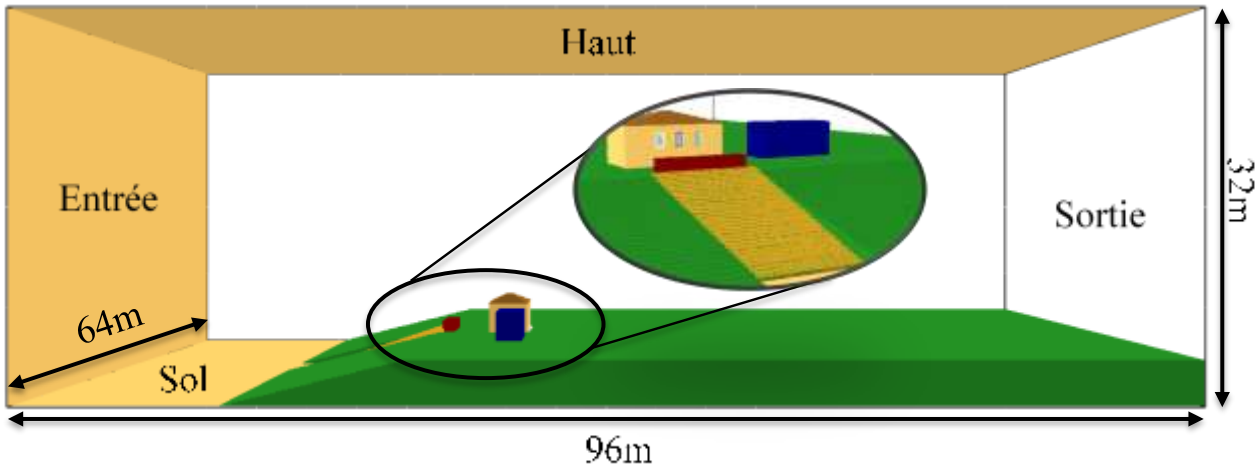


Figure 6 : Représentation avec Smokeview du domaine de calcul utilisée pour la modélisation des expériences sur la plateforme EXPLORII.

## 2.3 Résultats numériques

La Figure 7 présente une comparaison du front de flamme expérimental et numérique. Pour les résultats numériques, nous avons utilisé une iso-surface de  $200 \text{ kW/m}^3$  du HRRPUV (Heat Release Rate Per Unit Volume) afin de représenter le front de flamme. Comme pour le cas des simulations de brûlage d'une haie seule, le code de calcul permet de représenter la dynamique du feu dans la pente ainsi que dans la haie. Qualitativement, la géométrie de la flamme et son orientation durant les différentes phases de la combustion sont correctement prédits par le model numérique. On peut également voir que le code prédit correctement l'influence de la construction et de la pente sur l'inclinaison des flammes.

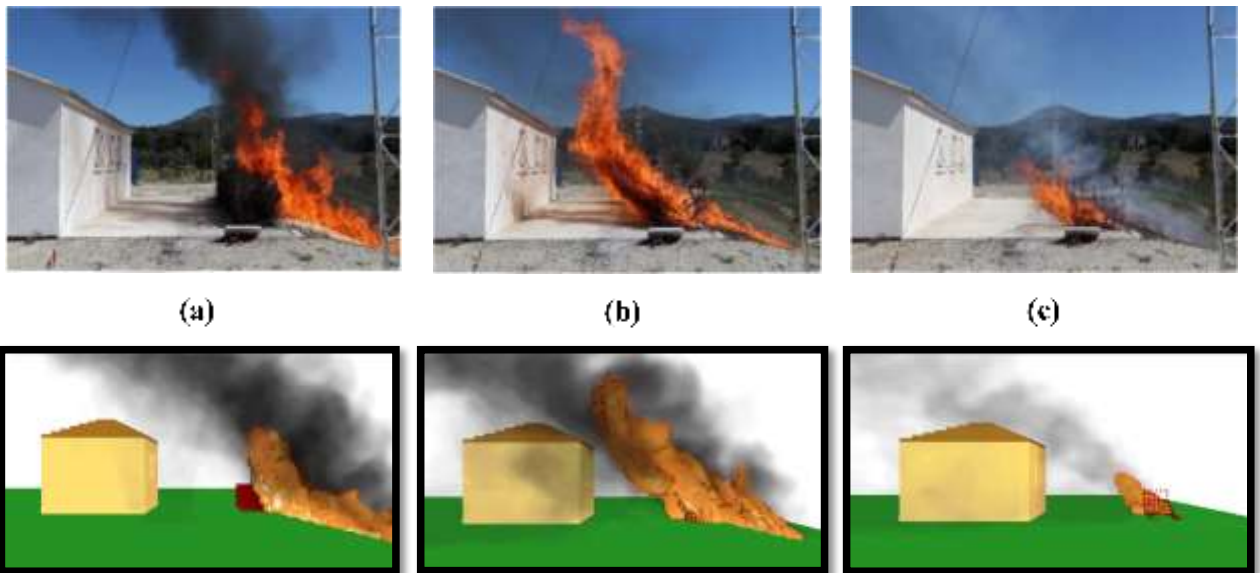


Figure 7 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour la combustion d'une haie de 1 m de haut sur la plateforme EXPLORII : a) Allumage de la haie, b) Brûlage de la haie, c) Brûlage des particules les plus épaisses

La comparaison entre les expériences et les simulations a été effectuée en s'appuyant sur la perte de masse de la haie et sur les densités de flux sur la façade exposée de la construction. Pour cette partie de l'étude, le temps  $t=0 \text{ s}$  correspond au moment où la haie s'allume. La Figure 8 présente l'évolution de la masse et du taux de

perte de masse (MLR) prédits et expérimentaux. Les expériences et simulations sont très proches jusqu'à 25 s. Ensuite, le modèle surestime la vitesse de perte de masse. Cela conduit à une consommation et une extinction de la haie plus rapide. Il faut également noter que le modèle prédit une combustion quasi-totale de la haie (masse restante égale à 1,5 % de la masse initiale) tandis qu'il reste en moyenne 3,7 % de la masse initiale expérimentalement.

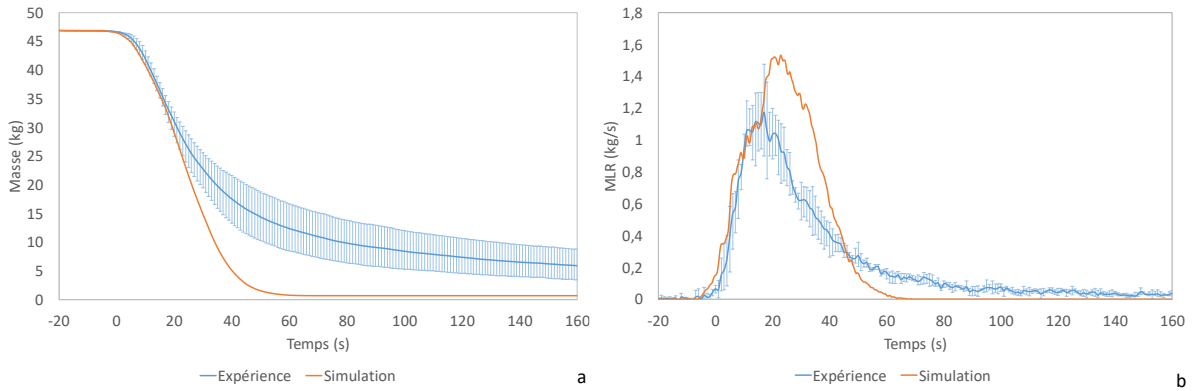


Figure 8 : Evolution prédite et expérimentale pour la haie a) de la masse et b) du taux de perte de masse

La Figure 9 présente les densités de flux totaux et radiatifs prédits et expérimentaux à 3 m de la haie au niveau de la façade. Les valeurs correspondent aux moyennes des 2 capteurs présents sur la façade. Le modèle numérique a tendance à sous-estimer l'augmentation du flux au moment de l'allumage de la haie. Par contre, les pics de densités de flux prédits sont très proches des valeurs expérimentales. La simulation donne en effet un pic de densité de flux radiatif de 28,7 ( $\pm 0,3$ ) kW/m<sup>2</sup> et total de 29,3 ( $\pm 0,9$ ) kW/m<sup>2</sup>. Pour les expériences, nous avons obtenu en moyenne des pics de 24,6 kW/m<sup>2</sup> pour la densité de flux radiatif et de 27,7 kW/m<sup>2</sup> pour la densité de flux total. Ainsi, l'impact du feu sur la construction est plutôt bien prédit. Le modèle numérique donne donc des résultats très encourageants mais nécessitera des améliorations pour mieux représenter la combustion de la haie et donc l'impact temporel du feu sur la construction.

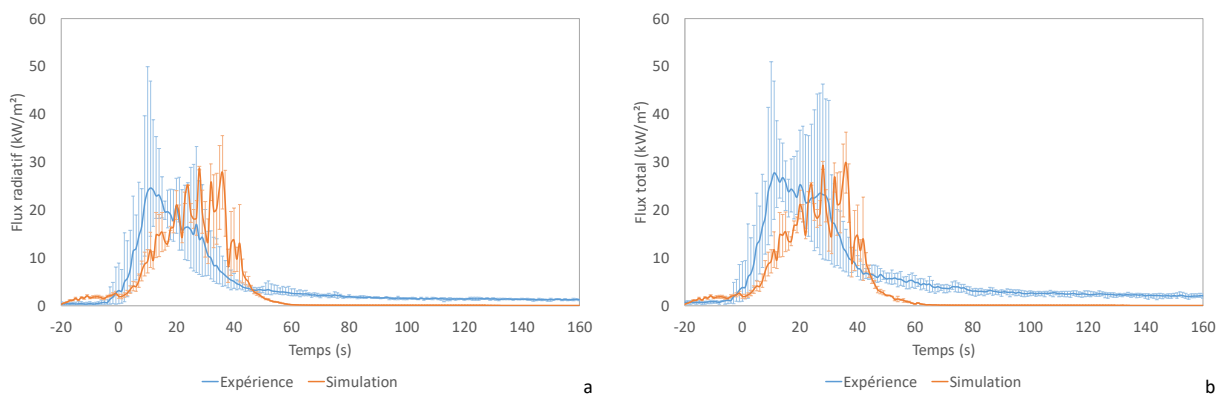


Figure 9 : Densités de flux moyens a) radiatifs b) totaux - prédits et expérimentaux à 3 m de la haie au niveau de la façade

## 3 Modélisation d'un scénario d'incendie en interface forêt/habitat

### 3.1 Définition des scénarii

Initialement, nous avons prévu de considérer le cas d'une habitation située dans un environnement de type forêt de pin d'Alep. L'approche comprenait, pour des raisons de temps de calcul, deux étapes complémentaires :

- La modélisation de la propagation de l'incendie dans une zone non débroussaillée de type forêt, comme calcul préalable, permettant de déterminer une puissance moyenne d'incendie arrivant sur une zone débroussaillée. La surface d'étude proposée pour la zone non débroussaillée était de 60m×45m.
- L'étude du comportement du feu et de son impact dans une zone débroussaillée comprenant une maison individuelle pour laquelle la végétation devait être agencée en conformité avec l'arrêté de débroussaillage de la région Corse. Deux zones avaient été prévues : 52,5m×30m et 72,5m×30m afin de considérer les dispositifs réglementaires des régions Corse et Ligurie.

Les avancées et échanges avec les différents partenaires du projet ont permis de faire évoluer cette approche pour deux aspects essentiels :

- Concernant la végétation, il est apparu que si la forêt de type pin d'Alep pouvait présenter un intérêt pour certains départements du sud-est de la France, il n'en est pas de même pour la Corse. Ainsi, les membres du projet ont convenu que la forêt de type chêne liège (notamment au regard de l'incendie de Gonfaron de l'été 2021) serait plus appropriée pour la Corse et le Var. Il a donc été décidé de modifier les scénarii en considérant une forêt de chêne liège en lieu et place d'une forêt de pin d'Alep.
- L'étude numérique préliminaire a montré que la puissance de calcul disponible offrait la possibilité de simuler (moins de 24h) la propagation d'un incendie pour un domaine de 110m×40m×32m. Il a donc été décidé de simuler les scénarii sur un seul domaine de calcul incluant la zone non débroussaillée de forêt et la zone débroussaillée avec la maison (Figure 10).

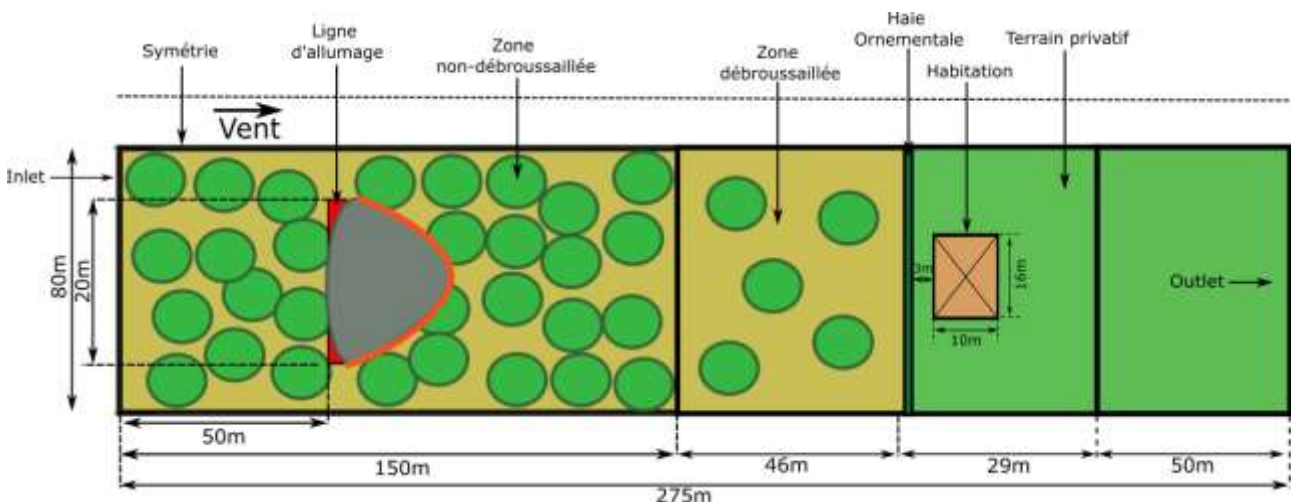


Figure 10 : Schéma de principe du domaine de calcul pour les scénarii en interface forêt-habitat (Zones débroussaillée et non débroussaillée)

Pour les conditions ambiantes, nous nous sommes placés dans un cas de situation extrême correspondant à une température de l'air de 40°C et une humidité relative de l'air de 10%. Pour le vent, deux configurations ont été étudiées : 25 km/h et 50 km/h.

Pour la végétation, nous avons considéré les conditions suivantes :

- La végétation dans la zone non débroussaillée est une forêt ouverte de chênes lièges. La forêt comprend une strate arbustive haute et une litière avec une charge de biomasse d'ensemble d'environ 30 t/ha. La hauteur dominante des individus est de 7 m.
- La végétation dans la zone débroussaillée correspond à un peuplement ouvert de chêne liège (hauteur dominante 7 m) avec réduction de la densité des arbres de moitié par rapport à la zone non débroussaillée. La disposition des arbres respecte les arrêtés de débroussaillage corses :
  - Les arbres et arbustes sont situés à 3 m minimum du bâtiment.
  - Il existe une distance de 2 m entre les branches basses des arbres et la hauteur de la repousse fixée à 0,2 m.
 La végétation comprend également la repousse de la végétation débroussaillée avec une charge de biomasse d'ensemble d'environ 12 t/ha. Cette valeur correspond à un cas limite de repousse annuelle pour rester opérationnel selon des dires d'expert.

Pour tenir compte du rôle de la distribution des arbres dans la zone débroussaillée, nous avons modélisée deux scénarii, un scenario avec une distribution pseudo-homogène (Figure 11a)) et un scenario avec des groupements d'arbres (Figure 11b)). Pour cela, nous avons utilisé des modèles issus de la statistique spatiale. Dans les deux cas, le nombre et les caractéristiques des arbres sont identiques.

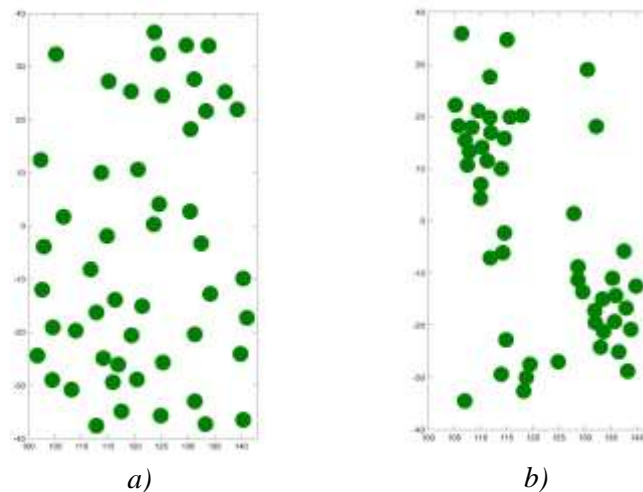


Figure 11 : Distribution spatiale des arbres dans la zone débroussaillée. a) Distribution pseudo-homogène. b) Distribution avec des groupements d'arbres.

- Une haie de végétation ornementale sépare la zone débroussaillée de la maison. La haie se situe à 3 m de la maison et à 3 m de la canopée de l'arbre le plus proche pour respecter les arrêtés de débroussaillage corses.

Les données de couvert et de hauteur moyenne des espèces ont été fournies par l'INRAE, ainsi que la densité apparente des particules fines des arbres. Les valeurs de teneur en eau pour les différentes espèces considérées ont été obtenues à partir des enregistrements historiques du « Réseau Hydrique » [10].

### 3.2 Configuration numérique d'un scénario en interface forêt/habitat

La taille du domaine de calcul a été fixée à 275 m x 80 m x 70 m (Figure 12). Le domaine a été subdivisé en deux zones, la première couvrant toute la surface du domaine jusqu'à 32 m de hauteur, et la seconde couvrant la partie supérieure du domaine. Dans la première zone, où la combustion a lieu, la taille de maille est égale à  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25$  cm, alors que dans la deuxième zone la taille de maille est de  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50$  cm. Le vent a été modélisé avec un profil vertical suivant une loi de puissance en 1/7 (Equation 1). L'allumage est réalisé après avoir permis à l'écoulement de se développer pleinement dans tout le domaine. Des conditions périodiques ont été appliquées sur les côtés gauche et droit du domaine. En haut du domaine des conditions de glissement libre

ont été respectivement utilisées, tandis qu'en sortie du domaine, une condition d'écoulement à pression constante est fixée.

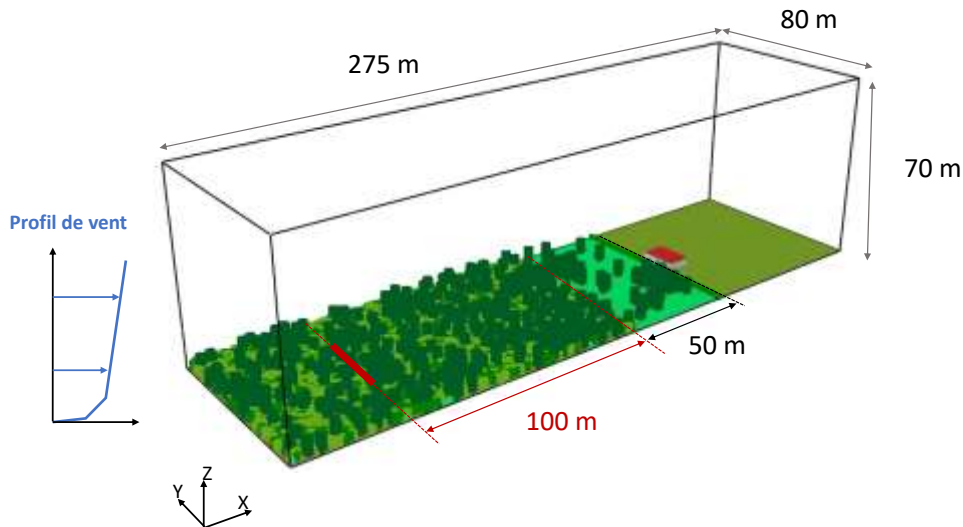


Figure 12 : Domaine numérique utilisé pour les scénarii de feu aux interfaces forêt/habitat

La végétation de surface (c'est-à-dire la litière, l'herbe et la repousse des arbustes dans la zone débroussaillée) a été modélisée en utilisant l'approche 'Fuel Boundary' couplée à un sous-modèle de pyrolyse linéaire pour la dégradation thermique de la phase solide. Les autres éléments de végétation ont été modélisés en utilisant l'approche 'Fuel Element' combinée à un modèle de type Arrhenius pour la dégradation en phase solide (pyrolyse et oxydation du résidu carbonneux).

Pour la modélisation de l'habitation, nous avons implanté différentes ouvertures dans la façade de la construction la plus exposée au feu, à savoir une porte-fenêtre centrale et deux fenêtres de part et d'autre de la porte-fenêtre.

### 3.3 Résultats numériques

Les résultats numériques présentent dans un premier temps l'analyse de la dynamique de propagation du feu et ensuite l'impact de celui-ci sur l'habitation.

La Figure 13 montre la position du front de flammes au cours du temps pour un vent de 50 km/h, représentée numériquement par la puissance du feu au sol par unité de surface ( $\text{kW/m}^2$ ). Dans cette figure, les lignes noires indiquent la limite entre la forêt (à gauche) et la zone débroussaillée (à droite), et les deux lignes vertes montrent la position de la haie. Dans les deux configurations de végétation étudiées (Figure 13a) et b)), le front de flammes a été représenté aux mêmes temps de façon à pouvoir comparer son évolution. Ces résultats illustrent que lorsque le feu approche la zone débroussaillée la forme du front de flammes est différente dans les deux cas (voir front de flammes indiqué par les flèches rouges dans la Figure 13). Ceci indique un changement de la dynamique de propagation aux abords de la zone débroussaillée. En effet, la distribution spatiale des arbres dans la zone débroussaillée a un effet sur le champ de vent dans cette zone (Figure 14), ce qui explique les différences de comportement. On observe également pour les deux cas que le front de flammes devient plus large dès le passage du feu dans la zone débroussaillée. Le changement des propriétés de la végétation en surface, litière pour la forêt et repousse des arbustes pour la zone débroussaillée est à l'origine de ces différences. Concernant la propagation du feu dans la partie débroussaillée, on remarque que le feu avance plus rapidement dans la configuration où les arbres forment des groupes d'individus car aux mêmes instants dans le premier scénario (Figure 13a)) le feu a atteint la maison (position  $x=150$  m) alors que pour le deuxième scénario le feu n'a pas encore atteint la haie ornementale (Figure 13b)).

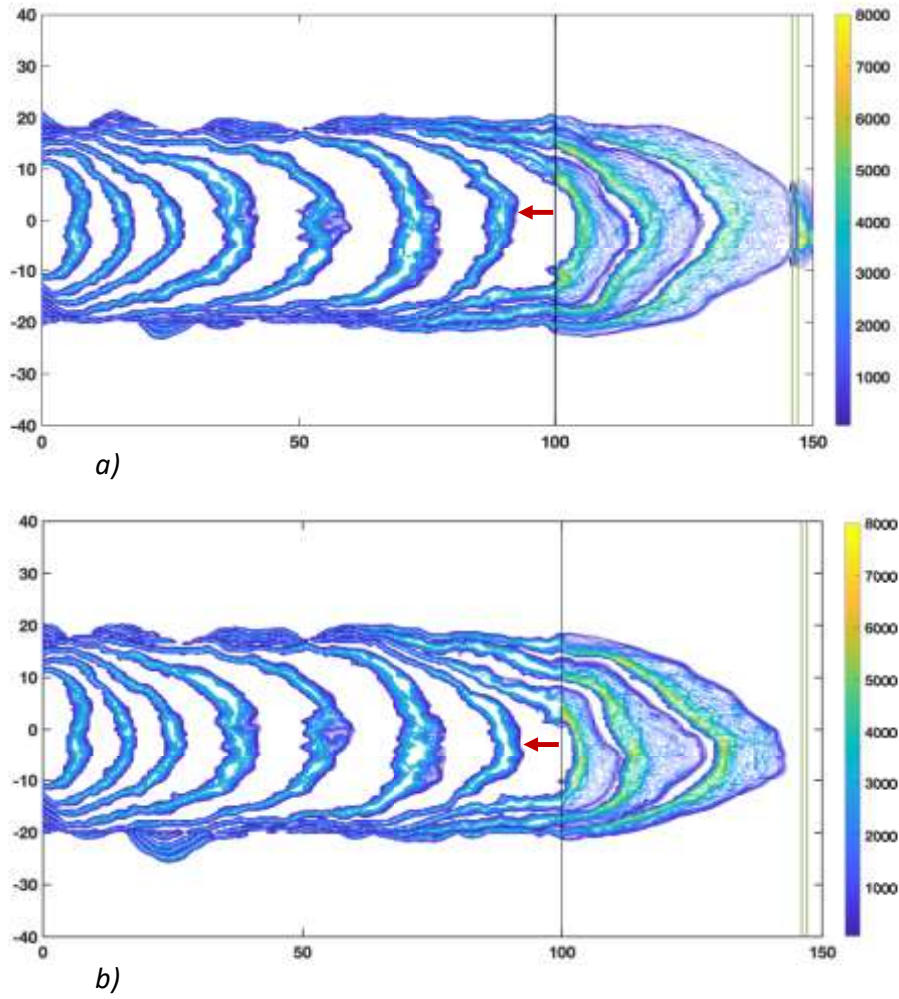


Figure 13 : Puissance du feu par unité de surface ( $\text{kW/m}^2$ ) pour un vent de 50 km/h. a) Zone débroussaillée avec des groupements d'arbres. b) Zone débroussaillée avec une distribution des arbres pseudo-homogène.

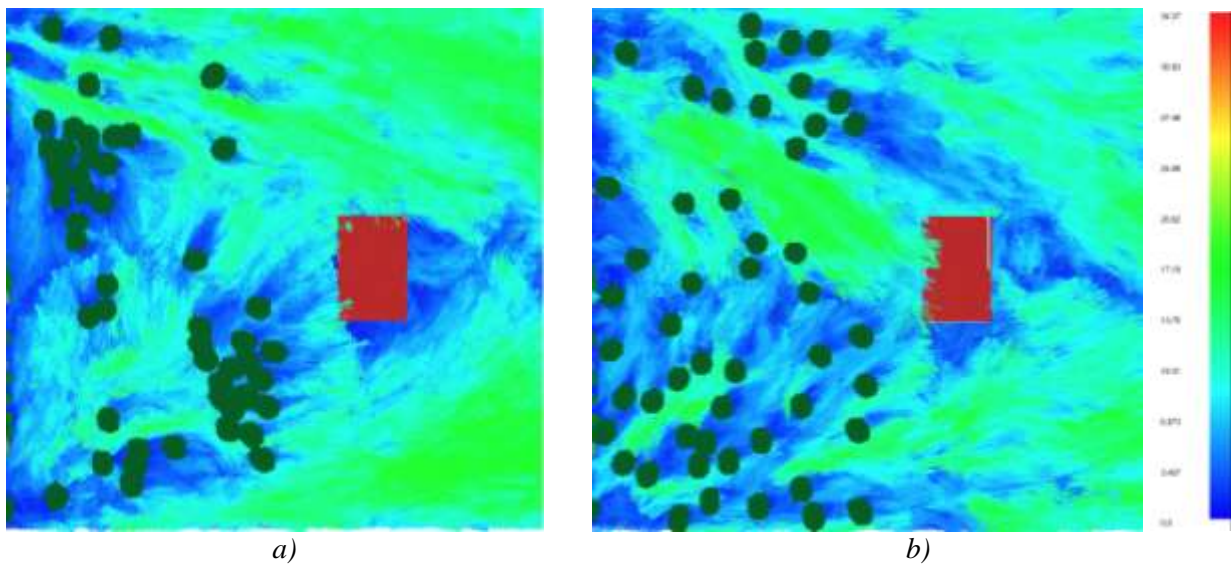


Figure 14 : Représentation du champ de vent à une hauteur de 2 m pour un vent de 50 km/h, telle que rendue par Smokeview. a) Zone débroussaillée avec des groupements d'arbres. b) Zone débroussaillée avec une distribution des arbres pseudo-homogène.

Lorsqu'on regarde plus en détail la dynamique du feu dans la zone débroussaillée pour le cas avec des groupements d'arbres et un vent de 50 km/h (Figure 15.a et Figure 16.a), il se produit un changement de régime dans la propagation du feu, qui se traduit par un changement dans la vitesse de propagation qui passe de 2,04 m/s à 3,04 m/s. Lorsque les arbres se trouvant dans l'axe central de propagation sont consommés, le vent peut s'engouffrer et pousser les flammes, résultant en une accélération du feu. Pour le cas avec une distribution pseudo-homogène des arbres (Figure 15.b et Figure 16.b), on observe également un changement de régime, mais celui-ci se produit plus tard, quand le feu est à seulement 10 m de la maison, car les arbres se trouvant dans la partie centrale de la zone débroussaillée ne brûlent pas au passage du feu et bloquent partiellement l'écoulement. Pour ce cas-là, la vitesse de propagation est de 2,16 m/s et puis de 3,30 m/s.

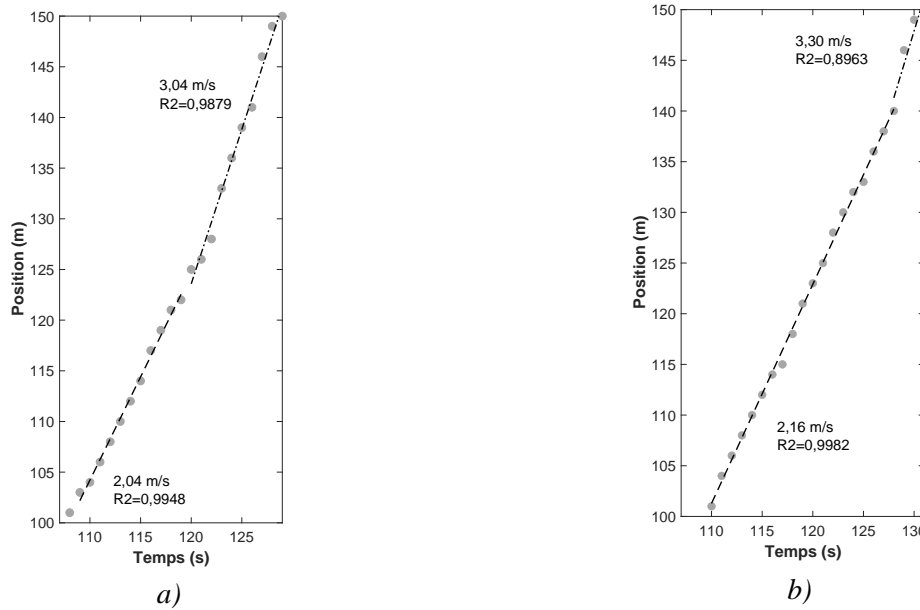


Figure 15 : Position du front de flammes au cours du temps dans la zone débroussaillée avec les deux scenarii étudiés pour un vent de 50 km/h. a) strate arborée formant des groupes d'individus. b) strate arborée pseudo-homogène.

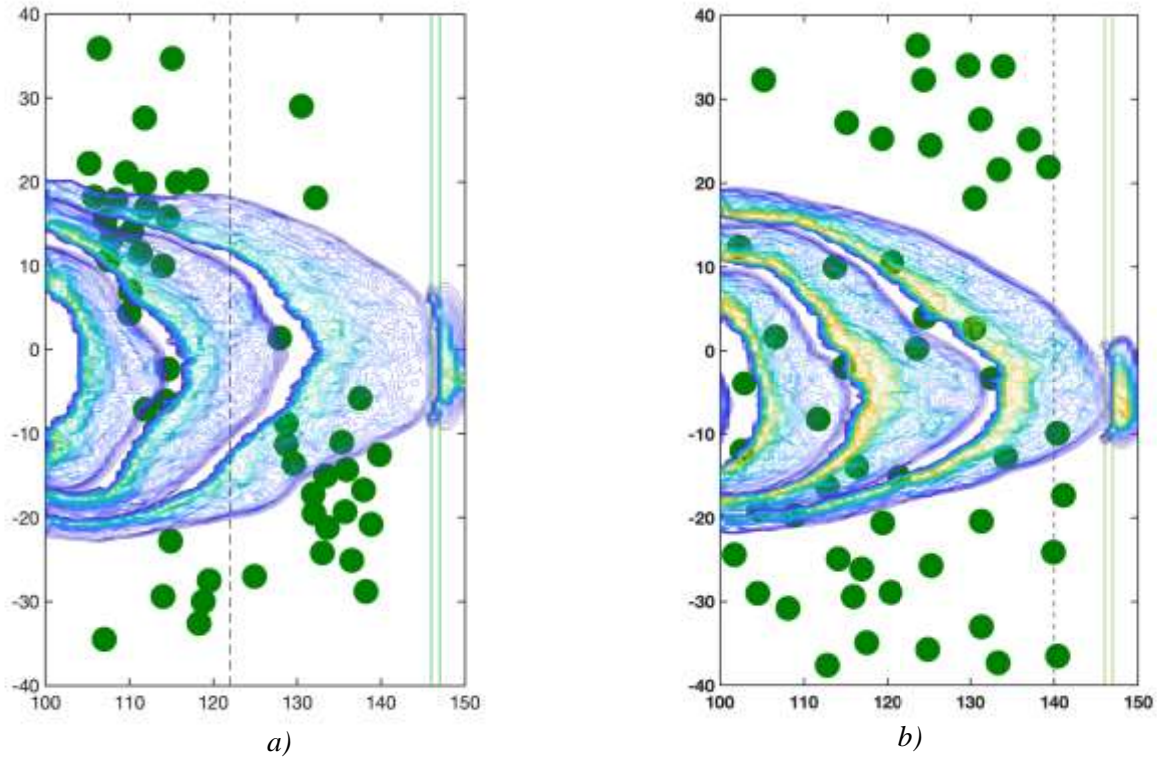


Figure 16 : Position du front de flammes au cours du temps dans la zone débroussaillée pour un vent de 50 km/h pour une a) strate arborée formant des groupes d'individus b) strate arborée pseudo-homogène. Les lignes pointillées indiquent le changement de régime. Il est également important de préciser que les fronts de flammes représentés dans ces figures ne correspondent pas aux mêmes instants.

En ce qui concerne l'impact du feu sur l'habitation, la Figure 17 présente le flux radiatif reçu par les fenêtres pour le scénario avec une strate arborée formant des groupes d'individus et un vent de 50 km/h. On peut voir dans cette figure que le temps d'exposition pour les deux fenêtres est équivalent (autour de 10 secondes), contrairement au flux reçu. Si le pic maximal du flux radiatif est du même ordre de grandeur dans les deux cas, autour de 150 kW/m<sup>2</sup>, la dynamique d'exposition varie d'une fenêtre à l'autre. On observe un premier pic, 90 kW/m<sup>2</sup>, pour la fenêtre W1, suite au passage du front de flammes à travers la haie et se propageant à travers l'herbe située entre la haie et la maison (point 2). Le pic maximal de flux (point 3 pour les fenêtres W1 et W2) est dû à la combustion de la haie et à l'arrière du front de flammes. Le front de combustion dans la haie se propageant latéralement, des différences sont observées au niveau des deux fenêtres (point 4 et 5). Pour le scénario avec une strate arborée pseudo-homogène, étant donné que la trajectoire du front de flammes n'est pas alignée avec l'axe centrale, le flux radiatif reçu par les deux fenêtres est différent ainsi que le temps d'exposition, tel qu'illustré dans la Figure 18. Comme pour le cas précédent, le flux reçu est maximal lors de la combustion de la haie couplée à l'approche de l'arrière du front de flammes. La valeur du pic maximal de flux radiatif reçu par les deux fenêtres est différente, 120 kW/m<sup>2</sup> pour l'une et 160 kW/m<sup>2</sup> pour l'autre.



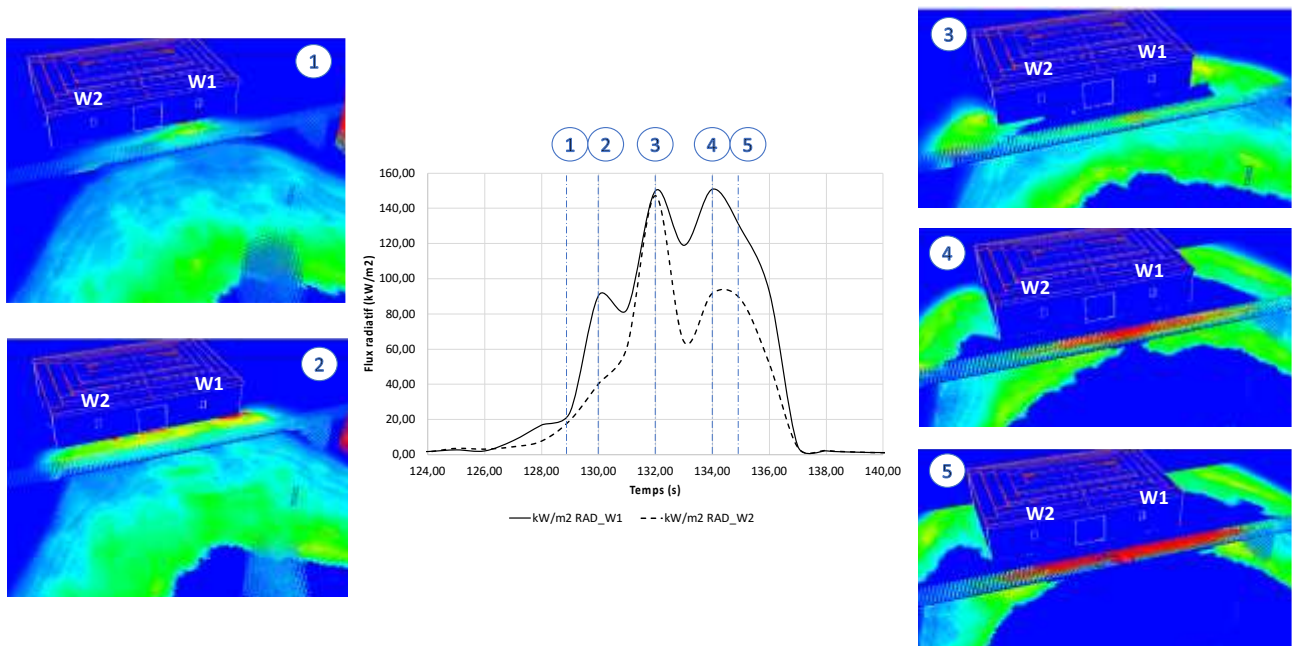


Figure 17 : Flux radiatif reçu au niveau des fenêtres pour le cas avec des arbres formant des groupements pour un vent de 50 km/h. Images obtenues avec Smokeview pour la puissance du feu au sol par unité de surface ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) et la température des particules formant la haie ornementale.

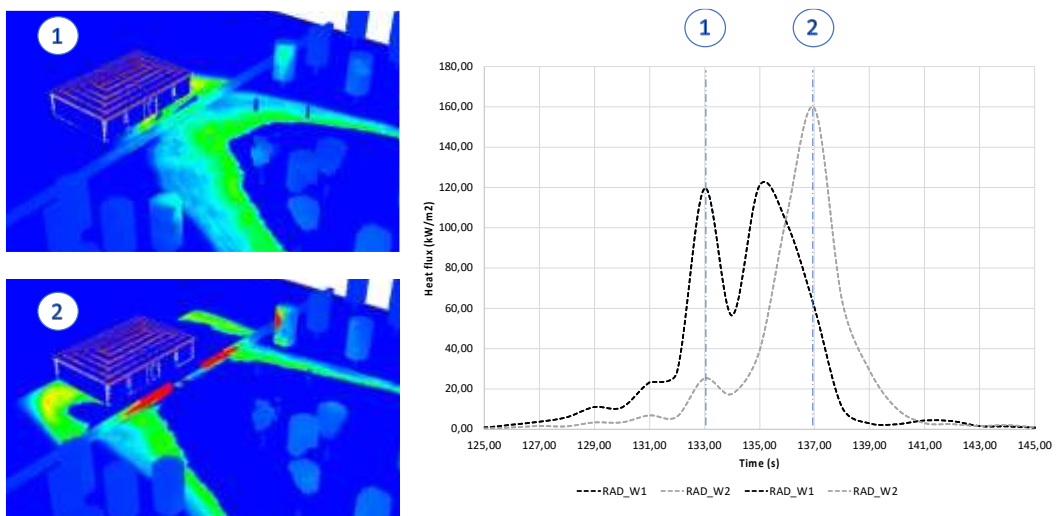


Figure 18 : Flux radiatif reçu au niveau des fenêtres pour le scénario avec une distribution pseudo-homogène des arbres pour un vent de 50 km/h. Images obtenues avec Smokeview pour la puissance du feu au sol par unité de surface ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) et la température des particules formant la haie ornementale.

Les Figure 19 et Figure 20 présentent les flux radiatifs reçus au niveau des fenêtres pour un vent de 25 km/h avec une distribution pseudo-homogène des arbres et une distribution avec groupement des arbres, respectivement. La comparaison de ces résultats avec les précédents montre que les pics de flux reçus avec un vent de 25 km/h sont inférieurs à ceux obtenus avec un vent de 50 km/h. Le vent influence également la durée pendant laquelle le feu impacte la maison puisque les pics de flux n'apparaissent qu'aux environs de 210 s pour le cas à 25 km/h contre 130 s pour le cas à 50 km/h. Pour la distribution homogène, le flux maximal reçu par la fenêtre W2 (image 1 sur la Figure 19) est principalement dû à la combustion de la haie, bien que la

propagation dans l'herbe devant la maison y contribue également entre 445 s à 455 s. Pour la fenêtre W1 (image 2 sur la Figure 19), le flux maximal se produit lorsque la canopée d'un des arbres situés à proximité brûle. Pour la fenêtre W2, la durée d'exposition est d'une vingtaine de secondes. Cette durée est plus faible que les durées d'exposition observée expérimentalement mais cela est vraisemblablement dû au fait que la modélisation ne considère que les feuilles et les particules fines 0-2mm. Pour une distribution avec groupement d'arbres, la dynamique est semblable à celle obtenue pour une distribution homogène (Figure 21). Toutefois, les valeurs maximales pour la fenêtre W2 sont plus élevées ce qui peut être expliqué par les différences dans la géométrie de la flamme (inclinaison) mais aussi par le taux de consommation de la haie. Pour l'ensemble des cas étudiés numériquement, bien qu'il n'y ait pas dans la littérature d'études expérimentales dans des conditions semblables à celles de ces simulations pour comparer les résultats numériques avec des observations de terrain, les résultats numériques obtenus restent dans des plages de valeurs ayant été mesurées pour d'autres types de végétations et d'autres conditions ([11], [12]).

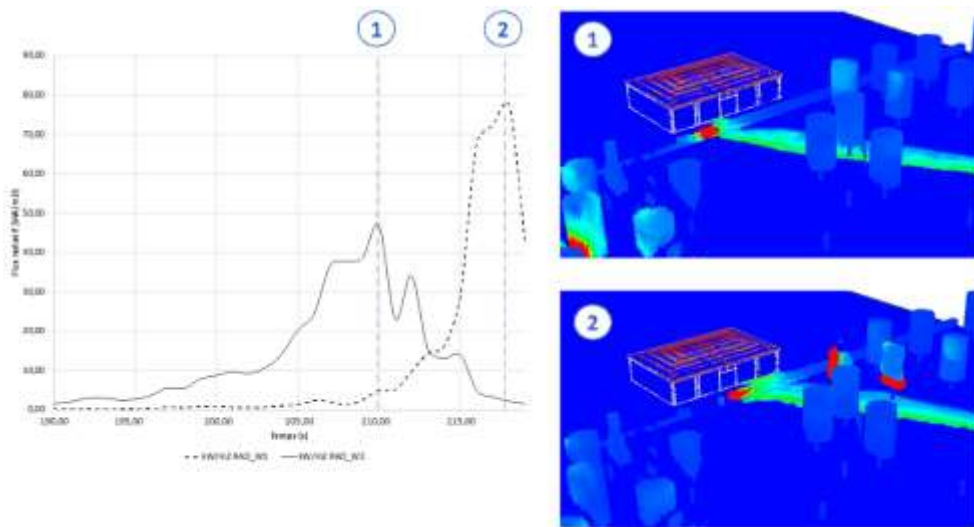


Figure 19 : Flux radiatif reçu au niveau des fenêtres pour le cas avec une distribution pseudo-homogène des arbres pour un vent de 25 km/h. Images obtenues avec Smokeview pour la puissance du feu au sol par unité de surface ( $\text{kW/m}^2$ ) et la température des particules formant la haie ornementale.

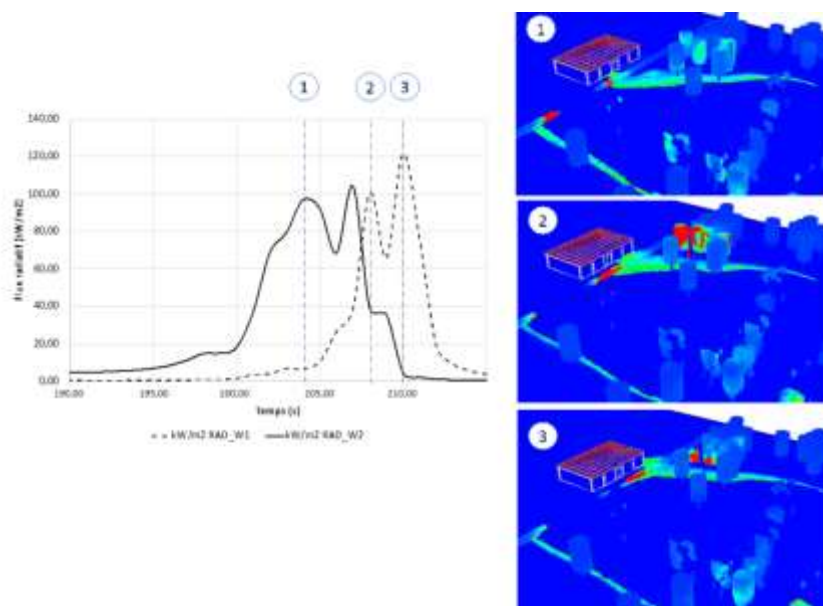


Figure 20 : Flux radiatif reçu au niveau des fenêtres pour le cas avec des arbres formant des groupements pour un vent de 25 km/h. Images obtenues avec Smokeview pour la puissance du feu au sol par unité de surface ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) et la température des particules formant la haie ornementale

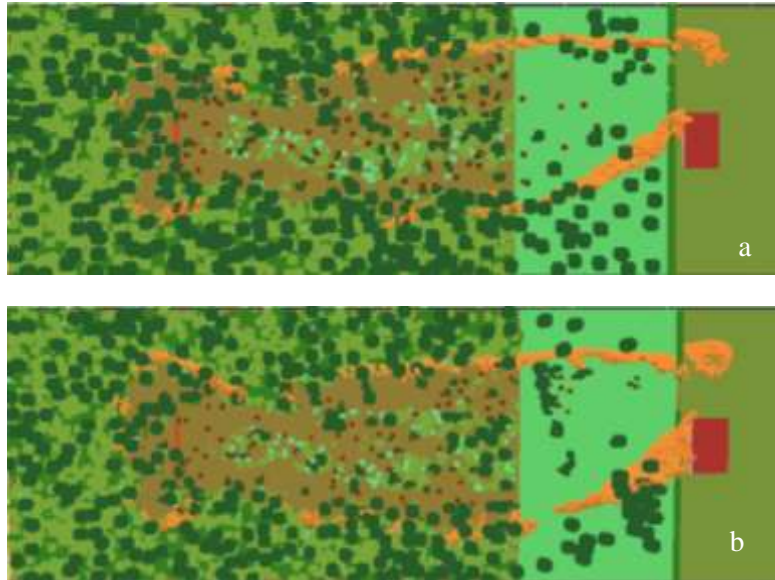


Figure 21 : Front de flamme pour un vent de 25 km/h pour une distribution d'arbres a) avec groupement (t=206 s) b) pseudo-homogène (t=210 s).

## Conclusion

Les différentes études numériques présentées dans ce rapport ont montré que le code WFDS avec le modèle de végétation adopté permettait de modéliser un feu dans une interface forêt / habitat. Les trois études présentées : haie seule, haie face à une construction et feu arrivant d'une zone non débroussaillée vers une zone débroussaillée ont mis en évidence l'importance d'étudier plus en détail les interactions entre la distribution spatiale de la végétation, le vent et le comportement du feu. Ces interactions varient en fonction du type de feu (surface et/ou cimes), de l'aménagement de la zone (position des constructions, de la végétation...) et des conditions ambiantes que nous avons choisies extrêmes pour la température et l'humidité et le vent. Afin d'arriver à des préconisations pour l'aménagement de la végétation autour des constructions aux interfaces forêt / habitat, il semble par conséquent nécessaire d'examiner avec les opérationnels de la sécurité incendie les scénarii qu'ils souhaitent privilégier. Cela permettrait d'obtenir les impacts sur les constructions et d'en déduire les moyens de prévention adéquats.

## Références

- [1] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication. (2013) 288.
- [2] 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

- [3] W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, S.L. Manzello, Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees, *Combustion and Flame* 156:2023-2041, 2009.
- [4] Y. Perez-Ramirez, W.E. Mell, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, F. Bosseur, Examination of WFDS in Modeling Spreading Fires in a Furniture Calorimeter, *Fire Technology*. 53 (2017) 1795–1832. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0657-z>
- [5] 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102836>
- [6] K.A.M. Moinuddin, D. Sutherland, Modelling of tree fires and fires transitioning from the forest floor to the canopy with a physics-based model, *Mathematics and Computers in Simulation*. 175:81-95 (2020)
- [7] K. Meerpoel-Pietri, V. Tihay-Felicelli, A. Graziani, P.A. Santoni, F. Morandini, Y. Perez-Ramirez, F. Bosseur, T. Barboni, X. Sánchez-Monroy, W. Mell, Modeling with WFDS Combustion Dynamics of Ornamental Vegetation Structures at WUI: Focus on the Burning of a Hedge at Laboratory Scale, *Combustion Science and Technology*, (2022) DOI:10.1080/00102202.2021.2019235
- [8] Sanchez-Monroy X., Mell, W.F, Torres-arenas, J., Butler, B.W. Fire spread upslope : Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal*. – 2019
- [9] Y. Perez-Ramirez, W.E. Mell, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, F. Bosseur, Examination of WFDS in Modeling Spreading Fires in a Furniture Calorimeter, *Fire Technology*. 53 (2017) 1795–1832. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0657-z>
- [10] Martin-StPaul N, Pimont F, Dupuy JL, Rigolot E, Ruffault J, Frageon H, Cabane E, Duché Y, Savazzi R, Touthkov M (2018) Live fuel moisture content (LFMC) time series for multiple sites and species in the French Mediterranean area since 1996. *Annals of Forest Science*, 75: 57.
- [11] Cruz MG, Hurley RJ, Bessel R, Sullivan AL (2020) Fire behavior in wheat crops – effect of fuel structure on rate of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 29: 258-271.
- [12] Cruz MG, Butler BW, Viegas DX, Palheiro P (2011) Characterization of flame radiosity in shrubland fires. *Combustion and Flame*, 158: 1970-1976.

# **Prodotto finale T1.3.3:**

## **Relazione sulle sollecitazioni termiche ricevute dagli edifici, sulla produzione e circolazione del fumo e sul comportamento del fuoco nella vegetazione di interfaccia per i diversi scenari simulati**

**Rapporto realizzato dall'Università della Corsica, luglio 2022.**

**Redazione: Virginie TIHAY-FELICELLI, Yolanda PEREZ-RAMIREZ, Anthony GRAZIANI e Paul-Antoine SANTONI**

## Indice dei contenuti

Introduzione .....	3
1 Modellazione della combustione delle sole siepi di cisto.....	4
1.1 Richiamo del set-up sperimentale.....	4
1.2 Configurazione numerica per la combustione delle sole siepi .....	5
1.3 Risultati numerici .....	6
2 Modellazione degli esperimenti condotti sulla piattaforma EXPLORII con le coperture .....	7
2.1 Richiamo del set-up sperimentale.....	7
2.2 Configurazione numerica per la modellazione della piattaforma EXPLORII.....	8
2.3 Risultati numerici.....	9
3 Modellazione di uno scenario di incendio all'interfaccia foresta/casa.....	11
3.1 Definizione di scenari .....	11
3.2 Configurazione numerica di uno scenario di interfaccia foresta/habitat.....	12
3.3 Risultati numerici.....	13
Conclusione .....	19
Riferimenti.....	19

## Introduction

Questo rapporto fa seguito al Deliverable T1.3.2: Rapporto sulle quantità termiche, la produzione e la circolazione del fumo in prossimità di un edificio che affronta un incendio in corso in un'area paesaggistica, realizzato nell'ambito del progetto INTERMED. Quest'ultimo ha presentato i risultati sperimentali ottenuti sulla caratterizzazione delle sollecitazioni termiche generate dalla combustione di siepi vegetali, nonché le raccomandazioni per la progettazione del paesaggio e la scelta dei materiali per ridurre la vulnerabilità degli edifici nelle interfacce foresta/abitazione. Data la configurazione della piattaforma per la sperimentazione, la sensibilizzazione e la formazione sui rischi di incendio nelle interfacce, non è stato possibile studiare gli incendi di vegetazione con venti medi o forti o con diversi paesaggi. Gli esperimenti sono stati condotti solo in regime di brezza (vento moderato). Abbiamo quindi voluto creare scenari numerici di incendio all'interfaccia foresta/casa per studiare ulteriormente la vulnerabilità degli edifici nelle aree di interfaccia. Per garantire l'affidabilità delle previsioni numeriche, abbiamo lavorato in tre fasi. In primo luogo, abbiamo modellato la combustione di una siepe di cisto da sola, per convalidare il modello numerico della siepe a scala di campo. Abbiamo poi modellato gli esperimenti condotti sulla piattaforma EXPLORII con le siepi, al fine di validare il codice in presenza di un pendio e di un edificio. Infine, gli scenari sono stati implementati nel codice di calcolo. Questo rapporto riassume i progressi di questo lavoro numerico svolto con il software Wildland-Urban Interface Fire Dynamic Simulator (WFDS). Questo codice è basato su FDS [1] (Fire Dynamics Simulator), sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology) per prevedere gli incendi in ambienti confinati. Questo codice modella la vegetazione in fiamme attraverso un approccio basato sui mezzi porosi [2]. Negli ultimi dieci anni, il codice è stato ampiamente utilizzato per simulare vari tipi di incendi di vegetazione, dalla combustione di aghi di pino su scala di laboratorio agli incendi di vegetazione su scala di campo [3-7]. Il WFDS risolve un problema di fase solida e gassosa su un dominio numerico discretizzato con una maglia cartesiana utilizzando le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia. La fase turbolenta del gas è modellata con un approccio di simulazione su larga scala (LES) e una formulazione a basso Mach delle equazioni di Navier-Stokes. La fase solida è rappresentata da un approccio a elementi combustibili (FE), che consiste nel modellare la vegetazione elevata come particelle lagrangiane statiche di diverse dimensioni e proprietà distribuite in un volume rappresentativo delle piante. Il trasferimento di calore, la forza di trascinamento e la degradazione termica per ogni particella di vegetazione sono approssimati con un approccio monodimensionale (elementi termicamente sottili). La degradazione del combustibile solido è rappresentata da un meccanismo a tre fasi che comprende disidratazione, pirolisi e ossidazione del carbone. Ogni fase è modellata da una legge di Arrhenius. La combustione del gas di pirolisi è semplificata da un'equazione di combustione a un passo di un combustibile  $C_x H_y O_z$ . Infine, viene modellata la radiazione e la sua interazione tra fase gassosa e fase solida. Maggiori dettagli sul solutore sono disponibili nel documento di Mell et al (2009) [3].

La prima parte di questo rapporto presenta innanzitutto la modellazione della combustione delle sole siepi piatte. La seconda parte descrive la modellazione degli esperimenti condotti su EXPLORII. Infine, l'ultima parte presenta la modellazione di scenari di interfaccia foresta/habitat e fornisce raccomandazioni sulla progettazione del paesaggio.

# 1 Modellazione della combustione delle sole siepi di cisto

## 1.1 Richiamo del set-up sperimentale

Gli esperimenti con le sole siepi sono stati condotti con siepi ricostituite con rami di cisto di Montpellier collocate verticalmente in gabbie di rete saldata lunghe  $6\text{ m} \times 1\text{ m}$  di larghezza e  $\times 1\text{ m}$  di altezza, garantendo il mantenimento di un carico di combustibile di  $8\text{ kg/m}^3$  corrispondente al carico naturale degli arbusti di cisto [2]. Per consentire alla siepe di accendersi, è stata aggiunta una lettiera di trucioli di legno larga  $2\text{ m}$  davanti alla siepe per tutta la sua lunghezza con un carico di  $1\text{ kg/m}^2$ . I misuratori di flusso radiativo raffreddato (MEDTHERM 64P-02-24T) e totale (MEDTHERM GTW-10-32-485A) sono stati posizionati a  $3\text{ m}$  dalla siepe su supporti e protetti da lastre di silicato di calcio. Per osservare la propagazione del fuoco e la geometria del fronte di fiamma, sono state posizionate intorno al dispositivo fotocamere CANON 80D dotate di sensori APSC accoppiati a obiettivi CANON con una lunghezza focale di  $18\text{ mm}$ . La disposizione dei diversi dispositivi di misurazione è illustrata nella figura Figura 1. Le lettere R e T indicano la posizione dei misuratori di flusso radiativo e totale, rispettivamente. Sono state misurate le condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa dell'aria, direzione e velocità del vento) e il contenuto d'acqua 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 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  $\pm 0,1\text{ K}$  per la temperatura esterna). Per la misurazione del vento incidente, un anemometro GILL INSTRUMENT Wind Sonic è stato posizionato a un'altezza di  $2,5\text{ m}$  sul sito di prova, a una distanza di  $15\text{ m}$  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  $0,25\text{ s}$ . La frequenza di campionamento per la misura del vento è stata impostata a  $1\text{ Hz}$ . Il Tabella 1 mostra l'insieme delle statistiche medie per i test con le coperture. La direzione  $0^\circ$  corrisponde all'asse del dispositivo.



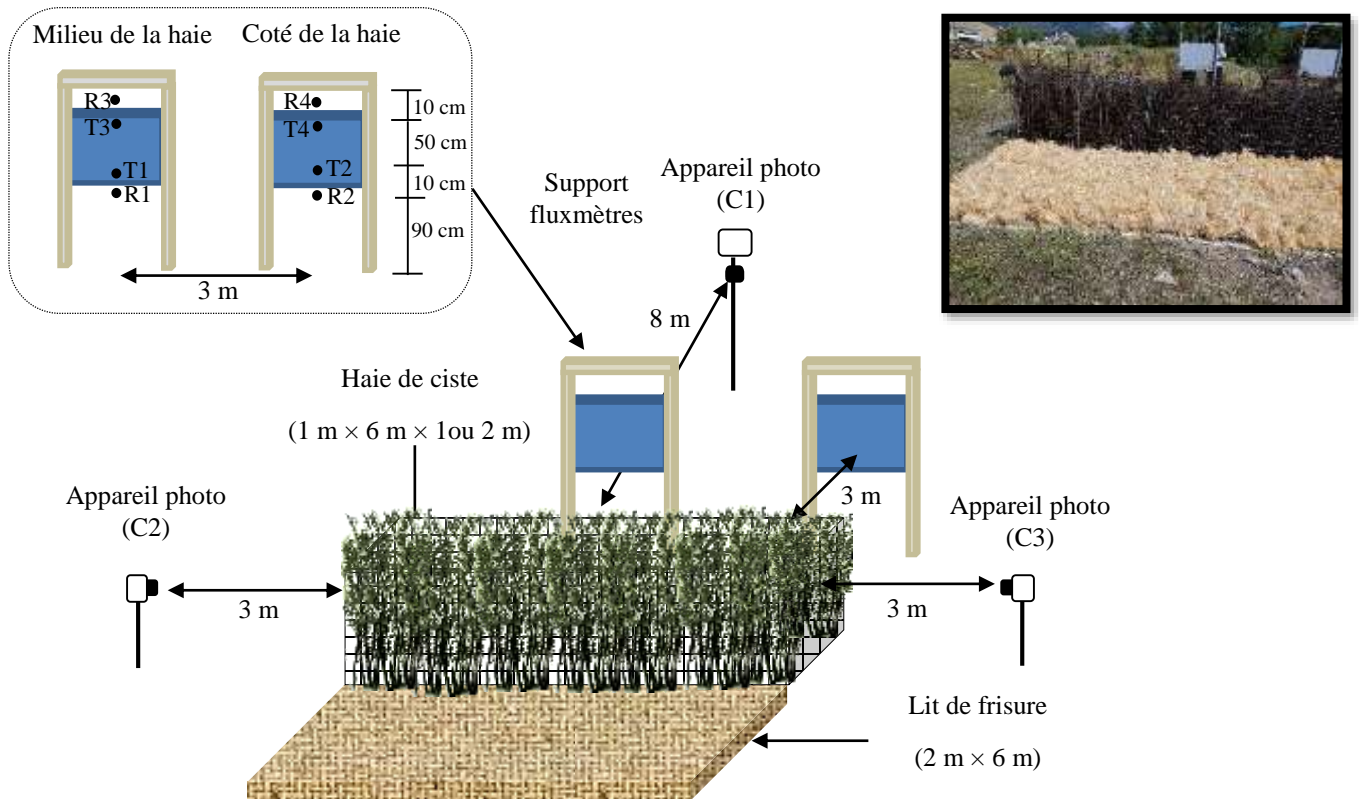


Figura 1 Posizione dei sensori per i test con siepi di cisto di 6 m da sole.

Tabella 1 Statistiche atmosferiche medie per lo studio della sola siepe.

Dimensioni della siepe (m × m × m)	Velocità U (m/s)	Direzione (°)	Temperatura dell'aria (° C)	Umidità relativa dell'aria (%)
6 × 1 × 1	2,47 ±1.3	47 ±51	18,1	37,5

## 1.2 Configurazione digitale per bruciare solo le siepi

Per rappresentare la combustione delle siepi di cisto di 6 m, il volume del dominio numerico è stato impostato a  $L \times l \times H = 50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$  e la siepe è stata posizionata al centro del dominio. Questa dimensione del dominio evita qualsiasi interazione tra le condizioni al contorno e la soluzione numerica in prossimità delle coperture. Il dominio è stato meshato utilizzando due diverse dimensioni di celle esaedriche. Per il  $20 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$  intorno alla siepe, la dimensione delle celle è stata impostata a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 12,5 \text{ cm}$  che è risultato il miglior compromesso tra accuratezza e costo computazionale. Nel resto del dominio numerico, la dimensione della maglia è stata impostata a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25 \text{ cm}$ . Il vento ambientale è stato modellato con un profilo verticale utilizzando una legge di potenza 1/7 per la quale sono state prese in considerazione la velocità e la direzione medie del vento registrate durante la prova:

$$\mathbf{u} = u_{\infty} \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1}{7}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

dove  $\theta$  è l'incidenza del vento nel piano x-y e  $z_0$  l'altezza di riferimento fissata a 2 m (altitudine dell'anemometro).

All'uscita del dominio sono state definite condizioni di flusso a pressione costante. In alto e in basso sono state utilizzate rispettivamente le condizioni di scorrimento libero e di parete. Ai lati del dominio sono state considerate condizioni al contorno periodiche per tenere conto della direzione del vento. I sensori digitali di flusso radiativo e totale sono stati posizionati nella stessa posizione dei sensori sperimentali. Il Figura 2 mostra il dominio di calcolo con le condizioni al contorno.

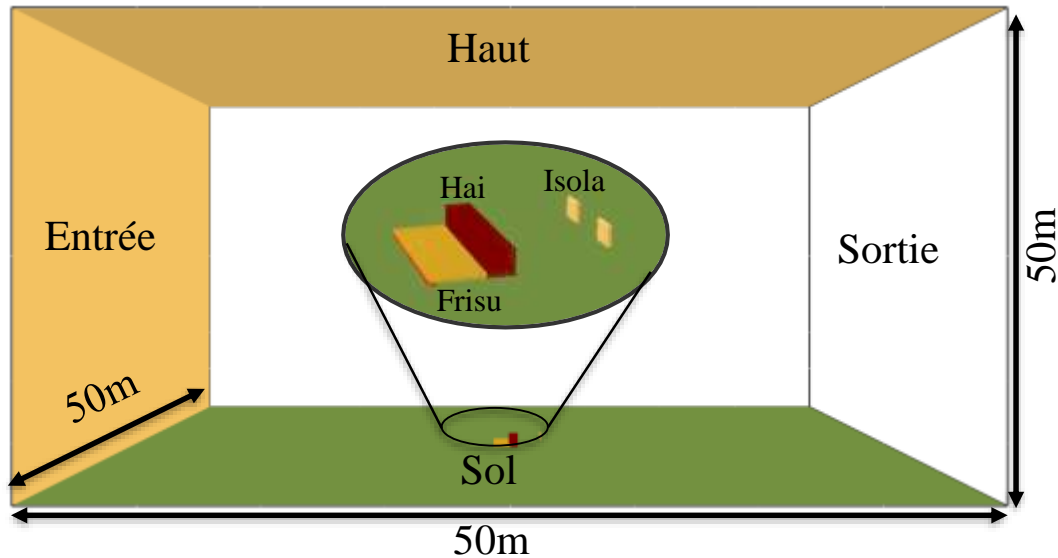


Figura 2 Rappresentazione del dominio di calcolo utilizzato per modellare la combustione delle sole siepi.

La siepe di cisto è stata modellata utilizzando un approccio Fuel Element ed è stata suddivisa in 6 strati (1 strato ogni 12,5 cm). Inoltre, sono state considerate 6 classi di particelle: fiori, foglie e ramoscelli di diametro 0-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm e 6-25 mm. Le caratteristiche e la distribuzione spaziale di ciascuna classe di particelle sono state ottenute dalle misurazioni di laboratorio presentate nel deliverable T.1.3.2 di INTERMED. Anche la lettiera di trucioli di legno è stata modellata utilizzando un approccio a elementi combustibili. Le proprietà termofisiche utilizzate per modellare i trucioli di legno e la siepe sono state ricavate dalla letteratura [2, 8], ad eccezione della frazione di residuo carbonioso e della frazione di cenere che sono state determinate sperimentalmente. La combustione in fase gassosa è stata modellata con una reazione globale a un passo, considerando un combustibile del tipo  $CxHyOz$  dove  $x=2,95$ ,  $y=5,87$  e  $z=2,76$  (ottenuti dall'analisi elementare del cisto). I coefficienti di Arrhenius associati al processo di degradazione termica sono stati ottenuti da Morandini et al. e Sanchez-Monroy et al. [2, 8].

### 1.3 Risultati numerici

Il Figura 3 mostra un confronto tra i fronti di fiamma sperimentali e numerici. Per i risultati numerici, abbiamo utilizzato una iso-superficie di 200 kW/m<sup>3</sup> del HRRPUV (Heat Release Rate Per Unit Volume) per rappresentare il fronte di fiamma. Per l'intera combustione, il codice di calcolo consente di rappresentare la dinamica dell'incendio nella siepe. Qualitativamente, la geometria della fiamma e il suo orientamento durante le diverse fasi della combustione della siepe sono correttamente previsti dal modello numerico. Questi risultati sono in accordo con le osservazioni effettuate in laboratorio da Meerpoel-Pietri et al [7] su una siepe ricostruita di cisto di Montpellier.

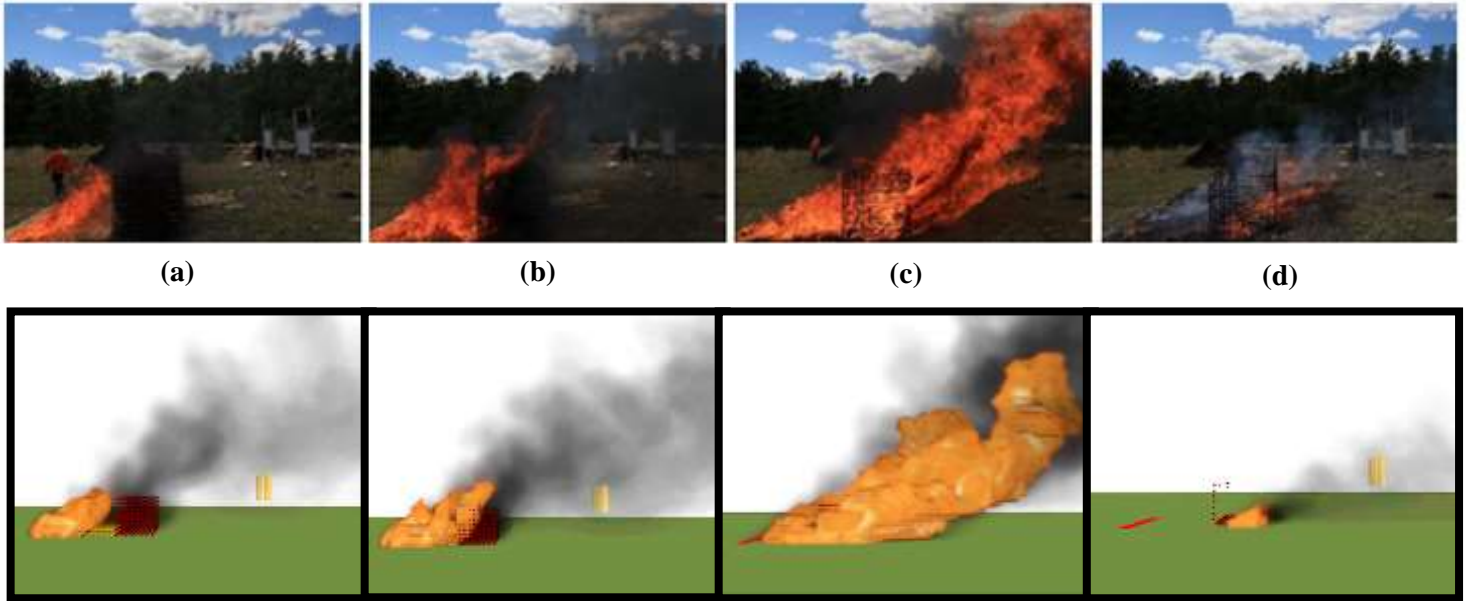


Figura 3 Confronto tra risultati sperimentali e numerici per la combustione di una siepe alta 1 m a) Propagazione del fuoco nel riccio di legno (t = 1 s) b) Accensione della siepe (t = 5 s) c) Combustione della siepe (t = 19 s) d) Combustione delle particelle più spesse (t = 61 s)

Il Figura 4 mostra le densità di flusso totale e radiativo sperimentali e numeriche a 3 m dalla siepe. Il confronto delle curve mostra che, nel complesso, il codice riproduce bene la dinamica dei flussi di calore totali e radiativi situati a 3 m dalla siepe. Le simulazioni sono in effetti molto vicine ai dati sperimentali fino a circa 50 s, che corrisponde al periodo in cui la combustione della siepe è più intensa. Da t=50s in poi, la curva numerica si discosta fortemente da quella sperimentale fino a raggiungere l'estinzione. Queste differenze sono dovute principalmente al fatto che il codice di calcolo non tiene conto del collasso delle particelle di grandi dimensioni alla fine della combustione, che porta a un'estinzione numerica più rapida. Questa discrepanza era già stata osservata da Meerpoel-Pietri et al [7] durante la combustione in laboratorio di piccole siepi. Alla luce di questi elementi, è stato validato il modello numerico per la simulazione delle siepi a scala di campo.

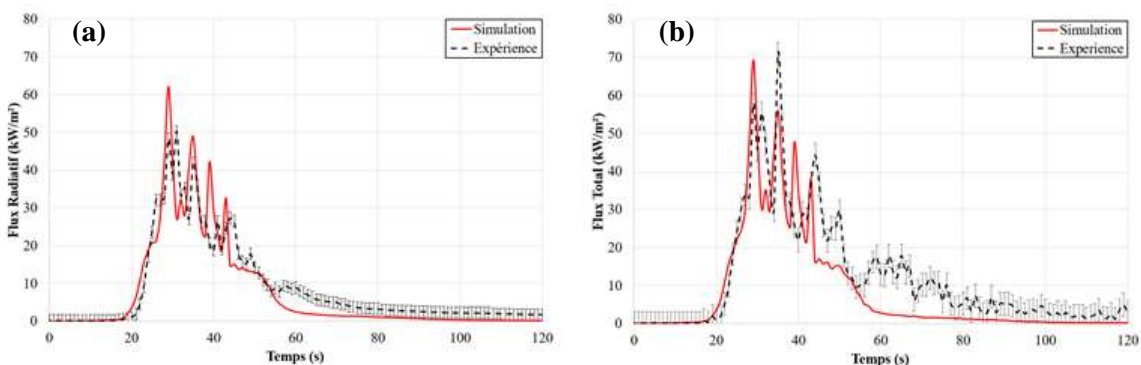


Figura 4 a) Densità di flusso radiativo b) Densità di flusso totale.

# 1 Modellazione degli esperimenti condotti sulla piattaforma EXPLORII con le siepi

## 1.1 Richiamo del set-up sperimentale

Per convalidare il codice di calcolo in presenza di un pendio e di un edificio, abbiamo utilizzato gli esperimenti effettuati sulla piattaforma EXPLORII con siepi di 6 m di lunghezza per 1 m di larghezza e 1 m di altezza. Come in precedenza, la siepe è stata ricostituita da rami di cisto tagliati ed è stata posta sulla cella di pesatura posizionata a 3 m dall'edificio (Figura 5). I trucioli di legno sono stati applicati uniformemente con un carico di  $1 \text{ kg/m}^2$  sulla pendenza di  $20^\circ$  di fronte alla casa su un'area di 5 m di lunghezza e 6 m di larghezza, per consentire l'illuminazione della siepe. 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. Una GoPro è stata posizionata su un albero telescopico in fondo al pendio per osservare la parte posteriore del fronte dell'incendio. Per misurare la densità del flusso di calore che potrebbe avere un impatto sull'edificio, due coppie di misuratori di flusso radiativo e totale sono state collocate tra le finestre, cioè sulla facciata a 3 m dalla siepe. I risultati sperimentali presentati di seguito sono medie di esperimenti in cui il vento era in direzione della pendenza della piattaforma. Le barre di errore mostrano la variabilità dei dati sperimentali.

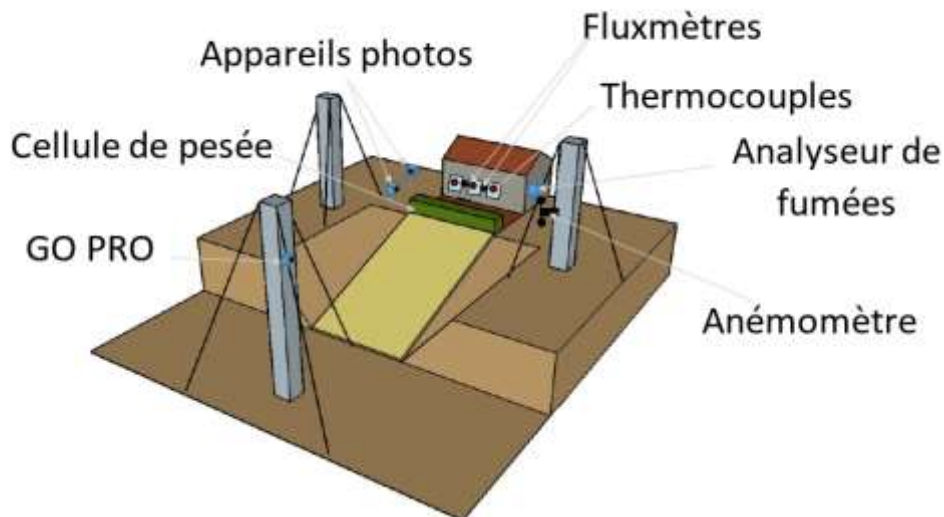


Figura 5 Dispositivo sperimentale sulla piattaforma EXPLORII

## 2.2 Configurazione numerica per la modellazione della piattaforma EXPLORII

Per rappresentare gli esperimenti di combustione eseguiti sulla piattaforma EXPLORII, il volume del dominio numerico è stato impostato a  $L \times l \times H = 96 \times 64 \times 32 \text{ m}^3$  (Figura 6). L'origine del dominio di calcolo è stata posizionata all'inizio della pendenza di  $20^\circ$ . Questa

dimensione del dominio evita qualsiasi interazione tra le condizioni al contorno e la soluzione numerica in prossimità delle coperture. Come in precedenza, il dominio è stato retinato utilizzando due diverse dimensioni di celle esaedriche. Per il  $48 \times 64 \times 16 \text{ m}^3$  intorno alla siepe, la dimensione delle celle è stata impostata a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 12,5 \text{ cm}$  che è risultato il miglior compromesso tra accuratezza e costo computazionale. Nel resto del dominio numerico, la dimensione della maglia è stata impostata a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25 \text{ cm}$ . Il vento ambientale è stato modellato con un profilo verticale utilizzando una legge di potenza 1/7 (equazione 1) con una velocità di 2,6 m/s all'altezza dell'anemometro (cioè a un'altezza di 7,75 m dal fondo del pendio) e un vento lungo l'asse del pendio. All'uscita del dominio sono state definite condizioni di flusso a pressione costante. Per i lati superiore e inferiore del dominio sono state utilizzate rispettivamente le condizioni di free-slip e di parete. Sui lati del dominio sono state considerate condizioni al contorno periodiche per tenere conto della direzione del vento. I sensori digitali di flusso radiativo e totale e i sensori digitali di temperatura sono stati posizionati nella stessa posizione dei sensori sperimentali. La modellazione della vegetazione (siepe ornamentale e riccio di pino) è identica a quella utilizzata per le simulazioni di combustione della sola siepe di cisto (paragrafo 1.2). Sono state modellate le facciate, le finestre e il tetto della casa. Tuttavia, l'interno non è stato preso in considerazione per le simulazioni.

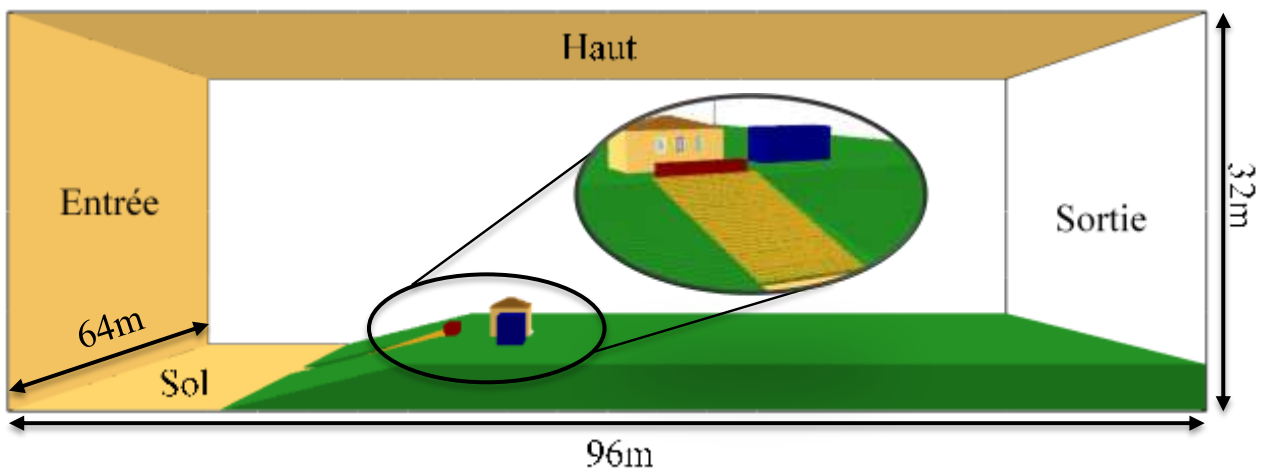


Figura 6 Rappresentazione a fumetti del dominio computazionale utilizzato per modellare gli esperimenti sulla piattaforma EXPLORII.

## 2.3 Risultati numerici

Il Figura 7 mostra un confronto tra i fronti di fiamma sperimentali e numerici. Per i risultati numerici, abbiamo utilizzato una iso-superficie di  $200 \text{ kW/m}^3$  del HRRPUV (Heat Release Rate Per Unit Volume) per rappresentare il fronte di fiamma. Come nel caso delle simulazioni di incendio di una singola siepe, il codice di calcolo consente di rappresentare la dinamica dell'incendio sia nel pendio che nella siepe. Qualitativamente, la geometria della fiamma e il suo orientamento durante le diverse fasi della combustione sono correttamente previsti dal modello numerico. Si può anche notare che il codice prevede correttamente l'influenza della costruzione e della pendenza sull'inclinazione delle fiamme.

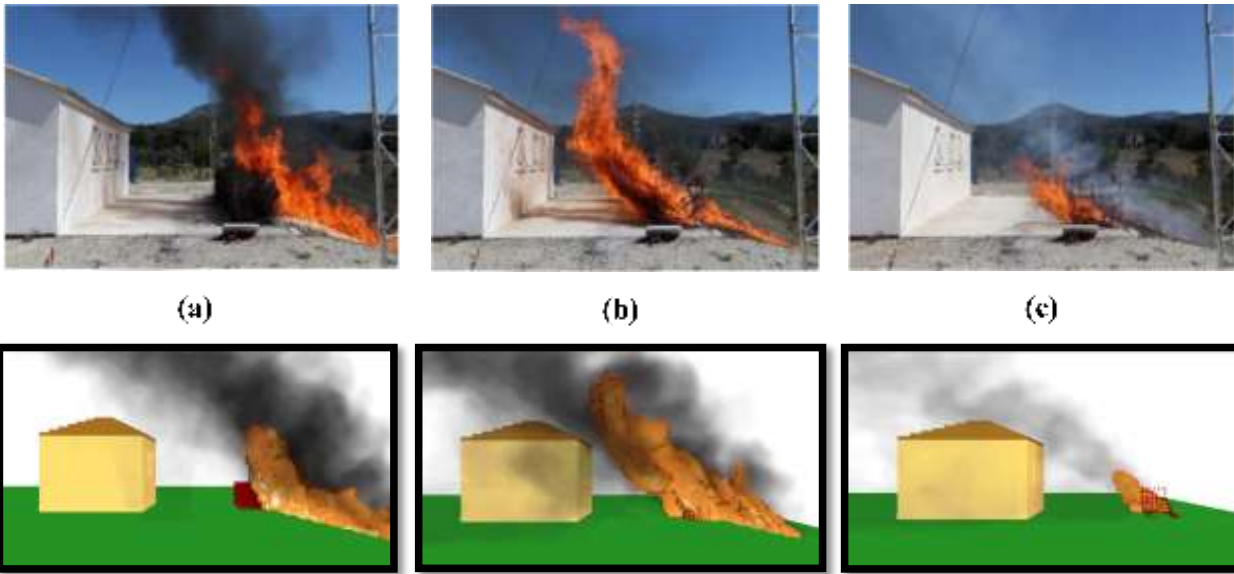


Figura 7 Confronto tra risultati sperimentali e numerici per la combustione di una siepe alta 1 m sulla piattaforma EXPLORII: a) Accensione della siepe, b) Bruciatura della siepe, c) Bruciatura delle particelle più spesse

Il confronto tra gli esperimenti e le simulazioni è stato effettuato sulla base della perdita di massa della siepe e delle densità di flusso sulla facciata esposta dell'edificio. Per questa parte dello studio, il tempo  $t=0$  s corrisponde al momento in cui la siepe viene accesa. Il Figura 8 presenta l'evoluzione della massa prevista e sperimentale e del tasso di perdita di massa (MLR). Gli esperimenti e le simulazioni sono molto vicini fino a 25 s. Successivamente, il modello sovrastima il tasso di perdita di massa. Questo porta a un consumo più rapido e all'estinzione della siepe. Si noti inoltre che il modello prevede una combustione quasi completa della siepe (massa residua pari all'1,5% della massa iniziale) mentre sperimentalmente rimane in media il 3,7% della massa iniziale.

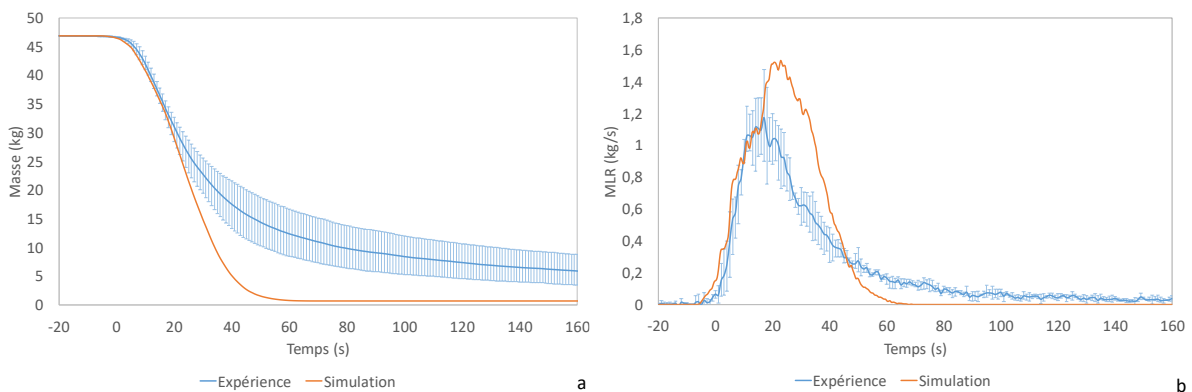


Figura 8 Andamento previsto e sperimentale della siepe in a) massa e b) tasso di perdita di massa

Il Figura 9 mostra le densità di flusso totale e radiativo previste e sperimentali a 3 m dalla siepe sulla facciata. I valori corrispondono alle medie dei 2 sensori presenti sulla facciata. Il modello numerico tende a sottostimare l'aumento del flusso al momento dell'accensione della siepe. Tuttavia, le densità di flusso di picco previste sono molto vicine ai valori sperimentali. La simulazione fornisce una densità di flusso radiativo di picco di  $28,7 (\pm 0,3) \text{ kW/m}^2$  e un totale di  $29,3 (\pm 0,9) \text{ kW/m}^2$ . Per gli esperimenti, abbiamo ottenuto picchi medi di  $24,6 \text{ kW/m}^2$  per la densità di flusso radiativo e di  $27,7 \text{ kW/m}^2$  per la densità di flusso totale. Pertanto, l'impatto

dell'incendio sull'edificio è piuttosto ben previsto. Il modello numerico fornisce quindi risultati molto incoraggianti, ma richiederà miglioramenti per rappresentare meglio la combustione della siepe e quindi l'impatto temporale dell'incendio sull'edificio.

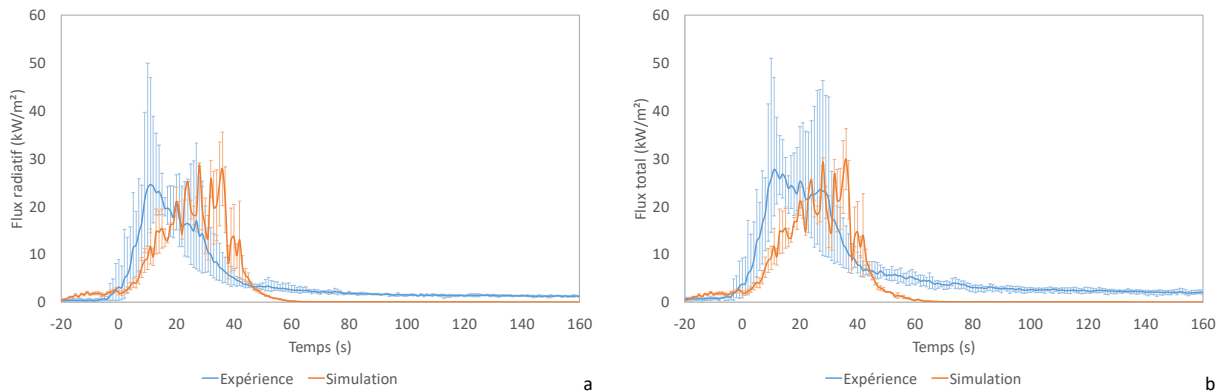


Figura 9 Densità di flusso medie a) radiative b) totali - previste e sperimentali a 3 m dalla siepe in facciata

## 3 Modellazione di uno scenario di incendio all'interfaccia foresta/casa

### 3.1 Definizione di scenari

Inizialmente, avevamo previsto di considerare il caso di una casa situata in un ambiente di tipo pineta di Aleppo. L'approccio prevedeva, per ragioni di tempo di calcolo, due fasi complementari:

- Modellazione della propagazione del fuoco in un'area di tipo forestale non ripulita, come calcolo preliminare, per determinare la potenza media del fuoco che arriva su un'area ripulita. L'area di studio proposta per l'area non bonificata era di 60m x 45m.
- Lo studio del comportamento e dell'impatto del fuoco in un'area bonificata che comprendeva una casa unifamiliare per la quale la vegetazione doveva essere sistemata in conformità con l'ordine di bonifica della regione Corsica. Sono state previste due zone: 52,5m x 30m e 72,5m x 30m per tenere conto delle normative della Corsica e della Liguria.

I progressi e gli scambi con i diversi partner del progetto hanno permesso di evolvere questo approccio in due aspetti essenziali:

- Per quanto riguarda la vegetazione, è emerso che mentre la foresta di tipo pino d'Aleppo potrebbe essere interessante per alcuni dipartimenti del sud-est della Francia, lo stesso non vale per la Corsica. I membri del progetto hanno quindi convenuto che la foresta di tipo sughereta (soprattutto in vista dell'incendio di Gonfaron dell'estate 2021) sarebbe stata più appropriata per la Corsica e il Var. Si è quindi deciso di modificare gli scenari considerando una foresta di querce da sughero invece di una foresta di pini d'Aleppo.
- Lo studio numerico preliminare ha dimostrato che la potenza di calcolo disponibile offre la possibilità di simulare (in meno di 24 ore) la propagazione di un incendio per un dominio di 110m x 40m x 32m. Si è quindi deciso di simulare gli scenari su un unico dominio di calcolo comprendente l'area forestale non ripulita e l'area ripulita con la casa (Figura 10).

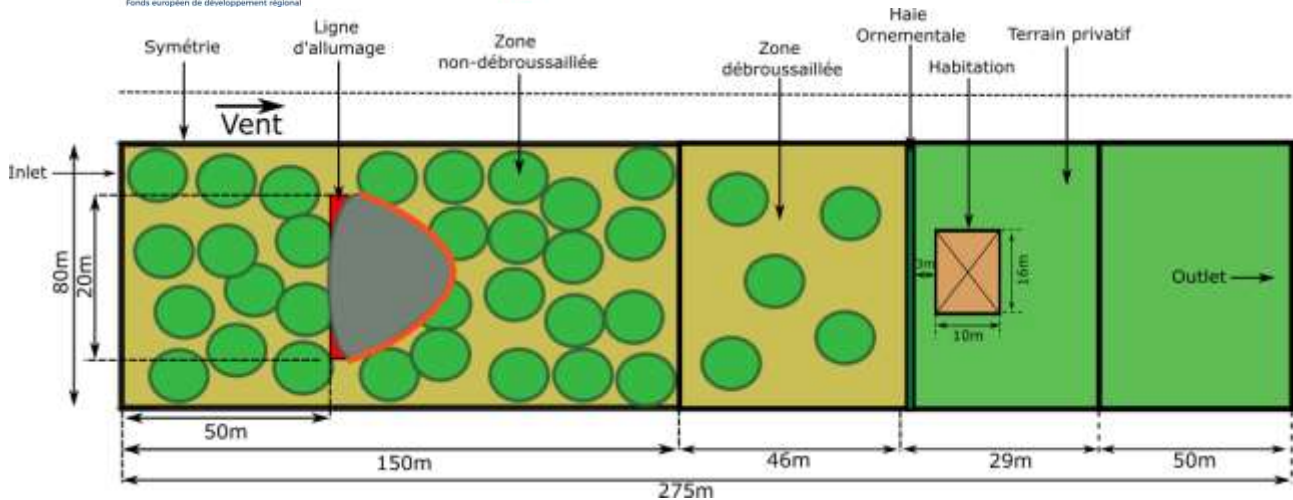


Figura 10 Diagramma schematico del dominio di calcolo per gli scenari di interfaccia foresta-habitat (aree disboscate e non disboscate)

Per le condizioni ambientali, ci siamo posti in una situazione estrema corrispondente a una temperatura dell'aria di 40°C e a un'umidità relativa dell'aria del 10%. Per il vento, sono state studiate due configurazioni: 25 km/h e 50 km/h.

Per la vegetazione, abbiamo considerato le seguenti condizioni:

- La vegetazione dell'area non bonificata è costituita da un bosco aperto di querce da sughero. La foresta comprende uno strato di arbusti alti e lettiera con un carico complessivo di biomassa di circa 30 t/ha. L'altezza dominante degli individui è di 7 metri.
- La vegetazione nell'area ripulita corrisponde a un popolamento aperto di quercia da sughero (altezza dominante 7 m) con una riduzione della densità arborea della metà rispetto all'area non ripulita. La disposizione degli alberi rispetta i decreti di decespugliamento della Corsica:
  - Gli alberi e gli arbusti si trovano ad almeno 3 m dall'edificio.
  - La distanza tra i rami inferiori degli alberi è di 2 m, mentre l'altezza della ricrescita è fissata a 0,2 m.

La vegetazione comprende anche la ricrescita della vegetazione ripulita, con un carico complessivo di biomassa di circa 12 t/ha. Questo valore corrisponde a un caso limite di ricrescita annuale per rimanere operativi secondo il parere degli esperti.

Per tenere conto del ruolo della distribuzione degli alberi nell'area disboscata, abbiamo modellato due scenari, uno con una distribuzione pseudo-omogenea (Figura 11a) e uno scenario con cluster di alberi (Figura 11b)). A tal fine abbiamo utilizzato modelli di statistica spaziale. In entrambi i casi, il numero e le caratteristiche degli alberi sono identici.



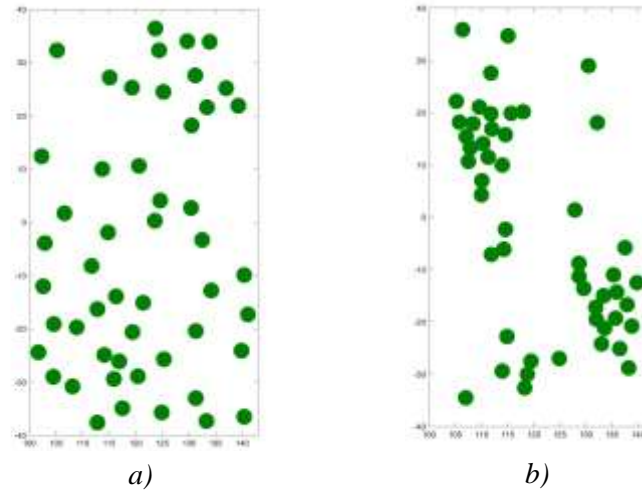


Figura 11 Distribuzione spaziale degli alberi nell'area bonificata. a) Distribuzione pseudo-omogenea. b) Distribuzione con gruppi di alberi.

- Una siepe di vegetazione ornamentale separa l'area sgombra dalla casa. La siepe si trova a 3 m dalla casa e a 3 m dalla chioma dell'albero più vicino per rispettare le norme di decespugliamento della Corsica.

I dati sulla copertura e sull'altezza media delle specie sono stati forniti dall'INRAE, così come la densità apparente delle particelle fini degli alberi. I valori del contenuto d'acqua per le diverse specie considerate sono stati ottenuti dai registri storici del "Réseau Hydrique" [10].

### 3.2 Configurazione digitale di uno scenario di interfaccia foresta/abitazione

Le dimensioni del dominio di calcolo sono state fissate a 275 m x 80 m x 70 m (Figura 12). Il dominio è stato suddiviso in due zone, la prima che copre l'intera superficie del dominio fino a 32 m di altezza e la seconda che copre la parte superiore del dominio. Nella prima zona, dove avviene la combustione, la dimensione della maglia è pari a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25$  cm, mentre nella seconda zona la dimensione della maglia è  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50$  cm. Il vento è stato modellato con un profilo verticale che segue una legge di potenza 1/7 (equazione 1). L'accensione viene eseguita dopo aver permesso al flusso di svilupparsi completamente in tutto il dominio. Le condizioni periodiche sono state applicate ai lati sinistro e destro del dominio. Nella parte superiore del dominio sono state utilizzate condizioni di scorrimento libero, mentre all'uscita del dominio è stata impostata una condizione di flusso a pressione costante.

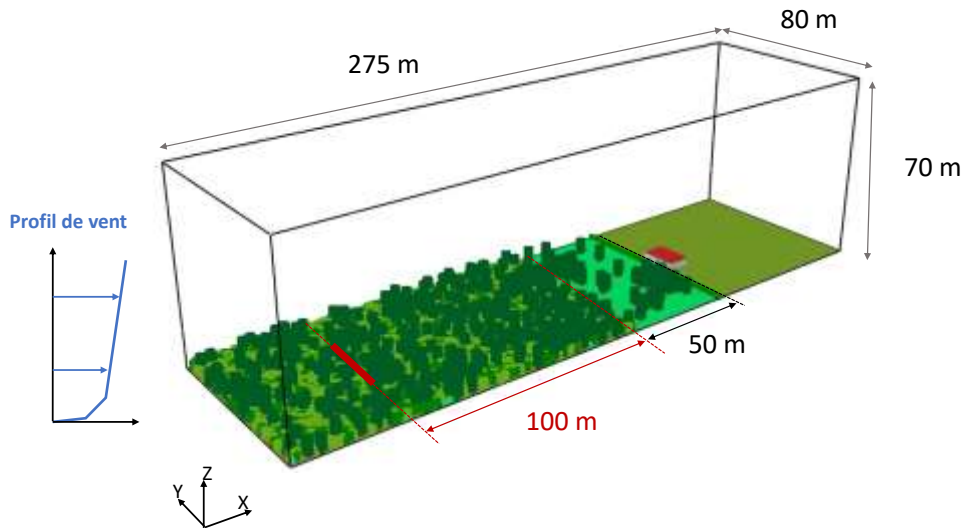


Figura 12 Dominio numerico utilizzato per gli scenari di incendio all'interfaccia foresta/habitat

La vegetazione di superficie (cioè la crescita di lettiera, erba e arbusti nell'area bonificata) è stata modellata utilizzando l'approccio Fuel Boundary abbinato a un sottomodulo di pirolisi lineare per la degradazione termica in fase solida. Gli altri elementi della vegetazione sono stati modellati utilizzando l'approccio Fuel Element combinato con un modello di tipo Arrhenius per la degradazione in fase solida (pirolisi e ossidazione del carbone).

Per la modellazione dell'abitazione, abbiamo posizionato diverse aperture nella facciata dell'edificio più esposta al fuoco, ovvero una porta finestra centrale e due finestre ai lati della porta finestra.

### 3.3 Risultati numerici

I risultati numerici presentano prima l'analisi della dinamica di propagazione dell'incendio e poi l'impatto dell'incendio sulla casa.

Il Figura 13 mostra la posizione del fronte di fiamma nel tempo per una velocità del vento di 50 km/h, rappresentata numericamente dalla potenza di fuoco al suolo per unità di superficie ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ). In questa figura, le linee nere indicano il confine tra la foresta (a sinistra) e l'area ripulita (a destra), mentre le due linee verdi indicano la posizione della siepe. Nelle due configurazioni di vegetazione studiate (Figura 13a) e b)), il fronte di fiamma è stato tracciato agli stessi tempi per confrontarne l'evoluzione. Questi risultati dimostrano che quando l'incendio si avvicina all'area bonificata, la forma del fronte di fiamma è diversa nei due casi (si veda il fronte di fiamma indicato dalle frecce rosse nel diagramma Figura 13). Ciò indica un cambiamento nella dinamica di propagazione ai margini dell'area bonificata. Infatti, la distribuzione spaziale degli alberi nell'area bonificata ha un effetto sul campo di vento in quest'area (Figura 14), che spiega le differenze di comportamento. Si osserva inoltre che in entrambi i casi il fronte di fiamma si allarga non appena il fuoco attraversa l'area sgombra. Il cambiamento delle proprietà della vegetazione di superficie, la lettiera per la foresta e la ricrescita di arbusti per l'area disboscata, è all'origine di queste differenze. Per quanto riguarda la propagazione dell'incendio nell'area bonificata, si può notare che il fuoco avanza più rapidamente nella configurazione in cui gli alberi formano gruppi di individui perché negli stessi momenti del primo scenario (Figura 13a) il fuoco ha raggiunto la casa (posizione  $x=150$  m) mentre nel secondo scenario il fuoco non ha ancora raggiunto la siepe ornamentale

(Figura 13b)).

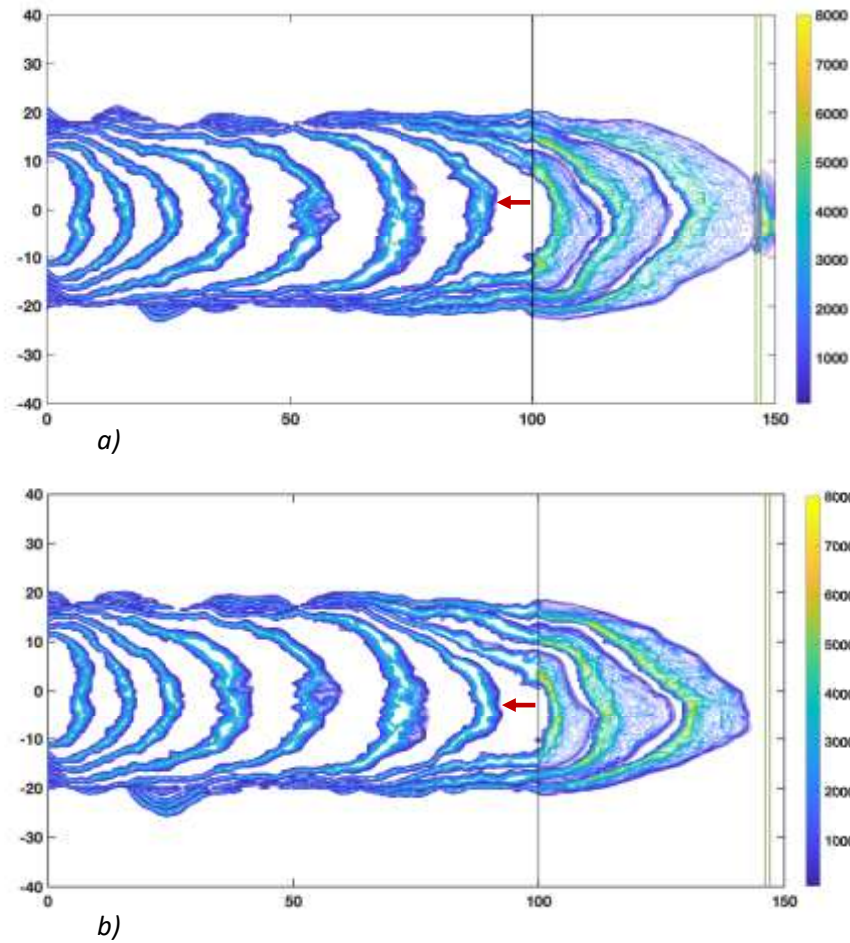


Figura 13 Potenza del fuoco per unità di superficie (kW/m<sup>2</sup>) per una velocità del vento di 50 km/h. a) Area ripulita con gruppi di alberi. b) Area ripulita con distribuzione pseudo-omogenea degli alberi.

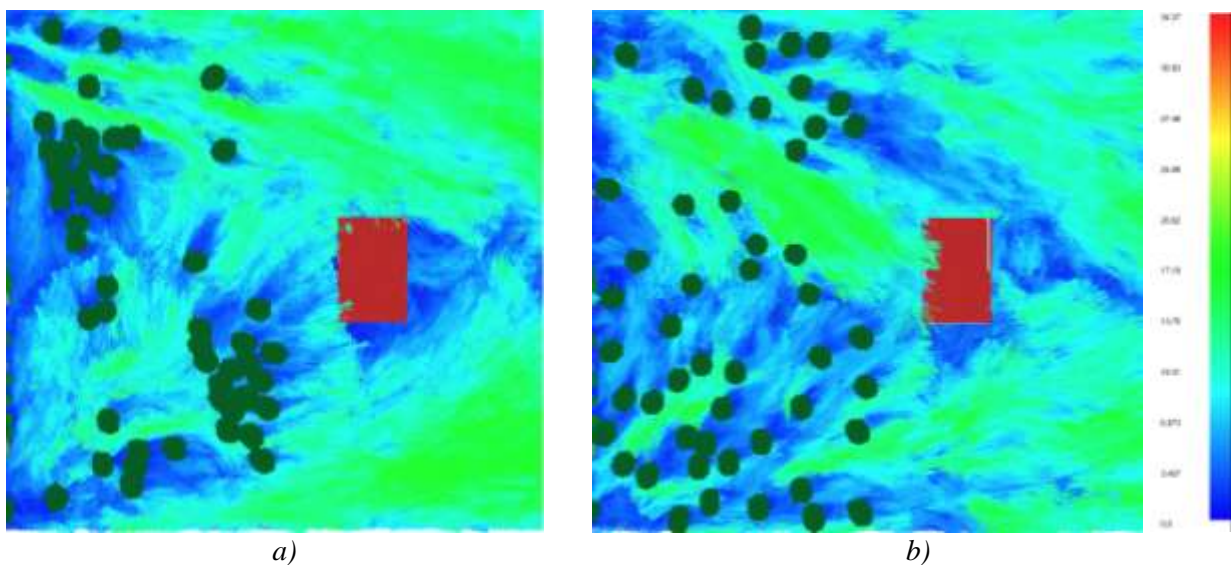


Figura 14 Rappresentazione del campo di vento a 2 m di altezza per una velocità del vento di 50 km/h, come resa da Smokeview. a) Area ripulita con gruppi di alberi. b) Area ripulita con una distribuzione pseudo-omogenea degli alberi..

Esaminando più in dettaglio la dinamica dell'incendio nell'area bonificata per il caso con ammassi di alberi e una velocità del vento di 50 km/h (Figura 15.a e Figura 16.a), si verifica un cambiamento di regime nella propagazione dell'incendio, che si riflette in una variazione della velocità di propagazione da 2,04 m/s a 3,04 m/s. Quando gli alberi che si trovano nell'asse centrale di propagazione sono consumati, il vento può intervenire e spingere le fiamme, provocando un'accelerazione dell'incendio. Per il caso con una distribuzione ad albero pseudo-omogenea (Figura 15.b e Figura 16.b), si osserva anche un cambiamento di regime, ma si verifica più tardi, quando l'incendio si trova a soli 10 m dalla casa, perché gli alberi nella parte centrale dell'area bonificata non bruciano al passaggio del fuoco e bloccano parzialmente il flusso. In questo caso, la velocità di propagazione è 2,16 m/s e poi 3,30 m/s.

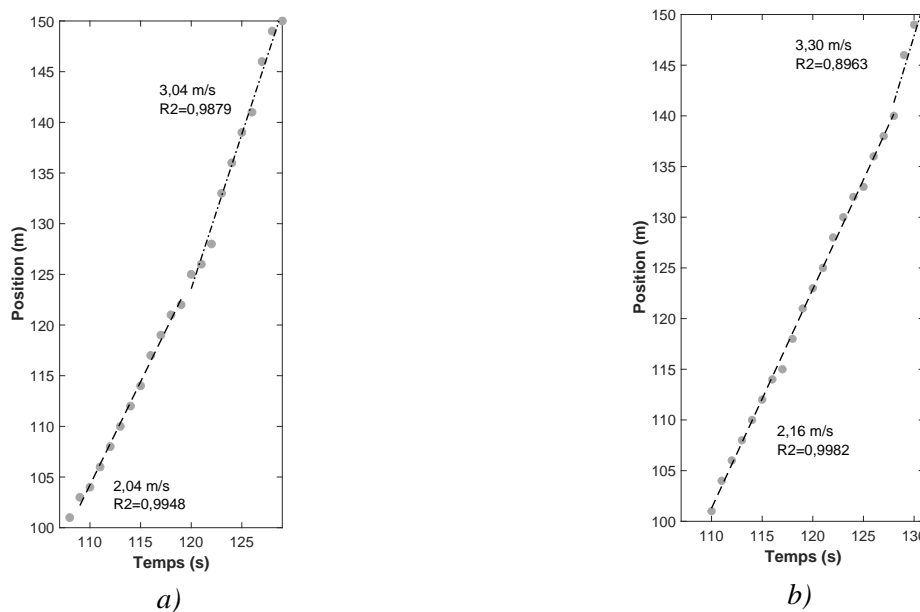


Figura 15 Posizione del fronte di fiamma nel tempo nell'area bonificata con i due scenari studiati per una velocità del vento di 50 km/h. a) falda arborea formata da gruppi di individui. b) falda arborea pseudo-omogenea.

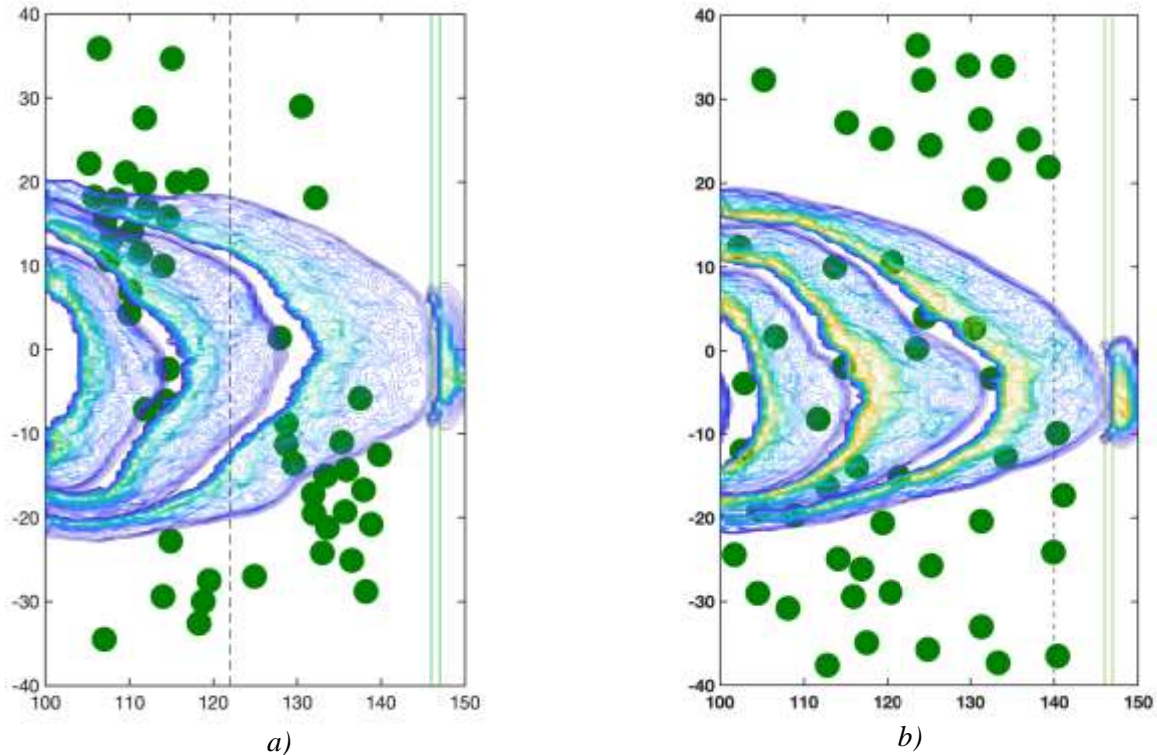


Figura 16 Posizione del fronte di fiamma nel tempo nell'area bonificata per una velocità del vento di 50 km/h per a) strato arboreo che forma gruppi di individui b) strato arboreo pseudo-omogeneo. Le linee tratteggiate indicano il cambiamento di regime. È inoltre importante notare che i fronti di fiamma mostrati in queste figure non corrispondono agli stessi punti temporali.

Per quanto riguarda l'impatto dell'incendio sull'abitazione, il Figura 17 presenta il flusso radiativo ricevuto dalle finestre per lo scenario con uno strato di alberi che formano gruppi di individui e una velocità del vento di 50 km/h. In questa figura si può notare che il tempo di esposizione per entrambe le finestre è equivalente (circa 10 secondi), mentre non lo è il flusso ricevuto. Se il picco massimo del flusso radiativo è dello stesso ordine di grandezza in entrambi i casi, circa 150 kW/m<sup>2</sup>, le dinamiche di esposizione variano da una finestra all'altra. Un primo picco, di 90 kW/m<sup>2</sup>, si osserva per la finestra W1, in seguito al passaggio del fronte di fiamma attraverso la siepe e alla propagazione attraverso l'erba situata tra la siepe e la casa (punto 2). Il picco massimo di flusso (punto 3 per le finestre W1 e W2) è dovuto alla combustione della siepe e alla parte posteriore del fronte di fiamma. Quando il fronte di combustione nella siepe si propaga lateralmente, si osservano differenze in entrambe le finestre (punto 4 e 5). Per lo scenario con uno strato arboreo pseudo-omogeneo, poiché la traiettoria del fronte di fiamma non è allineata con l'asse centrale, il flusso radiativo ricevuto dalle due finestre è diverso, così come il tempo di esposizione, come illustrato nel diagramma Figura 18. Come nel caso precedente, il flusso ricevuto è massimo durante la combustione della siepe e l'avvicinamento della parte posteriore del fronte di fiamma. Il valore del flusso radiante massimo di picco ricevuto dalle due finestre è diverso, 120 kW/m<sup>2</sup> per una e 160 kW/m<sup>2</sup> per l'altra.

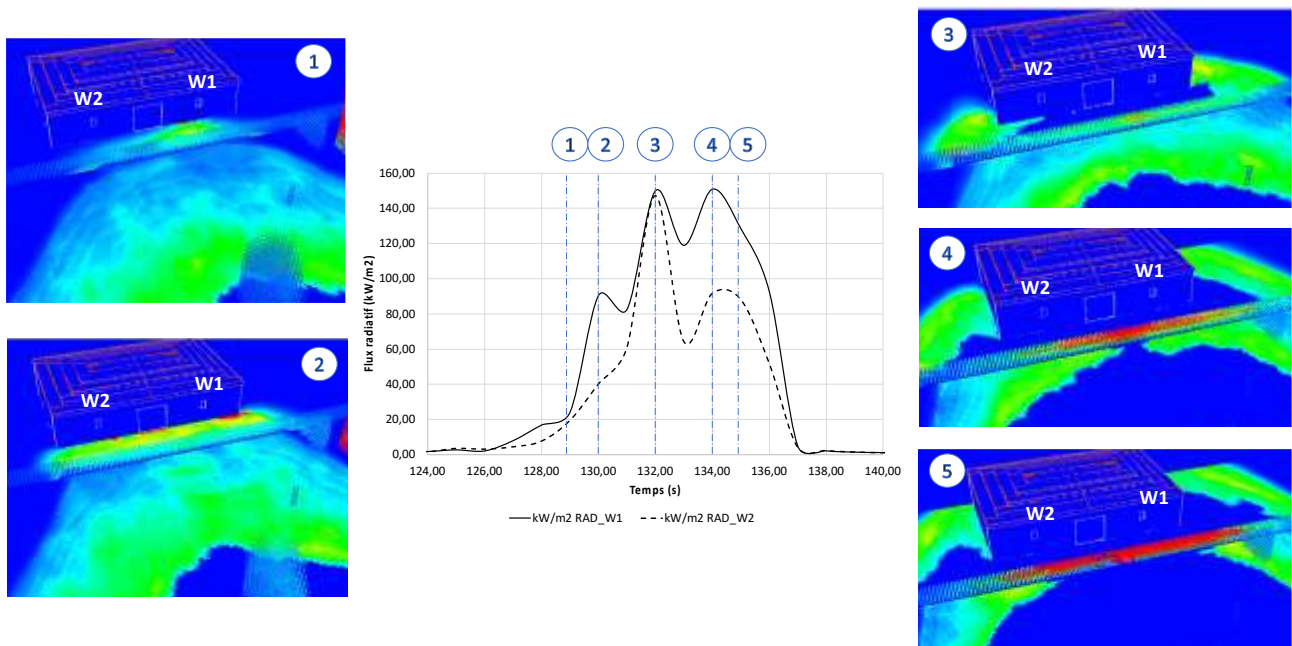


Figura 17 Flusso di radiazione ricevuto alle finestre per il caso con alberi che formano gruppi per un vento di 50 km/h. Immagini Smokeview per la potenza di fuoco al suolo per unità di superficie ( $\text{kW/m}^2$ ) e la temperatura delle particelle della siepe ornamentale.

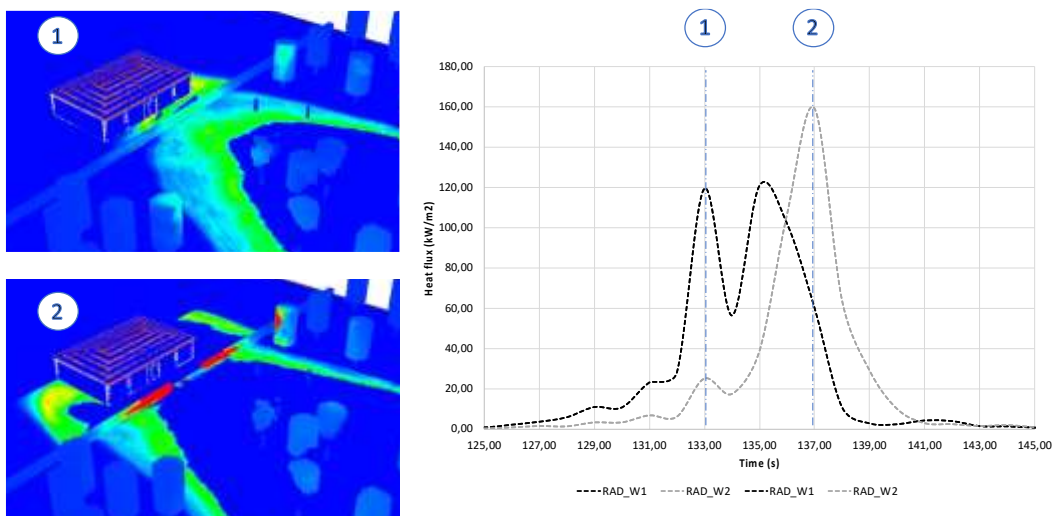


Figura 18 Flusso di radiazione ricevuto alle finestre per lo scenario con distribuzione pseudo-omogenea degli alberi per una velocità del vento di 50 km/h. Immagini di fumo per la potenza di fuoco al suolo per unità di superficie ( $\text{kW/m}^2$ ) e la temperatura delle particelle che formano la siepe ornamentale.

Il Figura 19 e Figura 20 mostrano i flussi radiativi ricevuti alle finestre per un vento di 25 km/h con una distribuzione pseudo-omogenea degli alberi e una distribuzione raggruppata degli alberi, rispettivamente. Il confronto di questi risultati con quelli precedenti mostra che i flussi di picco ricevuti con un vento di 25 km/h sono inferiori a quelli ottenuti con un vento di 50 km/h. Il vento influenza anche la durata dell'impatto dell'incendio sulla casa, poiché i flussi di picco appaiono solo a circa 210 s per il caso di 25 km/h, rispetto ai 130 s per il caso di 50 km/h. Per la distribuzione omogenea, il flusso massimo ricevuto dalla finestra W2 (immagine 1 sul grafico) è stato raggiunto con la finestra W2. Figura 19) è dovuto principalmente alla

combustione della siepe, sebbene anche la propagazione nell'erba davanti alla casa contribuisca tra i 445 s e i 455 s. Per la finestra W1 (immagine 2 della Figura 19), il flusso massimo si verifica quando la chioma di uno degli alberi vicini brucia. Per la finestra W2, il tempo di esposizione è di circa 20 secondi. Si tratta di tempi di esposizione più brevi di quelli osservati sperimentalmente, ma ciò è probabilmente dovuto al fatto che la modellizzazione considera solo foglie e particelle fini di 0-2 mm. Per una distribuzione con cluster ad albero, le dinamiche sono simili a quelle ottenute per una distribuzione omogenea (Figura 21). Tuttavia, i valori massimi per la finestra W2 sono più alti, il che può essere spiegato dalle differenze nella geometria della fiamma (inclinazione) ma anche dal tasso di consumo della siepe. Per tutti i casi studiati numericamente, sebbene non esistano in letteratura studi sperimentali in condizioni simili a quelle di queste simulazioni per confrontare i risultati numerici con le osservazioni sul campo, i risultati numerici ottenuti rimangono all'interno degli intervalli di valori che sono stati misurati per altri tipi di vegetazione e altre condizioni ([11], [12]).

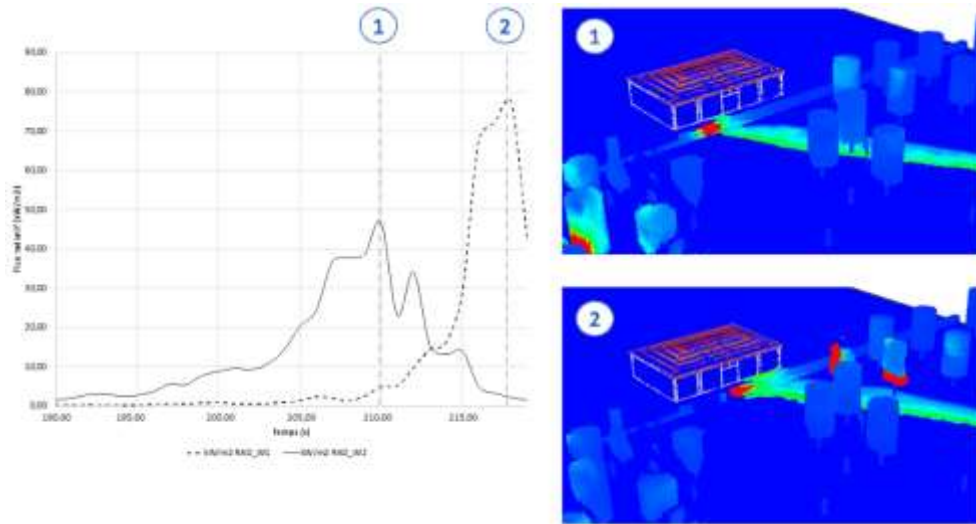


Figura 19 Flusso di radiazione ricevuto alle finestre per il caso con distribuzione pseudo-omogenea degli alberi per una velocità del vento di 25 km/h. Immagini Smokeview per la potenza di fuoco al suolo per unità di superficie (kW/m<sup>2</sup>) e la temperatura delle particelle della siepe ornamentale.

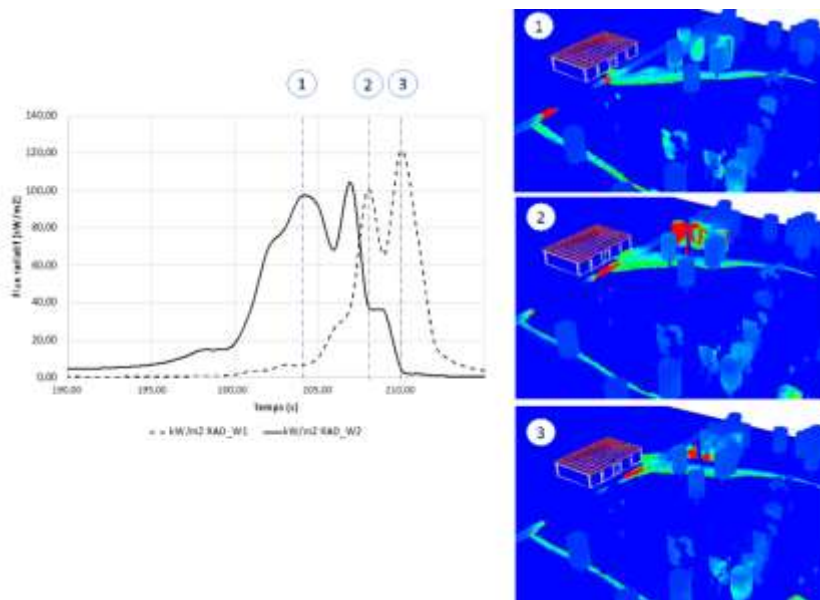


Figura 20 Flusso di radiazione ricevuto alle finestre per il caso con alberi a grappolo per una velocità del vento di 25 km/h. Immagini Smokeview per la potenza di fuoco al suolo per unità di superficie (kW/m<sup>2</sup>) e la temperatura delle particelle della siepe ornamentale

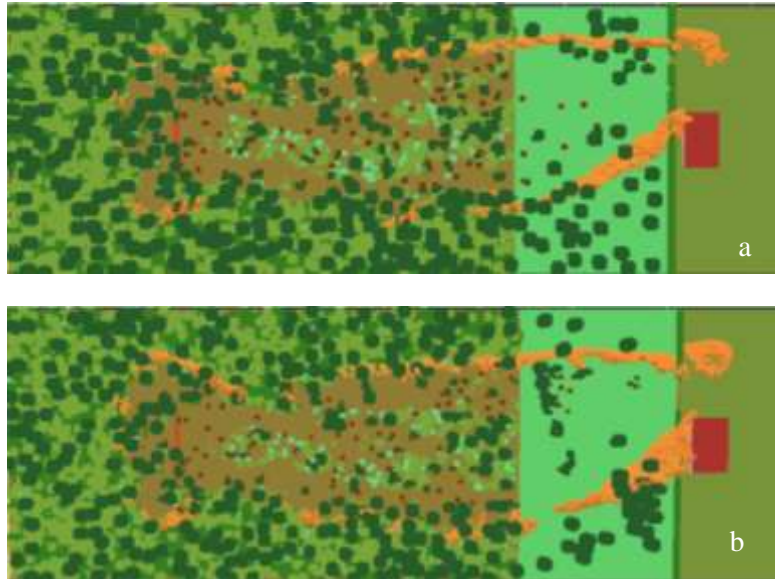


Figura 21 Fronte di fiamma per un vento di 25 km/h per una distribuzione di alberi a) con raggruppamento (t=206 s) b) pseudo-omogeneo (t=210 s).

## Conclusione

I diversi studi numerici presentati in questo rapporto hanno dimostrato che il codice WFDS con il modello di vegetazione adottato è in grado di modellare un incendio in un'interfaccia foresta/habitat. I tre studi presentati: siepe da sola, siepe rivolta verso un edificio e incendio che arriva da un'area non ripulita a un'area ripulita hanno evidenziato l'importanza di studiare in modo più dettagliato le interazioni tra la distribuzione spaziale della vegetazione, il vento e il comportamento del fuoco. Queste interazioni variano a seconda del tipo di incendio (di superficie e/o di chioma), della disposizione dell'area (posizione degli edifici, della vegetazione, ecc.) e delle condizioni ambientali che abbiamo scelto come estreme per temperatura e umidità e vento. Per giungere a raccomandazioni per lo sviluppo della vegetazione intorno agli edifici nelle interfacce foresta/abitat, sembra quindi necessario esaminare con gli operatori della sicurezza antincendio gli scenari che si vogliono favorire. Ciò consentirebbe di ottenere gli impatti sugli edifici e di dedurre i mezzi di prevenzione adeguati.

## Riferimenti

- [1] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication. (2013) 288.
- [2] 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
- [3] W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, S.L. Manzello, Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees, Combustion and Flame 156:2023-2041, 2009.
- [4] Y. Perez-Ramirez, W.E. Mell, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, F. Bosseur, Examination of WFDS in Modeling Spreading Fires in a Furniture Calorimeter, Fire Technology. 53 (2017) 1795–1832. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0657-z>



- [5] 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102836>
- [6] K.A.M. Moinuddin, D. Sutherland, Modelling of tree fires and fires transitioning from the forest floor to the canopy with a physics-based model, *Mathematics and Computers in Simulation*. 175:81-95 (2020)
- [7] K. Meerpoel-Pietri, V. Tihay-Felicelli, A. Graziani, P.A. Santoni, F. Morandini, Y. Perez-Ramirez, F. Bosseur, T. Barboni, X. Sánchez-Monroy, W. Mell, Modeling with WFDS Combustion Dynamics of Ornamental Vegetation Structures at WUI: Focus on the Burning of a Hedge at Laboratory Scale, *Combustion Science and Technology*, (2022) DOI:10.1080/00102202.2021.2019235
- [8] Sanchez-Monroy X., Mell, W.F, Torres-arenas, J., Butler, B.W. Fire spread upslope : Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal*. – 2019
- [9] Y. Perez-Ramirez, W.E. Mell, P.A. Santoni, J.B. Tramoni, F. Bosseur, Examination of WFDS in Modeling Spreading Fires in a Furniture Calorimeter, *Fire Technology*. 53 (2017) 1795–1832. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0657-z>
- [10] Martin-StPaul N, Pimont F, Dupuy JL, Rigolot E, Ruffault J, Frageon H, Cabane E, Duché Y, Savazzi R, Toutchkov M (2018) Live fuel moisture content (LFMC) time series for multiple sites and species in the French Mediterranean area since 1996. *Annals of Forest Science*, 75: 57.
- [11] Cruz MG, Hurley RJ, Bessel R, Sullivan AL (2020) Fire behavior in wheat crops – effect of fuel structure on rate of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 29: 258-271.
- [12] Cruz MG, Butler BW, Viegas DX, Palheiro P (2011) Characterization of flame radiosity in shrubland fires. *Combustion and Flame*, 158: 1970-1976.