



**HAL**  
open science

## LE COMPORTEMENT DU FEU

Eric Rigolot, François Pimont

► **To cite this version:**

Eric Rigolot, François Pimont. LE COMPORTEMENT DU FEU. Séminaire de restitution du projet REDURISK - De la recommandation scientifique à l'appropriation par les citoyens: la réduction du risque lié aux incendies de forêt sur un territoire sensible, Institut Méditerranéen en Sciences de l'Information et de la Communication (IMSIC), Jun 2023, Aix-en-Provence, France. hal-04152581

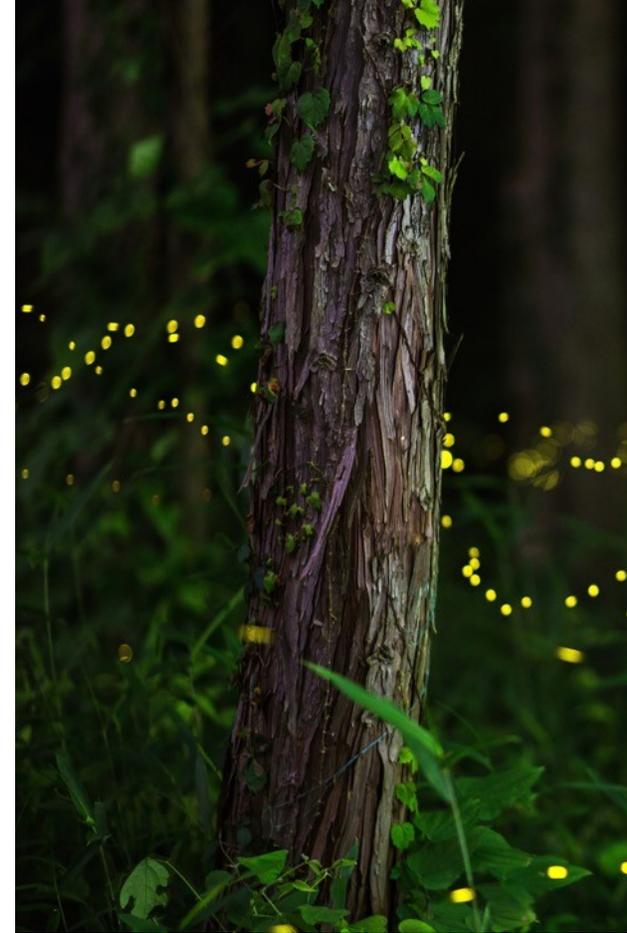
**HAL Id: hal-04152581**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04152581v1>**

Submitted on 5 Jul 2023

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

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



Séminaire  
REDURISK

*Eric RIGOLOT et François PIMONT (INRAE, URFM, Avignon)*

20 juin 2023

# LE COMPORTEMENT DU FEU

A l'interface habitat-forêt



# PLAN DE L'EXPOSÉ

1. Mécanismes de propagation
2. Caractéristiques du comportement du feu
3. Facteurs du comportement du feu
4. Modélisation physique  
et application à l'interface habitat-forêt

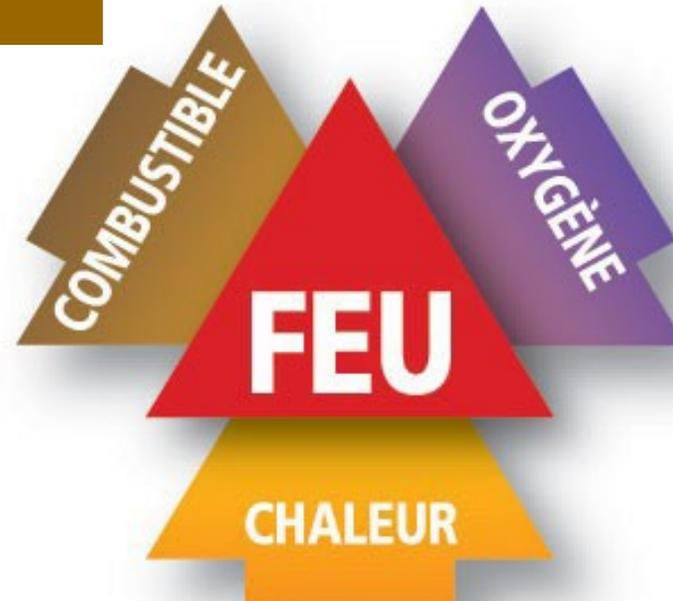
# 1. MÉCANISMES DE LA PROPAGATION

## QU'EST-CE QU'UN INCENDIE ?

**Combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace**

**Combustible**  
Gaz, Essence  
Bois

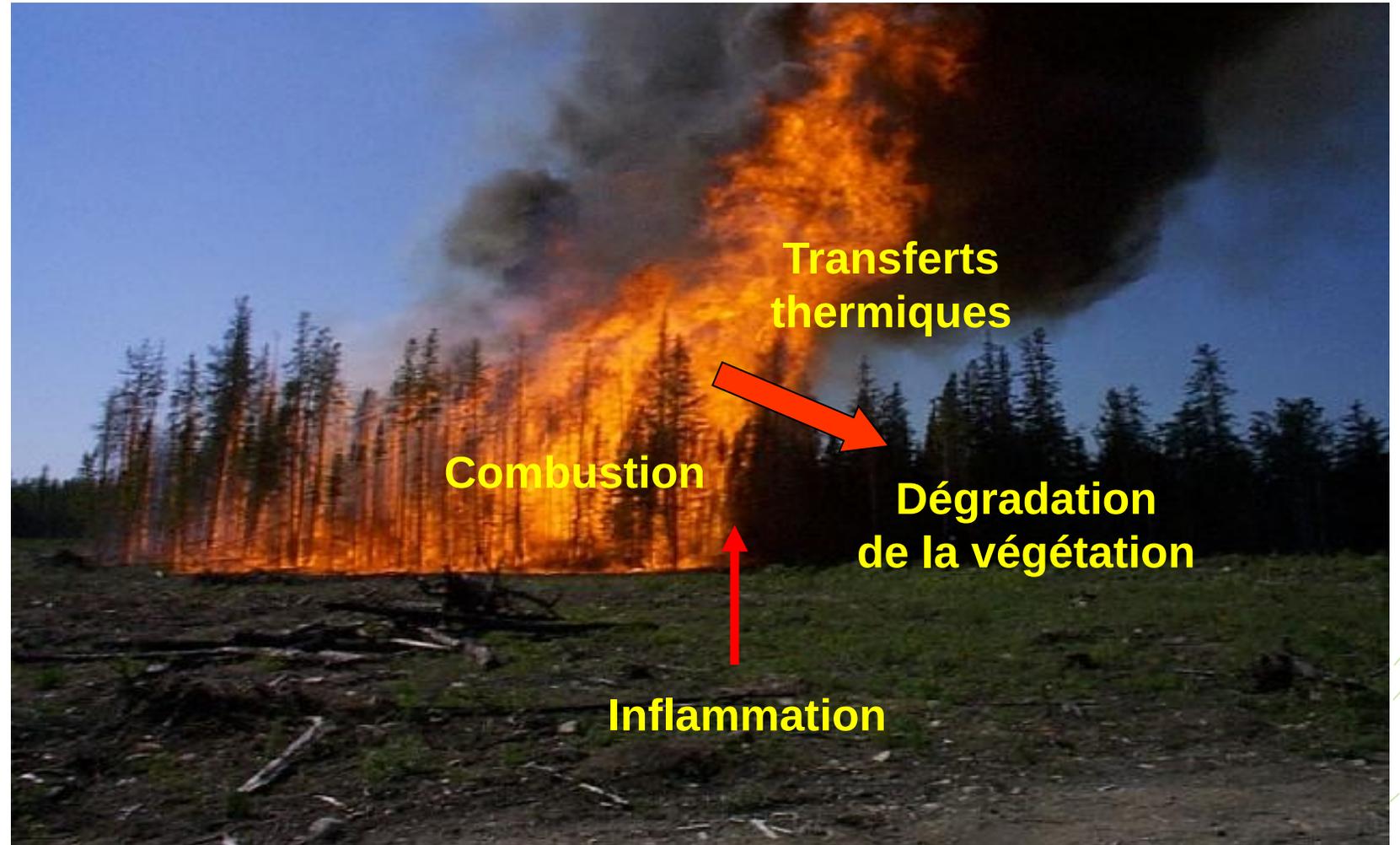
**Comburant**  
(O<sub>2</sub>)  
air : 21%



**Énergie d'activation**  
(flamme, étincelle, foudre, chaleur)

# 1. MÉCANISMES DE PROPAGATION DU FEU

## PRINCIPAUX MÉCANISMES



**+ Transport de brandons**



# 1. MÉCANISMES DE PROPAGATION DU FEU

## DÉGRADATION THERMIQUE DE LA VÉGÉTATION

Soumis à un flux de chaleur, **le matériau se dégrade en fonction de la température atteinte** :

- jusqu'à 100°C : évaporation de l'eau
- de 100 à 200°C : production de gaz non inflammables
- de 200 à 280°C : évaporation des substances les plus volatiles
- de 280 à 500°C : production de gaz inflammables (pyrolyse)

**Les résidus solides** sont des charbons (20 à 30% de la masse initiale)

Pour atteindre l'**inflammation**, il faut un apport de chaleur de **400 kJ/kg** pour du matériau sec.



# 1. MÉCANISMES DE PROPAGATION DU FEU

## COMBUSTION

**Dans le milieu gazeux :**

**Gaz inflammables + Oxygène  $\rightarrow$  Produits (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) + Énergie**

**A la surface du charbon :**

**Charbon (Carbone) + Oxygène  $\rightarrow$  Produits (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) + Énergie**

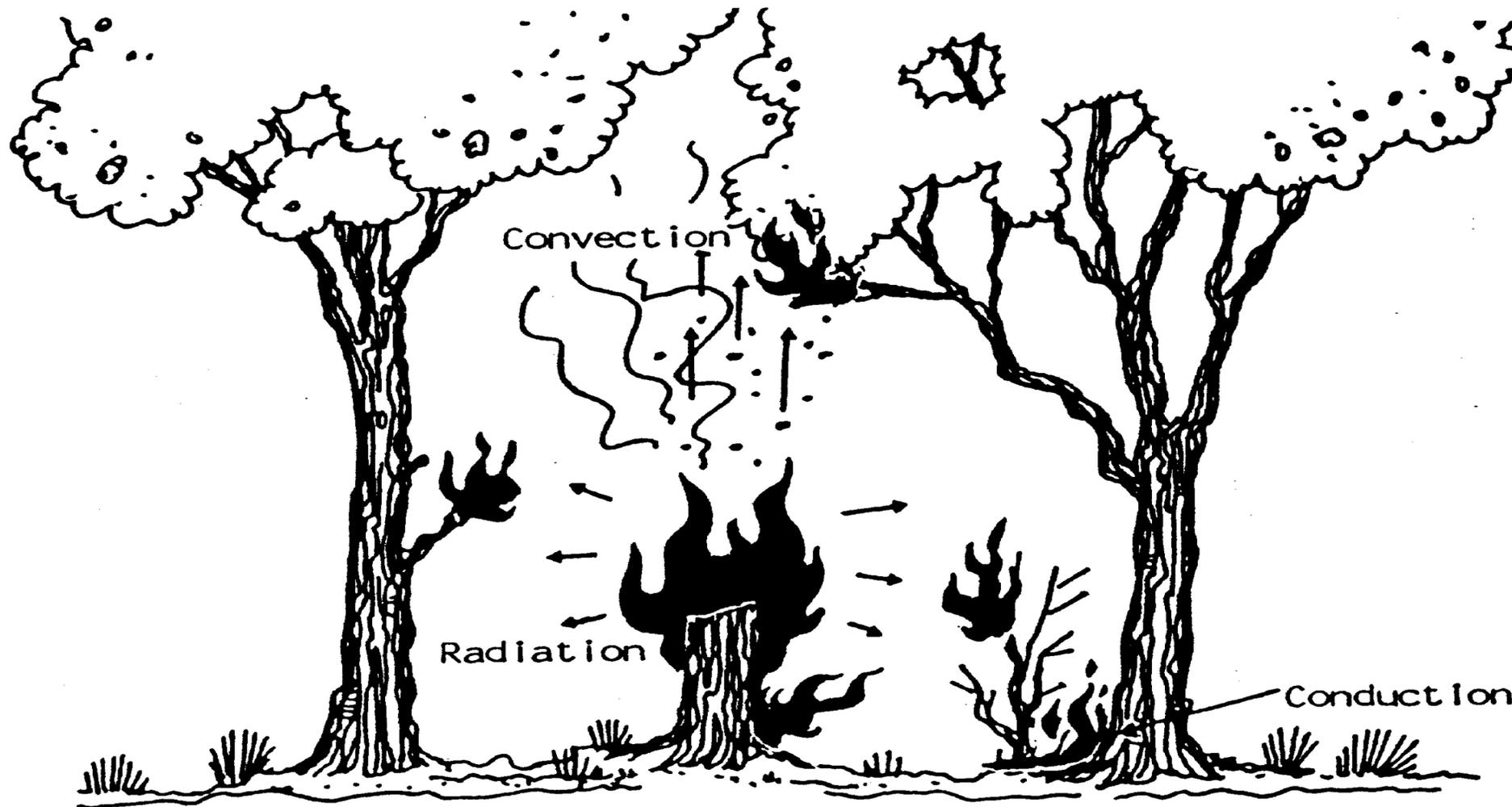
**Énergie libérée par la combustion complète :**

**20 000 kJ/kg de matière sèche, soit 50 fois la chaleur d'inflammation.**



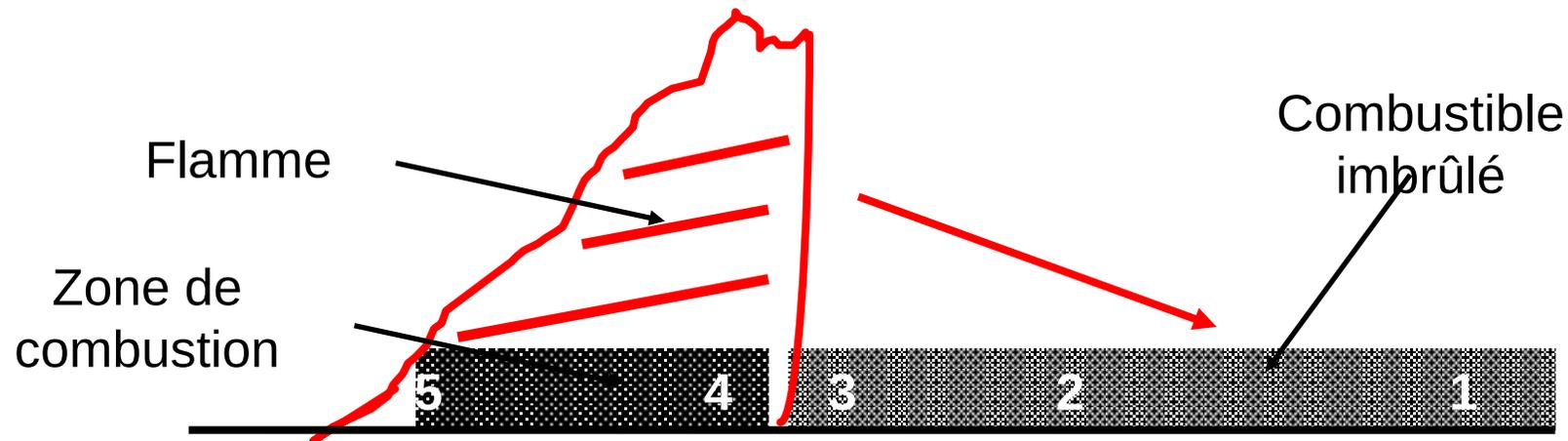
# 1. MÉCANISMES DE PROPAGATION DU FEU

## TRANSFERTS THERMIQUES



# 1. MÉCANISMES DE PROPAGATION DU FEU

## RÉSUMÉ



### Echauffement et dégradation thermique

- 1- Échauffement par rayonnement
- 2- Échauffement brutal par convection (contact avec les gaz chauds)
- 3- Évaporation de l'eau
- 4- Pyrolyse - Combustion en phase gazeuse
- 5- Combustion des résidus charbonneux (braises)

## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

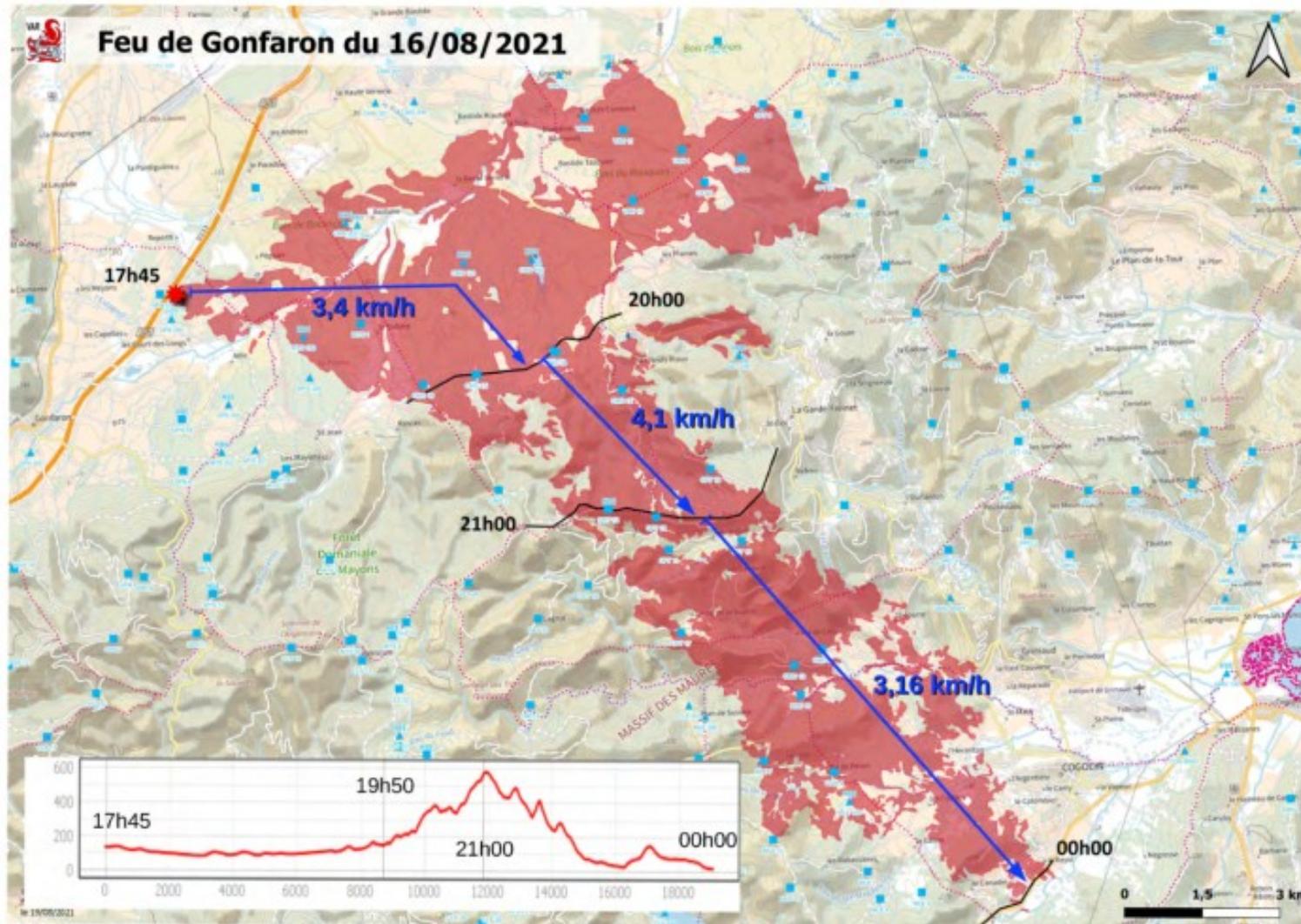


**Le comportement du feu représente l'évolution spatiale et temporelle du feu**

- **Variables du comportement**
- **Facteurs du comportement**

## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

### LA VITESSE DE PROPAGATION

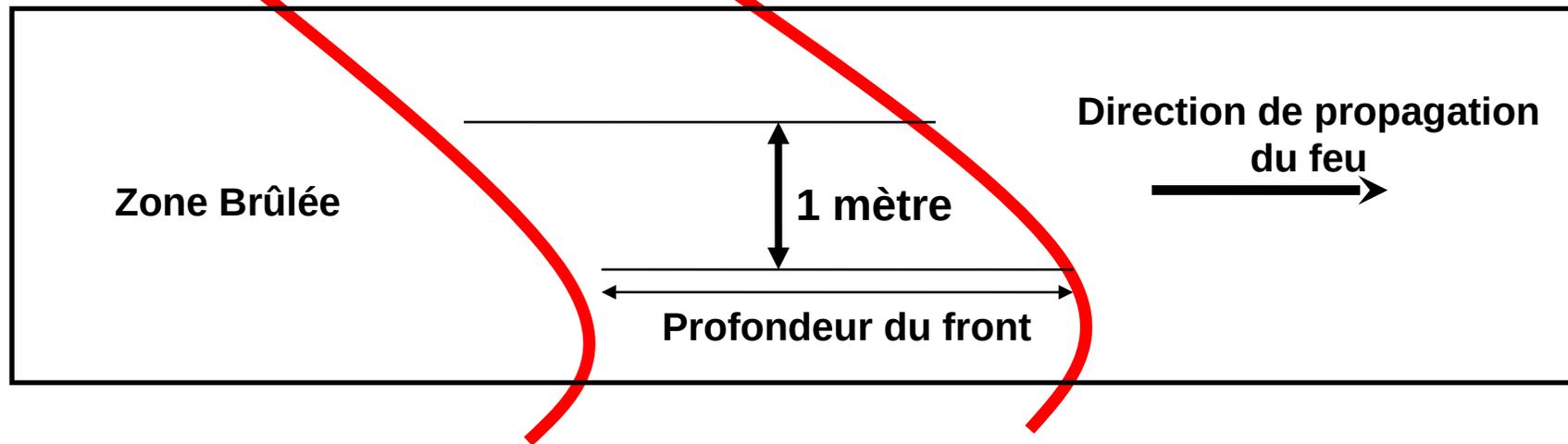


## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

**L'INTENSITÉ DU FRONT DE FLAMME (kW/m)  
= PUISSANCE DU FEU**

**Définition :**

**Flux de chaleur dégagé par mètre linéaire de front de flamme (kW/m)**



**Relation de Byram :**  $P = M V C$  avec :

**P** puissance (kW/m)

**M** masse brûlée par unité de surface  
(kg/m<sup>2</sup>) (donc charge disponible)

**V** Vitesse de propagation (m/s)

**C** Pouvoir Calorifique (18000 kJ/kg)

## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

### ÉCHELLE D'INTENSITÉ ET DIFFICULTÉ DE LUTTE

En kW/m

**0-350** (feu de litière) lutte facile

**350-1750** (feu d'herbes, feu de garrigue) lutte possible avec moyens légers au sol

**1750- 3500** (feu de garrigue cond. sévères) lutte possible avec moyens lourds au sol

**3500-7000** (feu de maquis) Lutte possible avec moyens lourds au sol et moyens aériens, sautes possibles

**7000-20 000** (feu de maquis cond. sévères, feu de cimes) Feu non maîtrisable (de front), sautes fréquentes

**> 20 000 kW/m** (feu de cimes) Feu d'intensité exceptionnelle, non maîtrisable, sautes très nombreuses



## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

### INTENSITÉ DU FEU : ORDRE DE GRANDEUR

Un feu de puissance = **10 000 kW/m**, sur **100 m de front** => puissance totale de **1000 MW**, soit:

- la puissance électrique d'une centrale nucléaire,
- la puissance nécessaire pour évaporer 24 tonnes d'eau en une minute...



## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

### TYPES DE FEU

#### Feu d'humus

**Feu de surface**  
brûle la litière,  
les herbes,  
les arbustes



**Feu de cimes**  
brûle toutes les strates  
de la végétation



## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

### SÉVÉRITÉ DU FEU

**L'intensité (puissance) caractérise le comportement du feu.**

**La sévérité est l'ensemble des effets sur l'écosystème (écologie du feu)**

**L'intensité n'est pas forcément un bon indicateur du niveau de sévérité  
(ex. feux d'humus)**

**Pas de mesure standard de la sévérité**



## 2. CARACTÉRISTIQUES DU COMPORTEMENT DU FEU

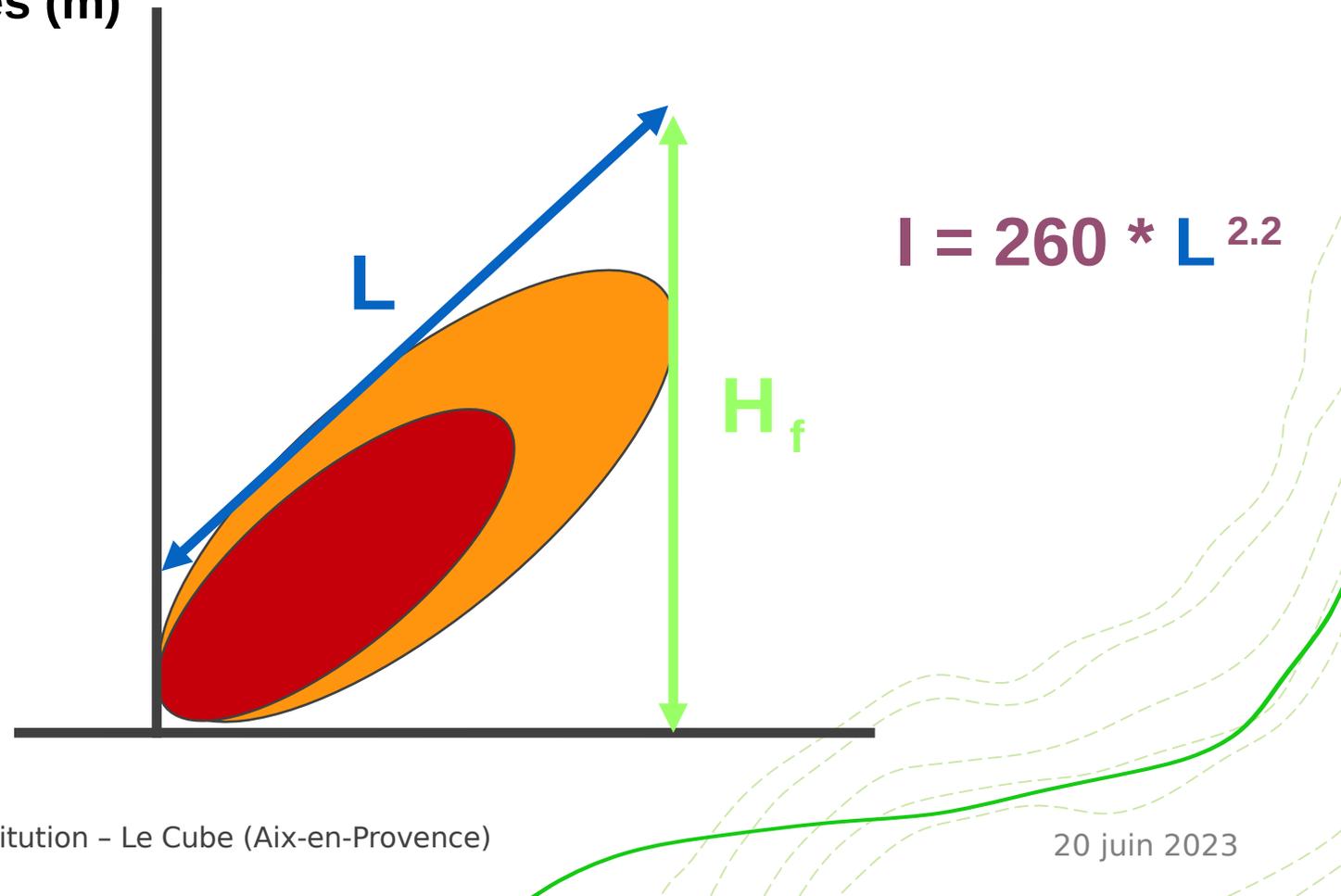
### AUTRES VARIABLES

La quantité de combustible consommée (g, kg, ou tonne)

La hauteur / longueur des flammes (m)

La surface brûlée (ha)

La température (C ou K)



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## 1. Topographie

- Exposition
- Pente

## 2. Climat / Météorologie

- Vent
- Température,
- Humidité relative,
- Précipitations

## 3. Végétation (combustible)

- Quantité (charge)
- Qualité (composition et état de dessiccation)
- Arrangement spatial

affectent la dessiccation du combustible (sol et végétation)

**=> La végétation est le seul facteur sur lequel on puisse agir**

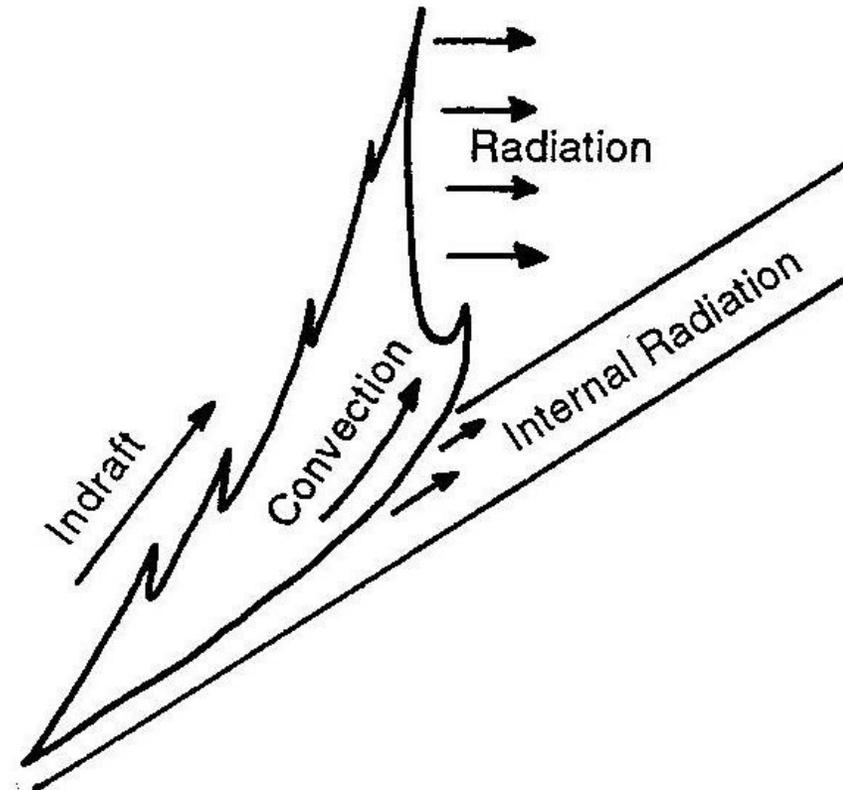


# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## TOPOGRAPHIE

Favorise la propagation vers le haut de pente

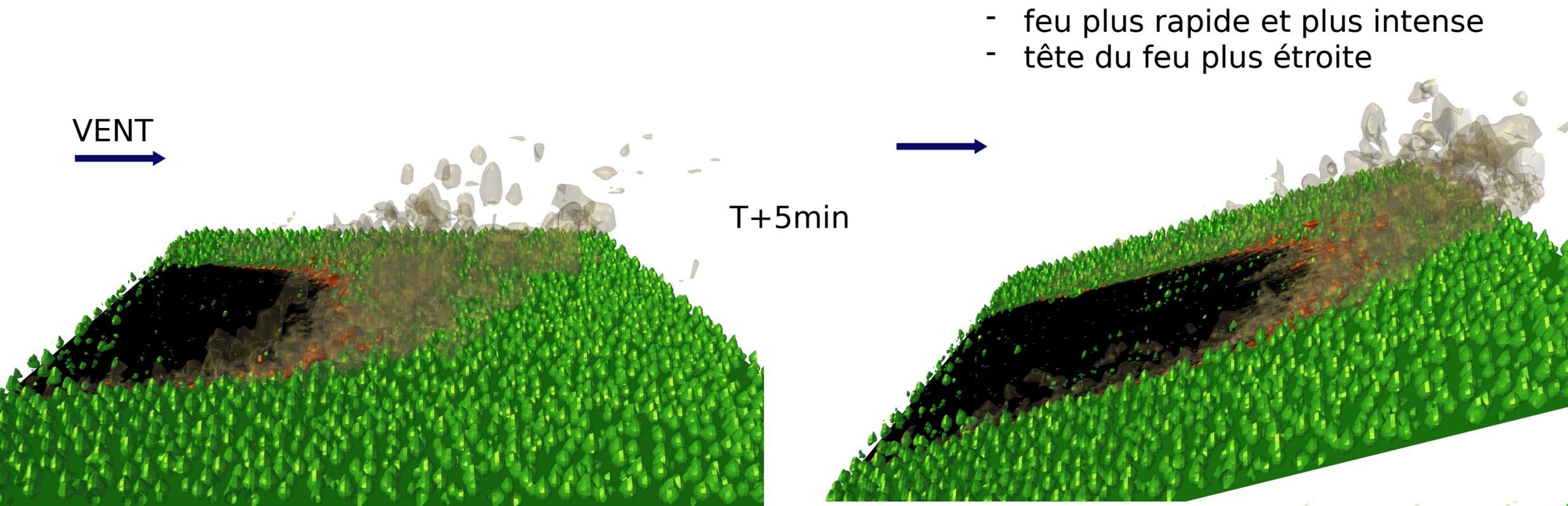
Upslope Fire



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## EFFET DE PENTE

Simulations FIRETEC (INRAE, LANL)



Propagation à plat

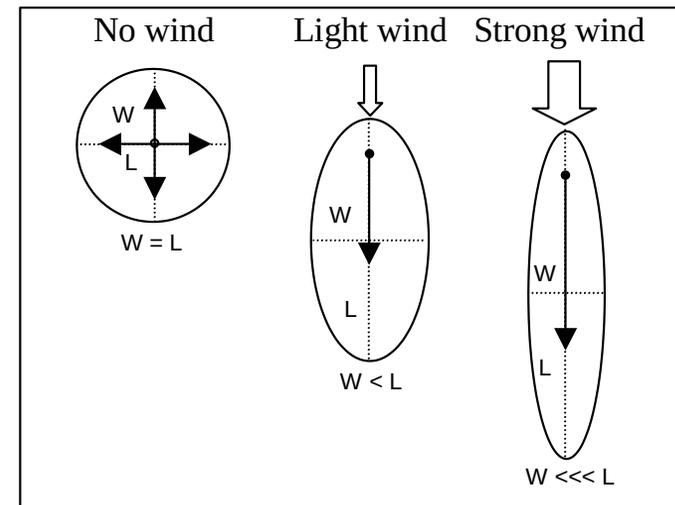
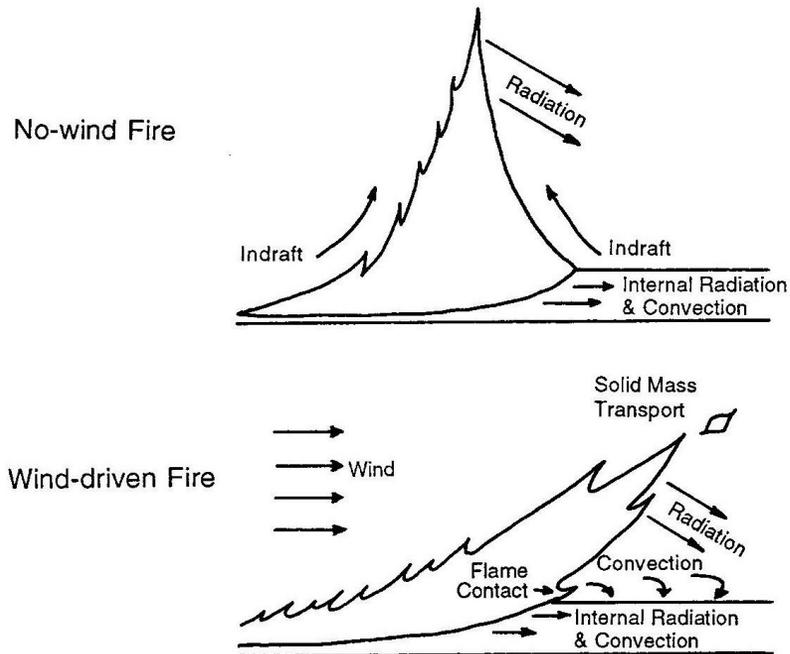
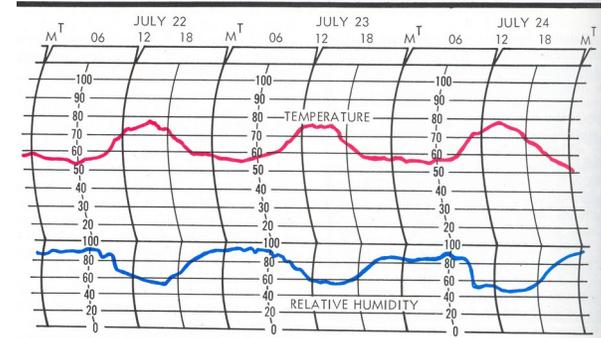
Pente de 30 %



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## LA MÉTÉOROLOGIE

- La température (°C)
- L'humidité relative (%)
- Le vent (m/s ou km/h)
- Les orages accompagnés de foudre
- La stabilité atmosphérique

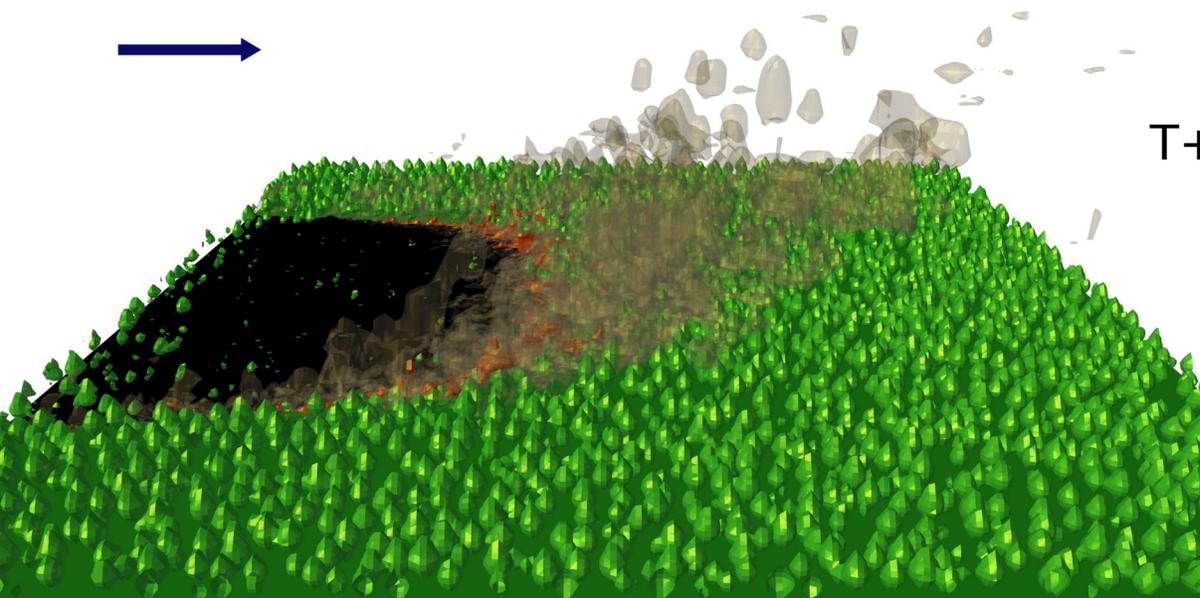


# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

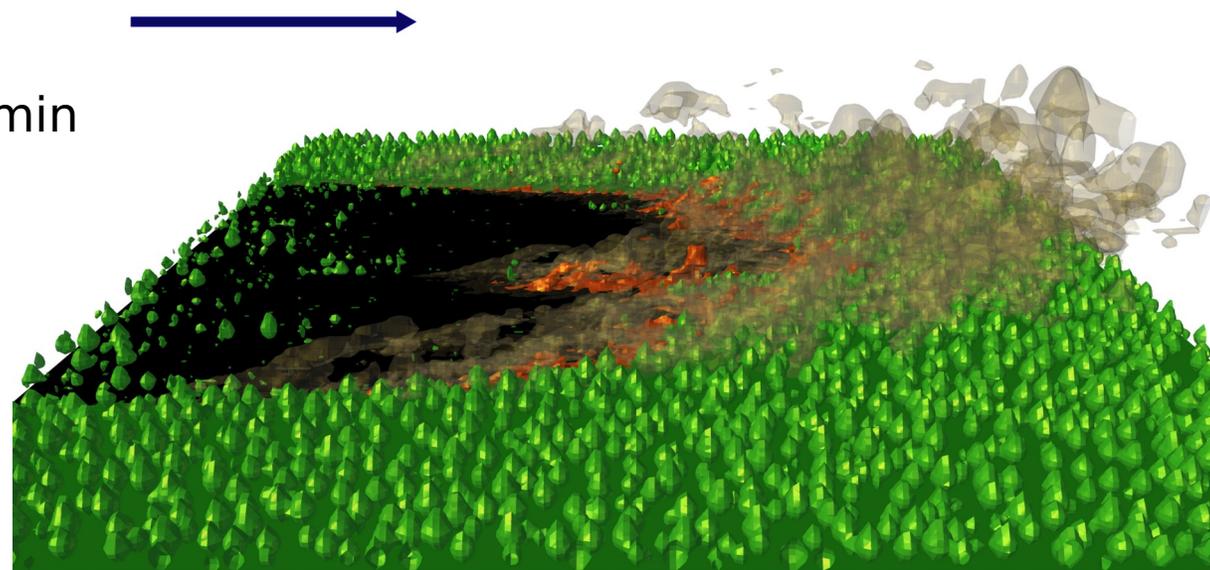
## EFFET DU VENT

Simulations FIRETEC (INRAE, LANL)

- feu plus rapide et plus intense
- flammes plus longues et panache plus couché



T+5min



Vent de 25 km/h

Vent de 50 km/h



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## LE COMBUSTIBLE FORESTIER

### 1- Quantité et répartition spatiale

**Charge (kg/m<sup>2</sup>)**

Notion de compacité (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

**Arrangement spatial**

### 2- Propriétés des particules (aiguilles, feuilles,...)

Composition chimique

Chaleur spécifique

Pouvoir calorifique

**Teneur en eau**

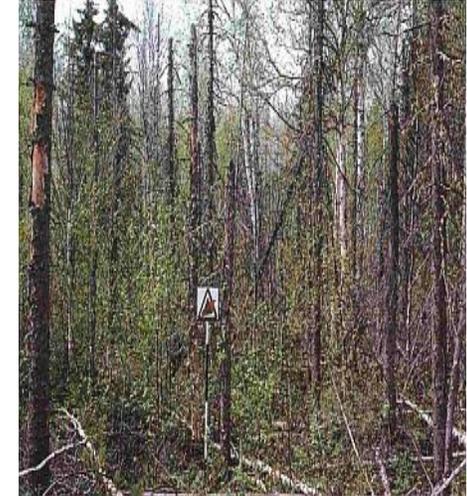
**Rapport Surface/Volume**



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## ARRANGEMENT SPATIAL DES COMBUSTIBLES

La connectivité horizontale  
Le continuum vertical



# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

## TENEUR EN EAU DU COMBUSTIBLE

**Définition**  $TE = 100 \times \text{Masse d'eau} / \text{Masse de matière sèche}$

### Ordres de grandeur

- litières : 5 à 20%
- arbustes (feuillages) : 50 à 100%
- arbres (feuillages) : 100 à 200%

**Effet** (il faut 2500 kJ pour **évaporer** 1 kg d'eau)

TE (%)	Qi (J / g) (chaleur d'inflammation)
0	400
10	680
50	1800
100	3200
200	6000

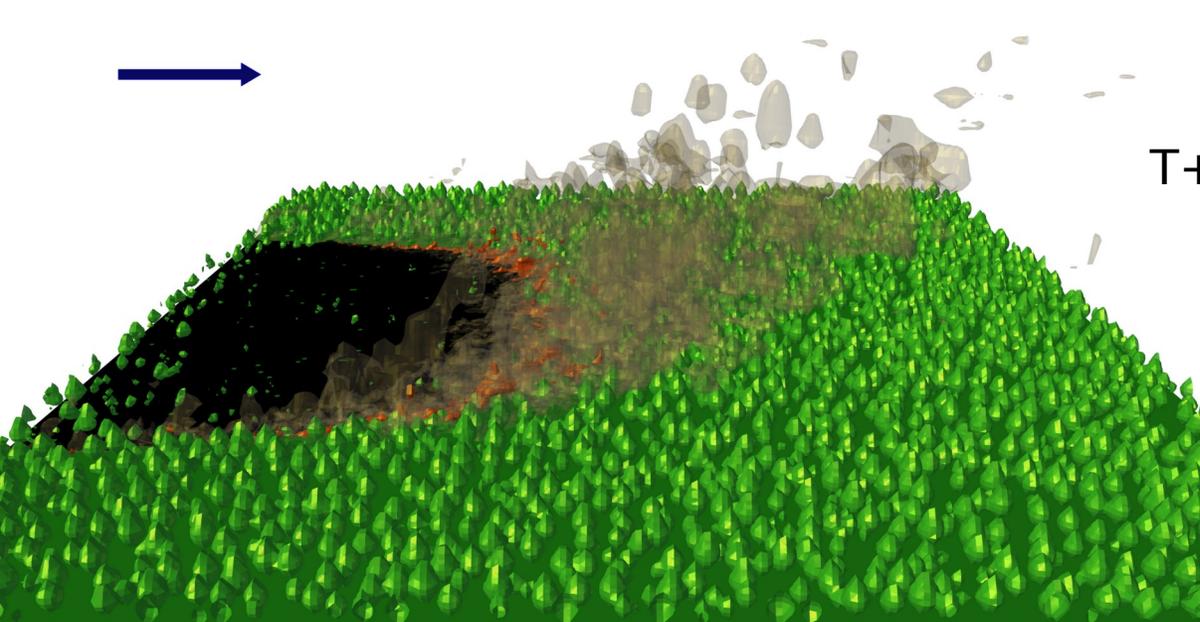


# 3. FACTEURS DU COMPORTEMENT DU FEU

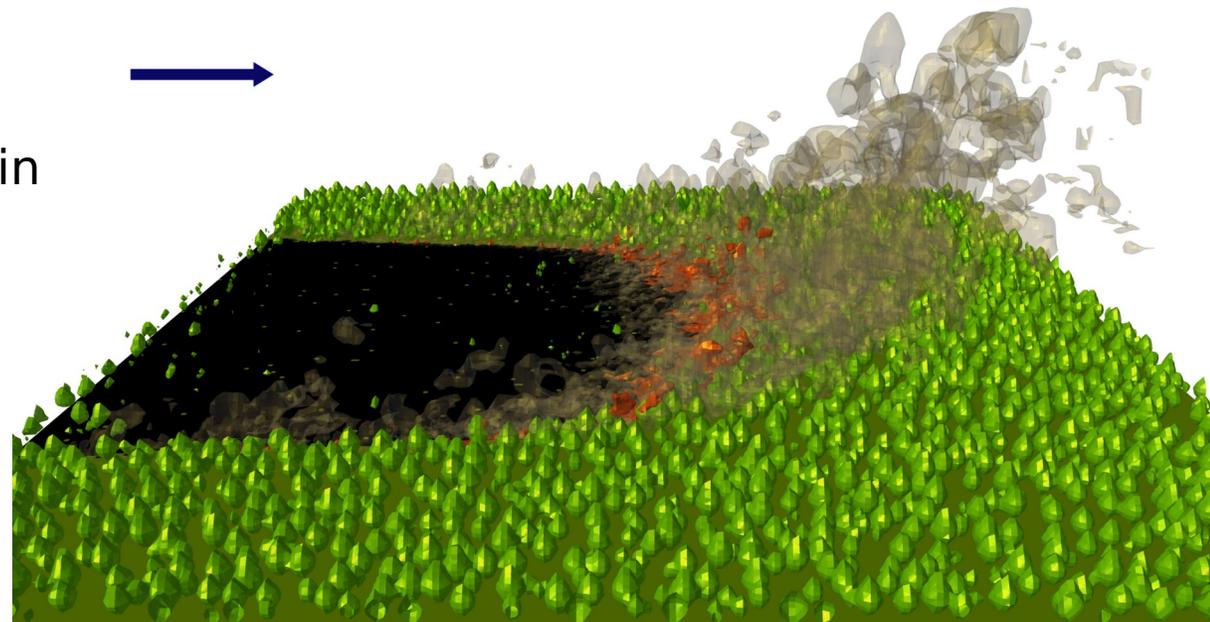
## TENEUR EN EAU DU COMBUSTIBLE

Simulations FIRETEC (INRAE, LANL)

- feu plus rapide et plus intense
- flammes plus hautes et panache plus puissant



T+5min



Début d'été : Pin d'Alep 100 %, Sous-bois 70 %

Fin d'été : Pin d'Alep 90 %, Sous-bois 56 %

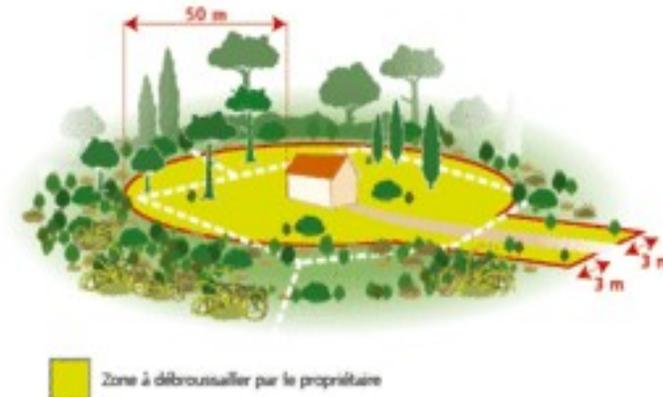


# 3. APPLICATION A L'INTERFACE HABITAT FORÊT (OLD)

## EFFET DES TRAITEMENT DE LA VÉGÉTATION



Un contrôle du combustible diminuant l'intensité du feu



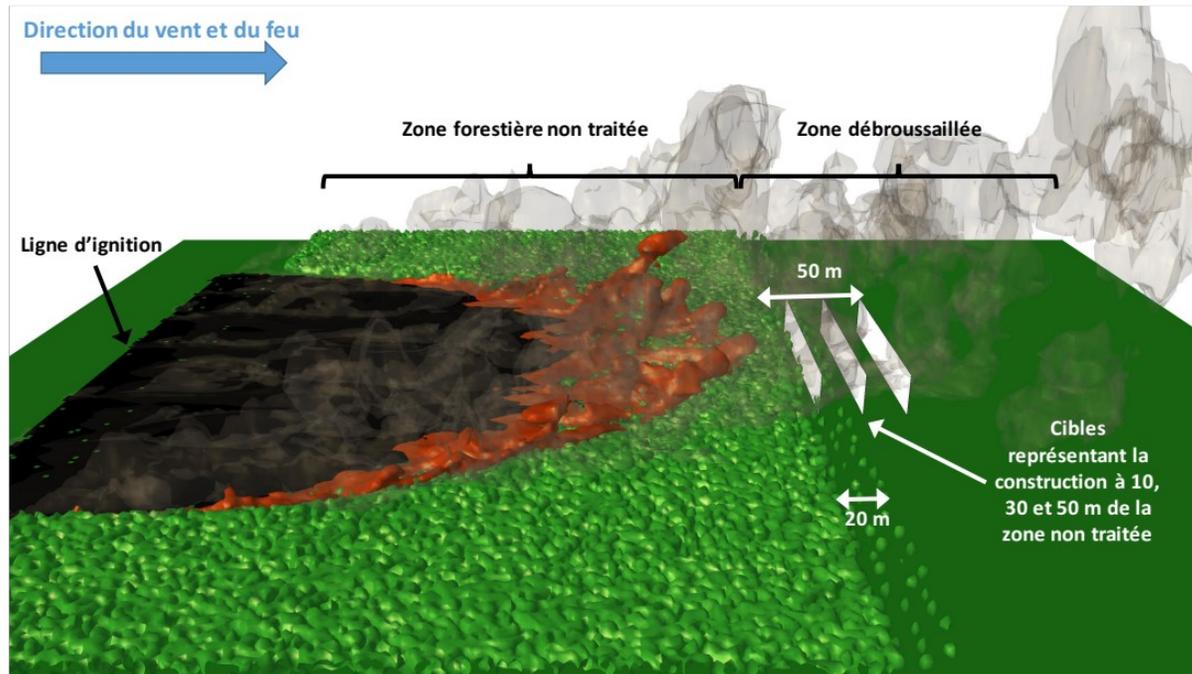
Pour des enjeux moins vulnérables



### 3. APPLICATION A L'INTERFACE HABITAT FORÊT (OLD)

#### EFFET DES TRAITEMENT DE LA VÉGÉTATION

Exemple : Les obligations légales de débroussaillage permettent-elle la sécurité des constructions et des personnels de secours ?



**Flux radiatifs et températures moyennes pendant 1 min**

	Terrain plat		Pente 30 %	
	Flux radiatif (kW/m <sup>2</sup> )	Température (°C)	Flux radiatif (kW/m <sup>2</sup> )	Température (°C)
10 m	22-28	329-422	30-39	280-336
30 m	8.3-9.2	110-143	12-13.2	105-120
50 m	5.4-5.9	59-70	8-9.1	68-78



Pimont et al. 2014. *Advances in Forest Fire Research* (Ed DX Viegas)

Pimont et al. 2019. *Forêt Méditerranéenne XV-2*.



**INRAE**

**Aix\*Marseille**  
université  
*Socialement engagée*

**imsic** UTLN - AMU  
INSTITUT MEDITERRANÉEN DES SCIENCES  
DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

**forêt méditerranéenne**

**MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION**



Projet REDURISK – Séminaire de restitution – Le Cube (Aix-en-Provence)

**anr**®