

# Vulnéfeu

Exposition et vulnérabilité des peuplements forestiers au feu  
dans le contexte du changement climatique

*Webinaire Forêt et changements climatiques DRAAF AuRA  
12/05/2025*

*Camille Revertegat, Sylvain Dupire (INRAE)*





# Projet Vuln feu

---

*Exposition et vulnérabilité des peuplements forestiers au feu dans le contexte du changement climatique*

- Financement : RMT AFORCE (40 k ) + autofinancement (83 k )
- Durée : septembre 2023 – février 2025
- Coordination : INRAE URFM
- Partenariat : INRAE, ONF, DSF

*Camille Revertegat, Eric Rigolot, Jean-Luc Dupuy, Julien Ruffault, François Pimont (INRAE URFM)*

*Tom Rizzati, Sylvain Dupire (INRAE LESSEM)*

*Philippe Deuffic (INRAE ETTIS)*

*Marion Toutchkov (ONF DFCI)*

*Brigitte Mush, Alexandre Piboule (ONF RDI)*

*Bernard Boutte (DSF)*

**INRAE**





# Contexte et objectifs du projet

---

- Contexte :

- les grands feux de l'été 2022
- une forte demande en matière de connaissances

- Objectifs :

- (1) Synthétiser les connaissances sur :

- l'évolution de l'exposition des massifs forestiers aux feux de forêt
- la vulnérabilité au feu des essences et des peuplements

- (2) Identifier les perspectives d'améliorations et d'intégration des informations



# Thèmes abordés par le [rapport](#)

## Compréhension des feux de forêts / exposition

18p

Écologie et évolution des incendies  
Mécanismes, comportement, métriques

## Les peuplements forestiers face aux feux

22p

Mécanismes de mortalité, caractéristiques des arbres associés à la vulnérabilité

## Sylviculture et gestion préventive

10p

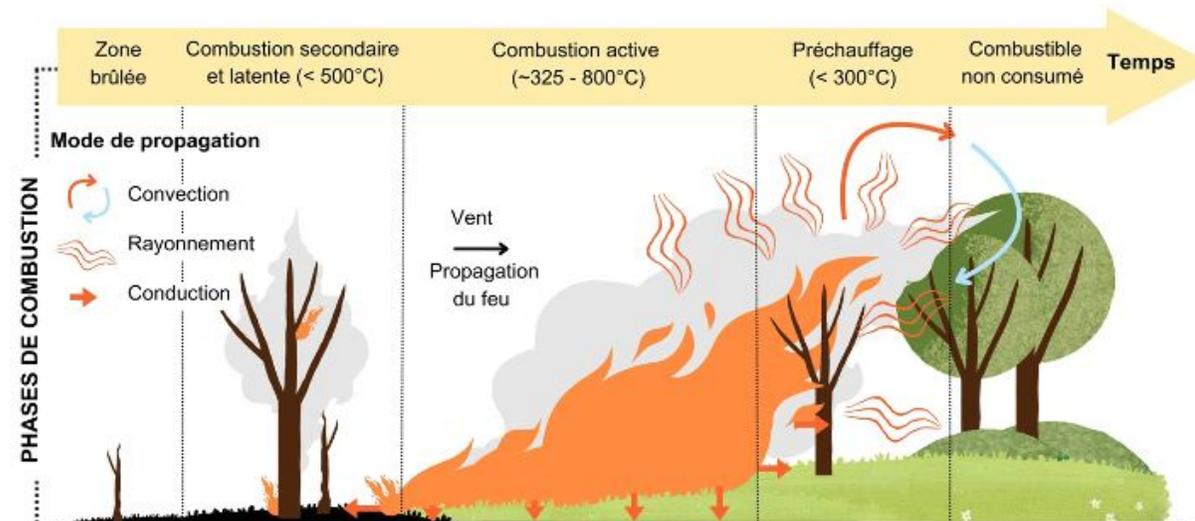
Distribution spatiale, types de traitements, importance et perspectives

## Fiches essences

66p

28 essences actuelles et en devenir

**Le rapport est richement illustré par des figures originales et pédagogiques**





# Thèmes abordés par le rapport

---

**Compréhension des feux de forêts / exposition**  
18p

Écologie et évolution des incendies  
Mécanismes, comportement, métriques

**Les peuplements forestiers face aux feux**  
22p

Mécanismes de mortalité, caractéristiques des arbres associés à la vulnérabilité

**Sylviculture et gestion préventive**  
10p

Distribution spatiale, types de traitements, importance et perspectives

**Fiches essences**  
66p

28 essences actuelles et en devenir

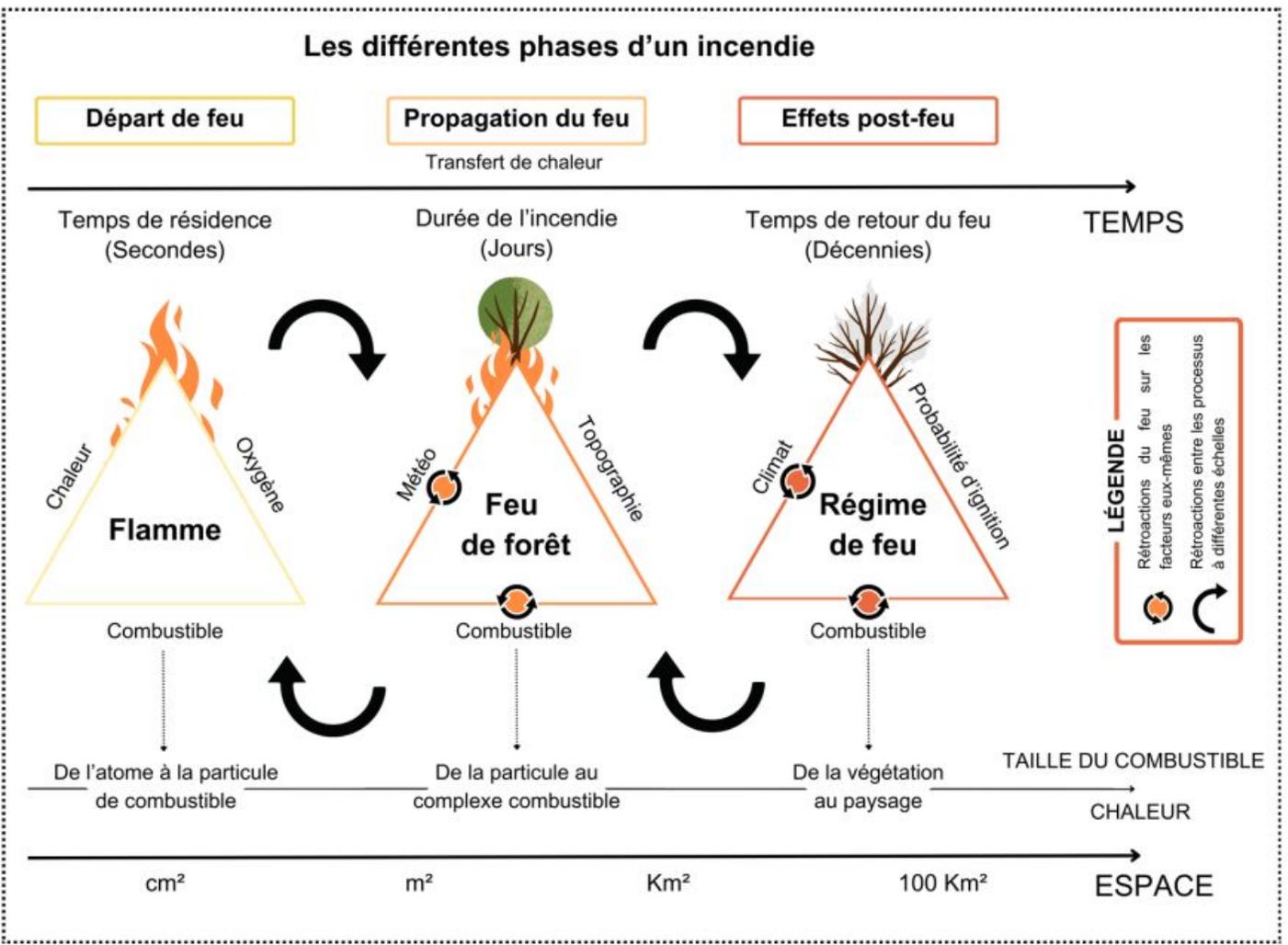
1<sup>ere</sup> présentation

2<sup>e</sup> présentation



# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

Extension du concept de "**triangle du feu**" à différentes échelles

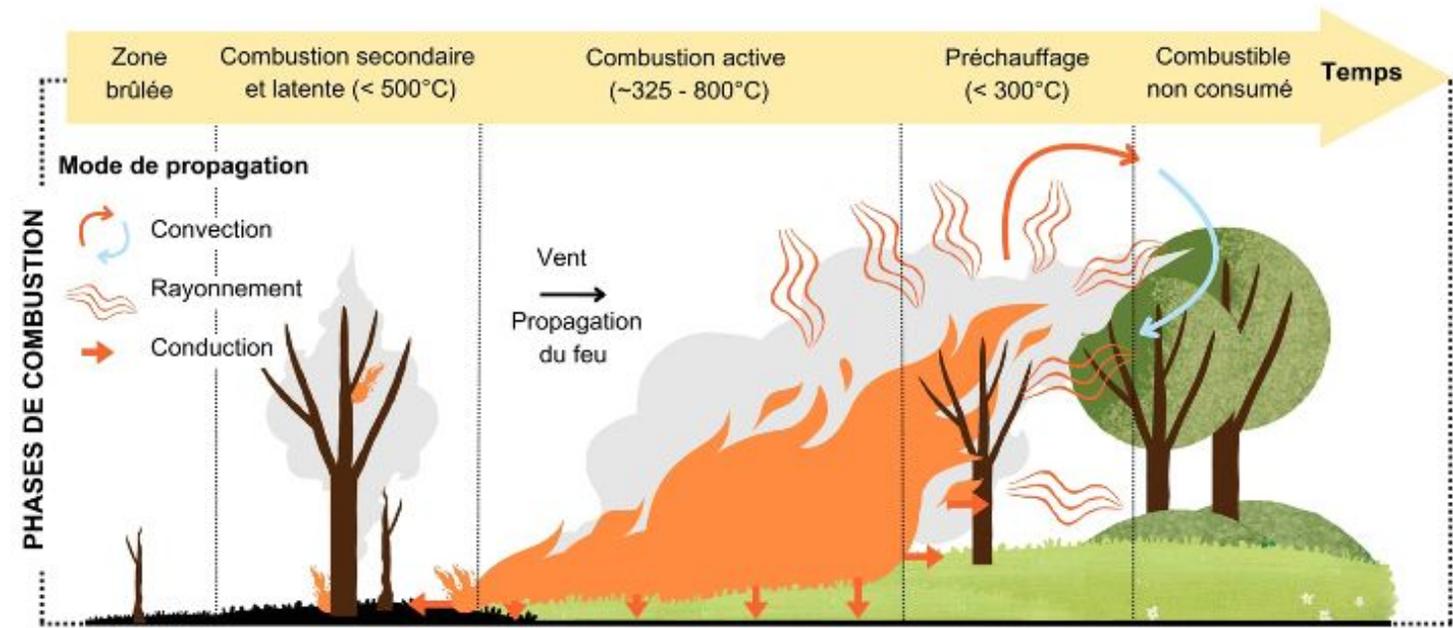


**Ignition** = départ d'un incendie source à +90% d'origine humaine en France



# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

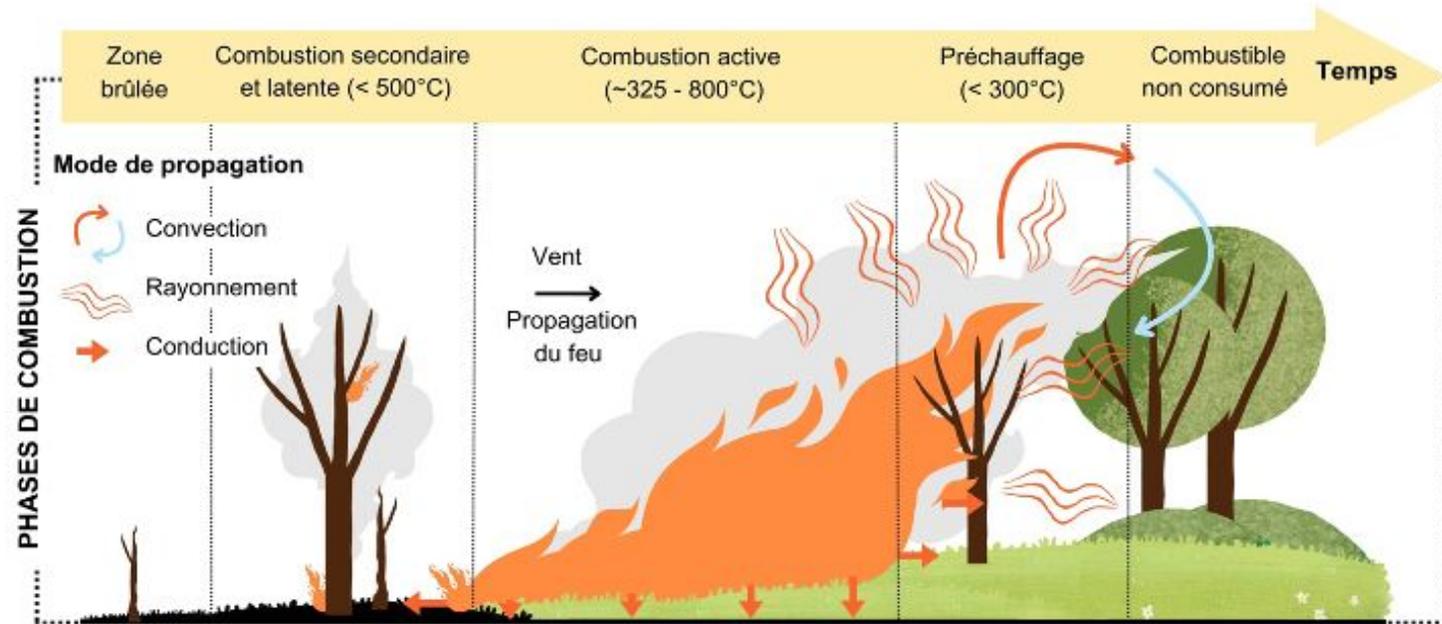
Différentes phases de propagation



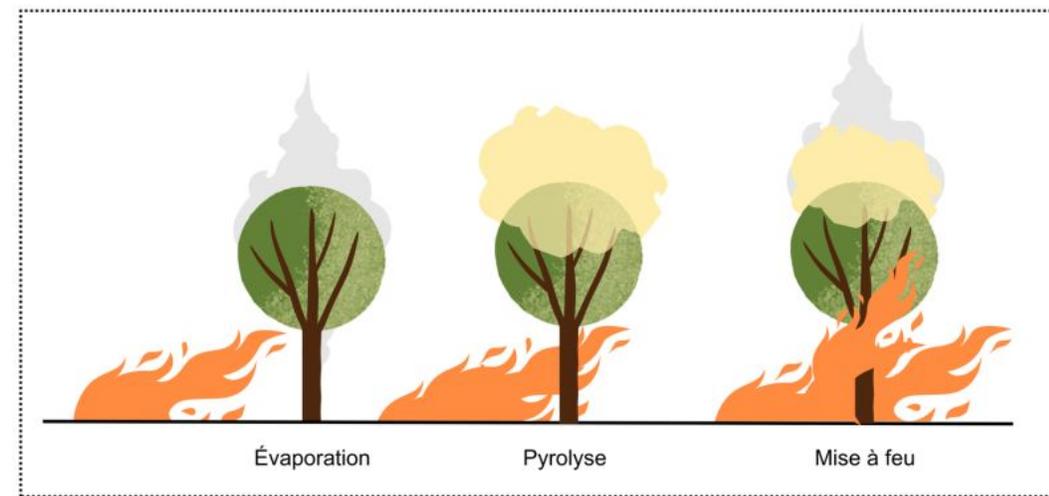


# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

Différentes phases de propagation



Au niveau de l'arbre :  
plusieurs processus chimiques s'enchaînent





# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

---

Quels éléments pour le caractériser ?

- L'intensité du feu (Formule de Byram)

$$P_f = PC \times M \times V$$

*Puissance du front de flamme (kW.m<sup>-1</sup>)*

*Pouvoir calorifique du combustible (kJ.kg<sup>-1</sup>)*

*Quantité de combustible (kg.m<sup>-2</sup>)*

*Vitesse de propagation (m.s<sup>-1</sup>)*



# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

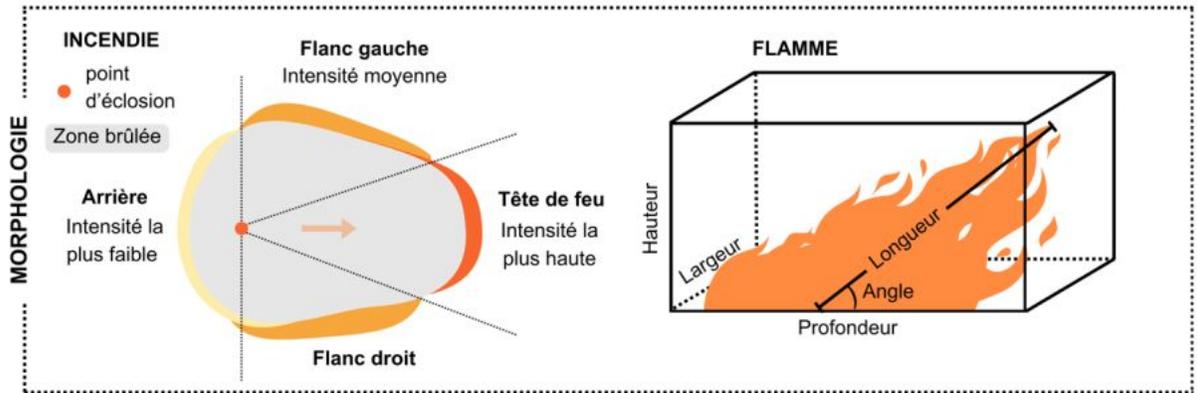
Quels éléments pour le caractériser ?

- L'intensité du feu (Formule de Byram)

$$P_f = PC \times M \times V$$

*Puissance du front de flamme (kW.m<sup>-1</sup>)*      *Pouvoir calorifique du combustible (kJ.kg<sup>-1</sup>)*      *Quantité de combustible (kg.m<sup>-2</sup>)*      *Vitesse de propagation (m.s<sup>-1</sup>)*

- Dimension des flammes





# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

Quels éléments pour le caractériser ?

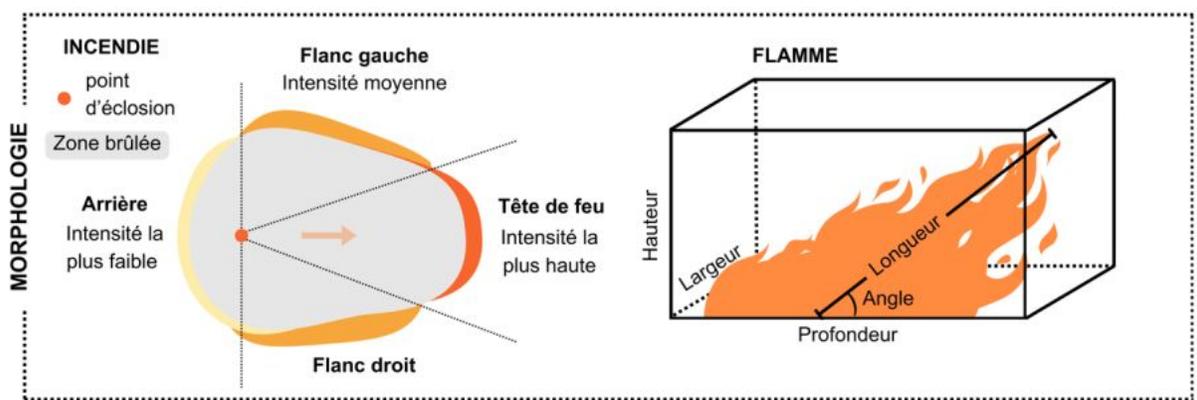
- L'intensité du feu (Formule de Byram)

$$P_f = PC \times M \times V$$

*Puissance du front de flamme (kW.m<sup>-1</sup>)*      *Pouvoir calorifique du combustible (kJ.kg<sup>-1</sup>)*      *Quantité de combustible (kg.m<sup>-2</sup>)*      *Vitesse de propagation (m.s<sup>-1</sup>)*

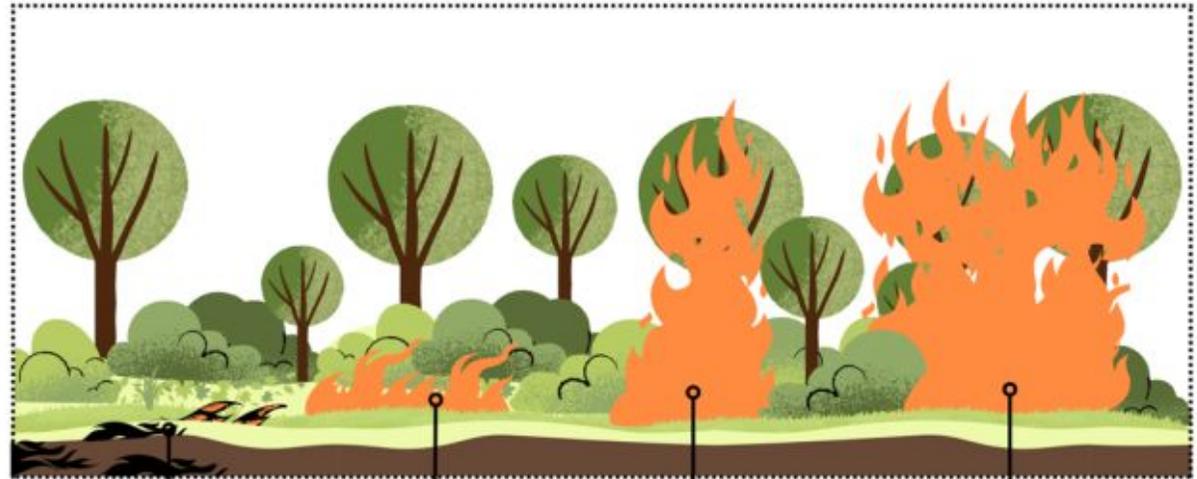
- Dimension des flammes

- Temps de résidence des flammes  
→ Grosse influence sur la mortalité



# Qu'est ce qu'un feu de forêt ?

## Les différents types d'incendie



### FEU D'HUMUS

Le feu se propage dans le sol, sans flamme, implique la combustion de l'humus et de la matière organique. Le feu peut éventuellement refaire surface plus loin ou après un temps parfois très long.

### FEU DE CIME PASSIF

Les houppiers brûlent individuellement, la chaleur de convection n'étant pas suffisante pour maintenir la propagation entre les houppiers.

### FEU DE SURFACE

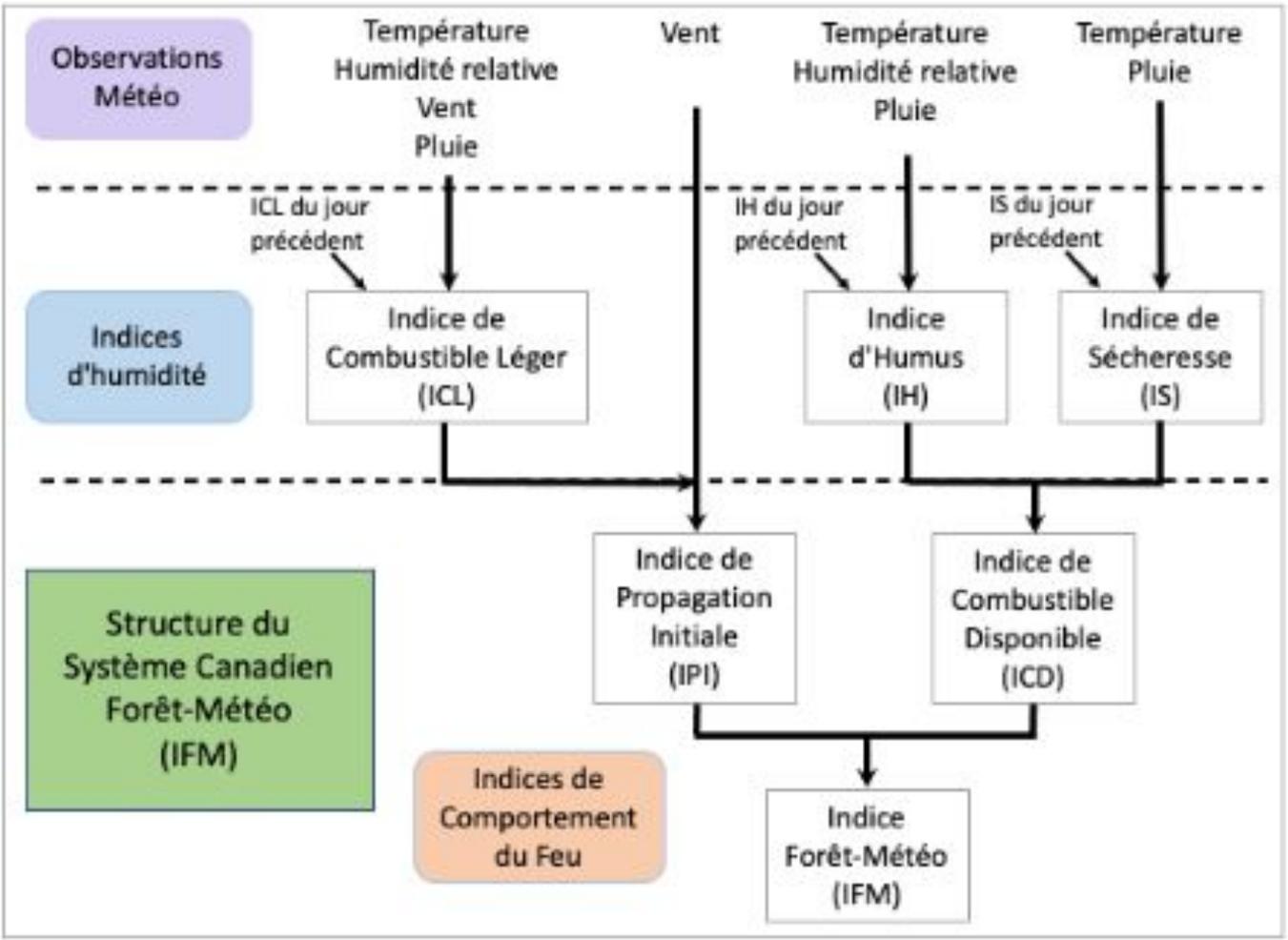
Le feu se propage au sol, le front de flammes se développant dans les strates basses (litières, herbes, arbustes). Ces feux sont généralement peu puissants sous une canopée d'arbres à l'abri du vent, mais ils peuvent néanmoins être puissants dans certaines garrigues présentant une charge en combustible élevée.

### FEU DE CIME ACTIF

Le feu se propage par convection de houppier en houppier en parallèle du feu de surface, nécessitant la chaleur issue du combustible de surface pour maintenir la propagation entre les houppiers. Ce sont les feux les plus intenses et très sévères.



# Les facteurs influençant les feux de forêts



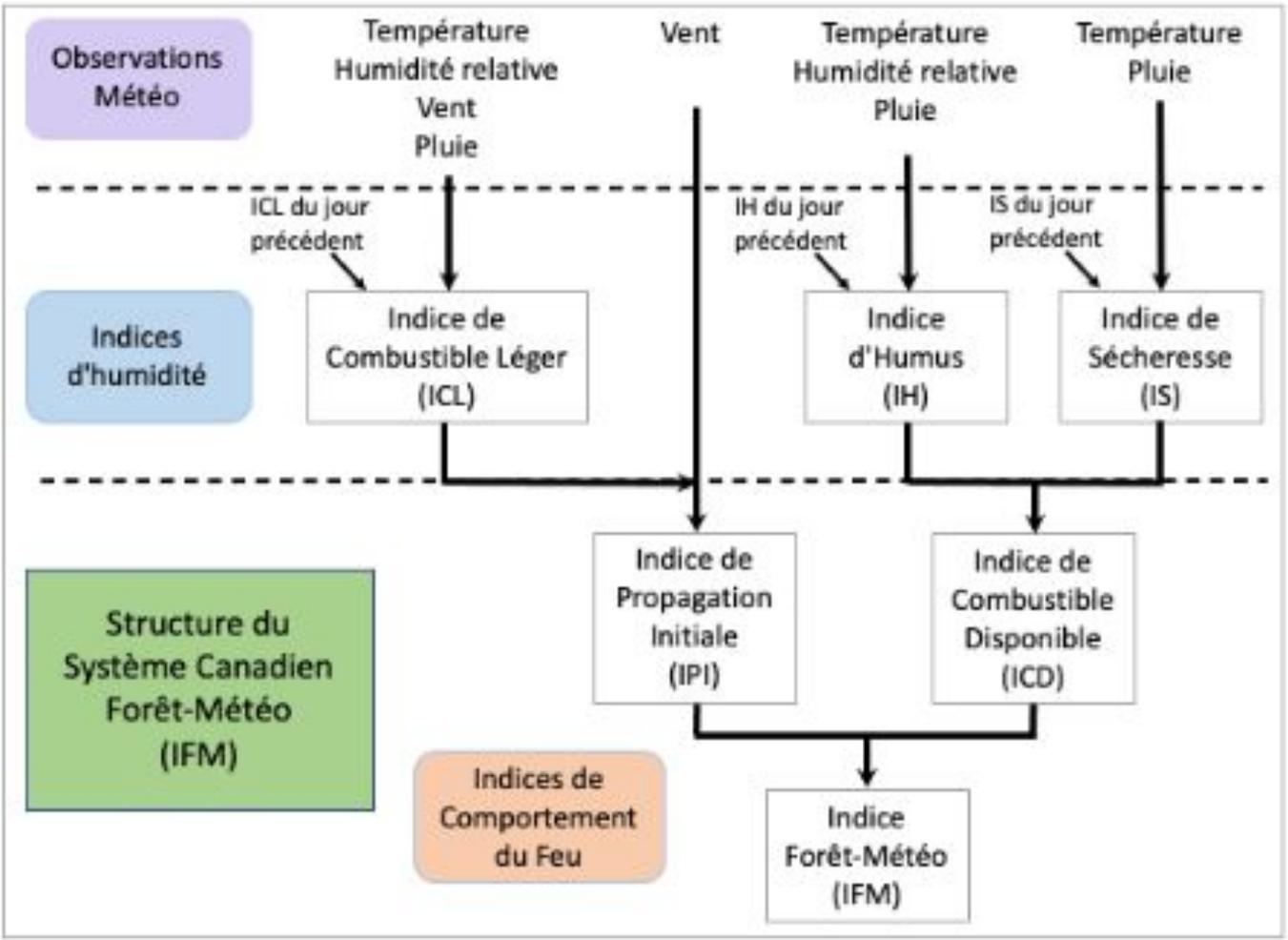
Van Wagner, 1987



Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo



# Les facteurs influençant les feux de forêts



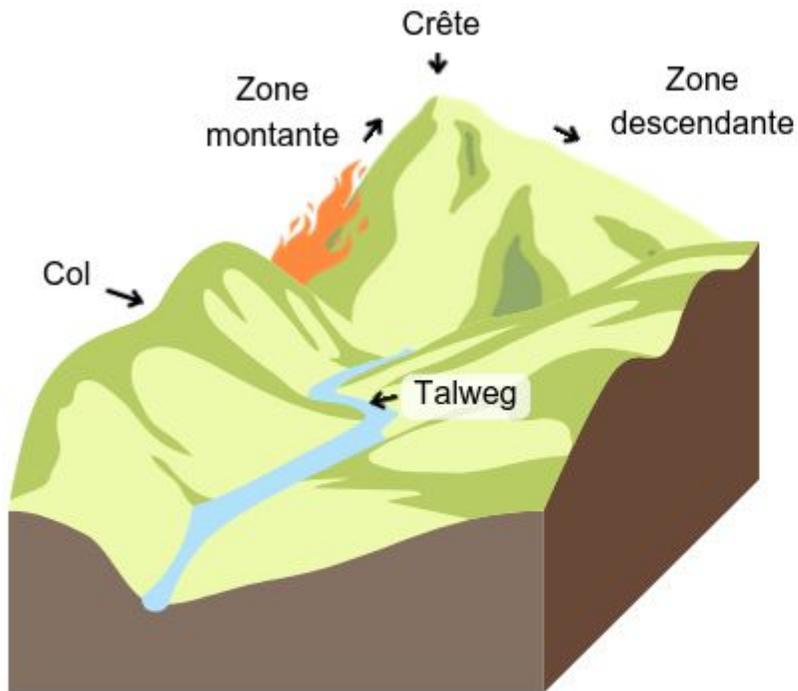
Van Wagner, 1987



Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo

- Indice Forêt Météo : calculé quotidiennement en prévision par Météo-France en saison estivale
- Calculs à partir de séries temporelles historiques ou projetées (scénarios GIEC par ex.)

# Les facteurs influençant les feux de forêts



## TOPOGRAPHIE

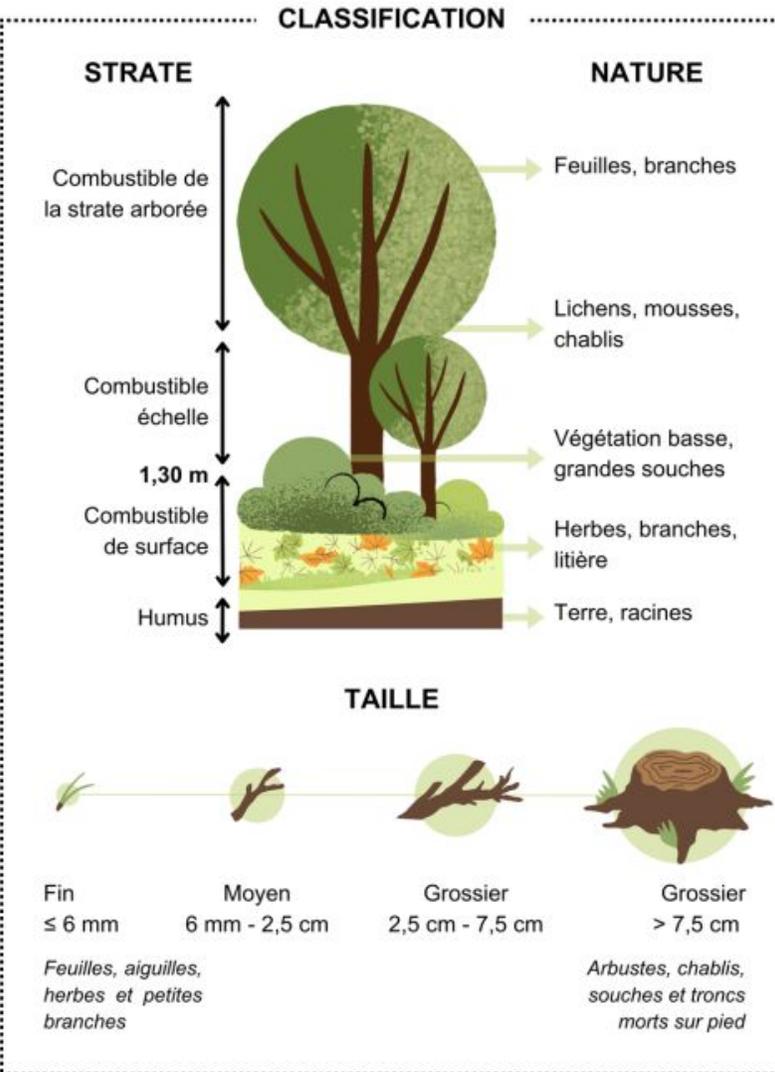


Exposition, Pente, Relief, Altitude

Caractéristique	Influence sur le feu
Zone montantes	Augmentation de la vitesse du feu
Zone descendantes	Diminution de la vitesse du feu
Cols	Zone de passage privilégié pour le feu
Lignes de crêtes et talwegs	Perpendiculaires à l'axe de propagation, ils changent la vitesse du feu Parallèles à l'axe ils peuvent diviser l'incendie



# Les facteurs influençant les feux de forêts



- Charge combustible (tonnes sèches/ha)
  - influence : intensité
  - éléments fins augmentent la dangerosité
- Teneur en eau
  - dépend de la taille, de l'état (mort/vivant) et de la météo
  - influence : vitesse de propagation, taux de consommation
- Composition
  - influence : l'inflammabilité, taux de consommation
- Structure
  - influence : propagation horizontale et verticale (passage en cime)





# Exposition présente et future

Projections Météo-France, ONF et INRAE, commandées par le MASA pour le rapport Mortier en [2023](#)

Utilisation du modèle probabiliste **Firelihood** développé par INRAE Avignon (Pimont et al. 2021)

Principe : estimer le nombre de feux estivaux annuels supérieurs à 20ha en fonction de :

- l'historique des feux >20ha sur le territoire métropolitain
- l'Indice Forêt Météo (IFM) annuel moyen estival sur des pixels de 8x8km (données SAFRAN, Météo-France)
- la sensibilité brute de la végétation (carte ONF)
- effets spatiaux : différences dans les activités humaines, occupation du sol, les moyens de luttés...

Calibration sur période de référence (2001-2020) puis projection selon scénarios de la Trajectoire Nationale d'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)

	2030	2050	2100
<b>Monde</b> (pré-industriel)	+ 1,5 °C	+ 2,0 °C	+ 3,0 °C
<b>Fr-Hex</b> (pré-industriel)	+ 2,0 °C	+ 2,7 °C	+ 4,0 °C
<b>Fr-Hex</b> (ref 1976-2005)	+ 1,4 °C	+ 2,1 °C	+ 3,4 °C

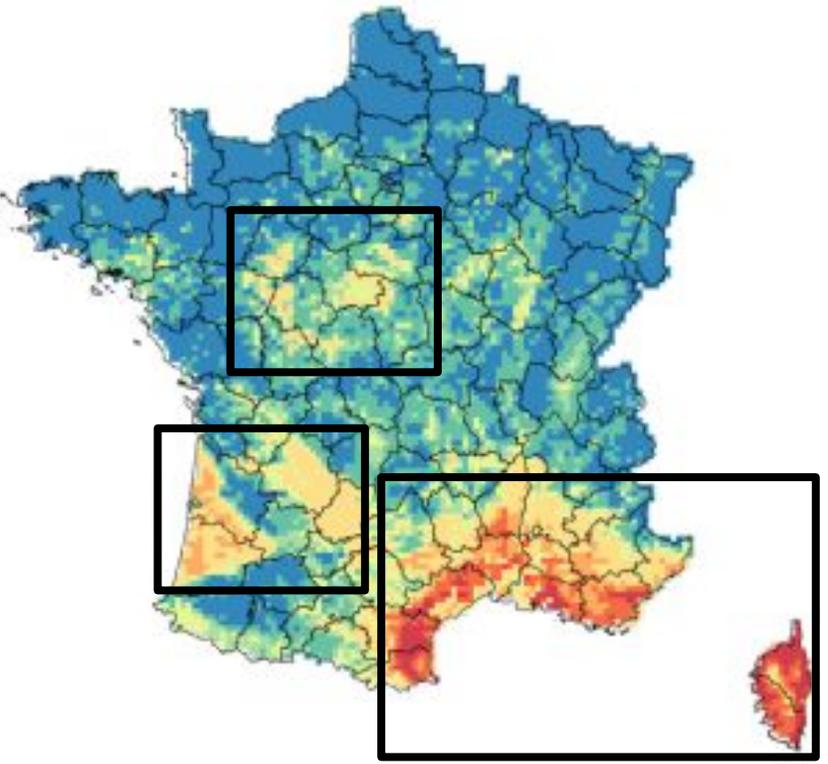
**Tableau 2. Lignes 1 :** niveaux de réchauffement planétaire par rapport à la période pré-industrielle 1850-1900. **Lignes 2 et 3 :** niveaux de réchauffement correspondants sur la France hexagonale par rapport à la période pré-industrielle et 1976-2005.



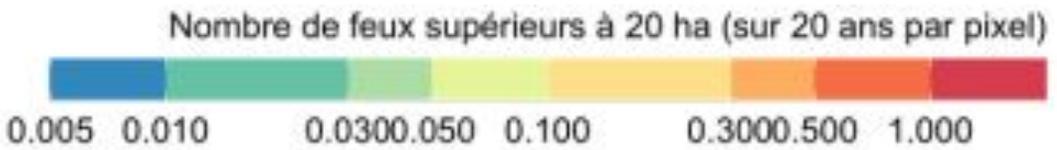
# Exposition présente et future

Projection du nombre de feux supérieurs à 20 ha selon la TRACC (maille SAFRAN 8x8km)

Référence (2001-2020)



3 grandes zones...





# Exposition présente et future

Projection du nombre de feux supérieurs à 20 ha selon la TRACC (maille SAFRAN 8x8km)

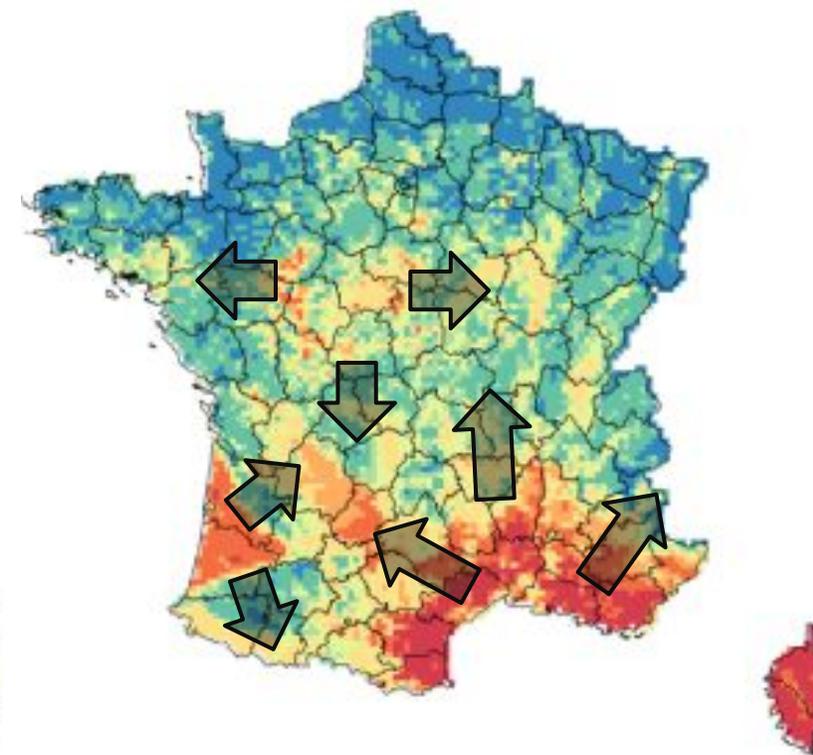
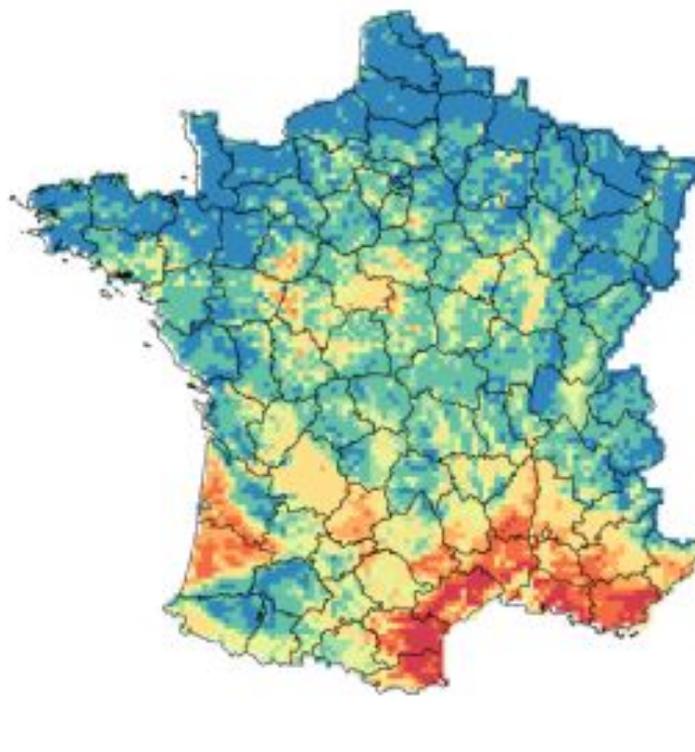
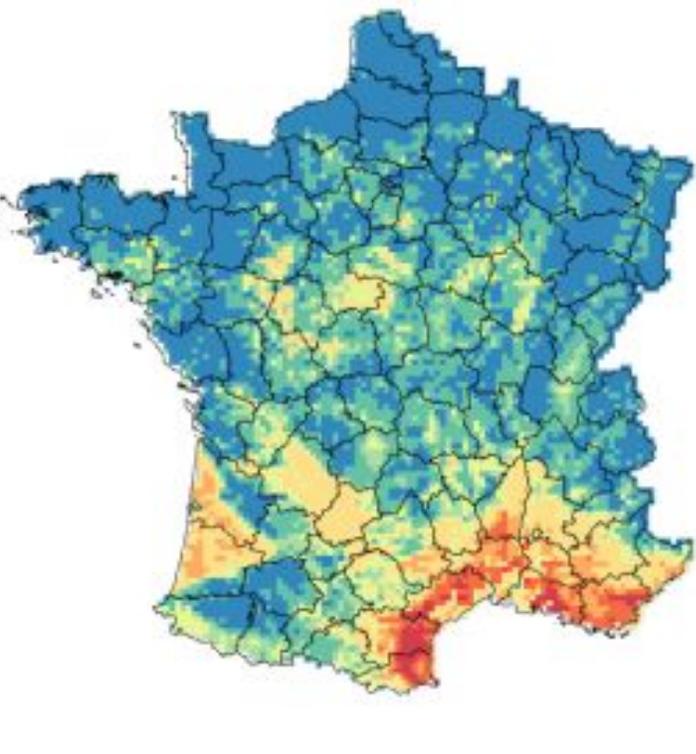
Référence (2001-2020)

TRACC 2050 (+2.0°C)

*Expansion: +60%*

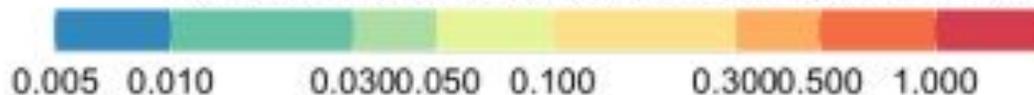
TRACC 2090 (+3.0°C)

*Expansion: +200%*



3 grandes zones...  
... qui ont tendance à se rejoindre

Nombre de feux supérieurs à 20 ha (sur 20 ans par pixel)





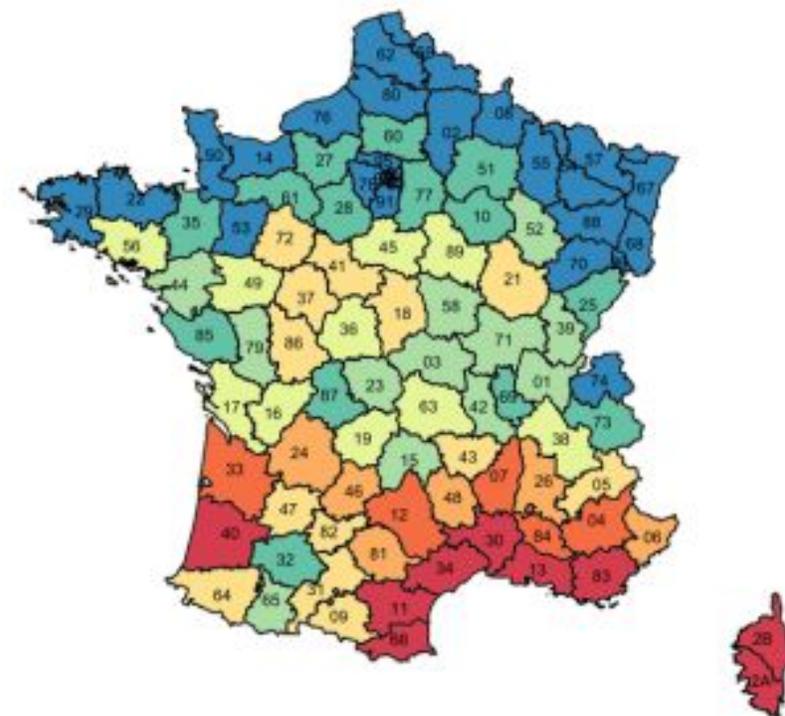
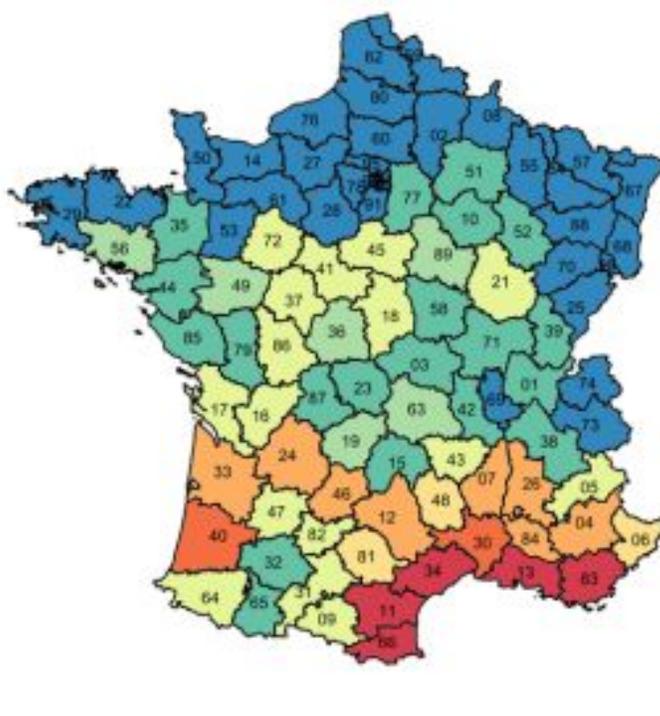
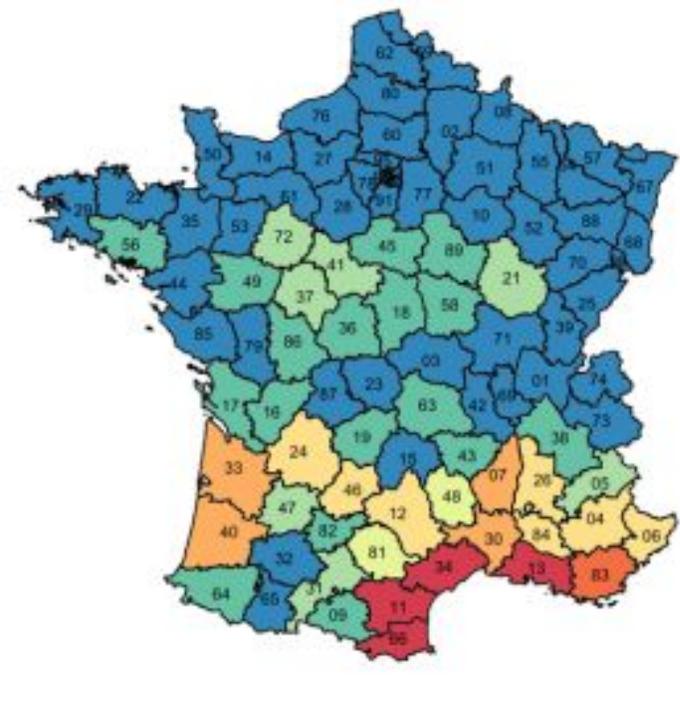
# Exposition présente et future

Synthèse par département et par an : somme des feux supérieurs à 20ha

Référence (2001-2020)

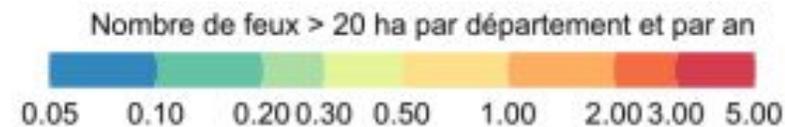
TRACC 2050 (+2.0°C)

TRACC 2090 (+3.0°C)



Les projections modifient peu la hiérarchie entre département  
Augmentations les plus fortes dans les zones d'expansion\*

- Massif central / Alpes : **01,05,12,19,38,43,48,63**
- Sud-Ouest / Pyrénées : 09,16,17,31,46,64,65,81,82
- Centre / Val de Loire : 18,21,36,41,45,49,89



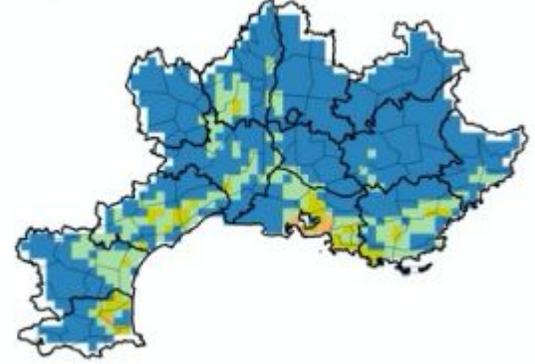
\* En gras : département AuRA



# Exposition présente et future

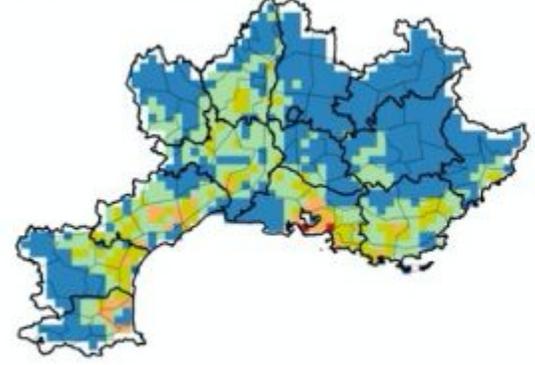
Evolution saisonnière de l'activité des feux (travaux zone sud uniquement, Pimont et al 2023)

(a) 2001-2020



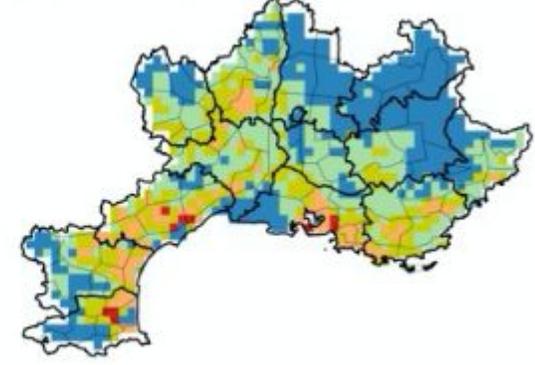
Zone à risque : 27 %

(d) 2050 (RCP8.5)

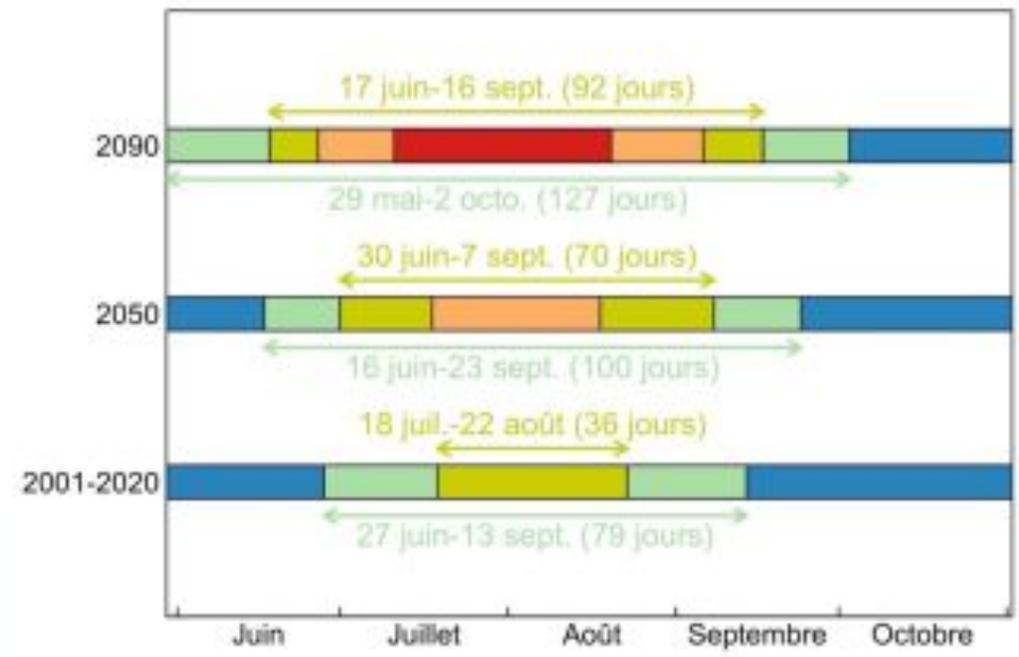


Zone à risque : 44 % (Expansion : +64%)

(e) 2090 (RCP8.5)



Zone à risque : 64 % (Expansion : +140%)

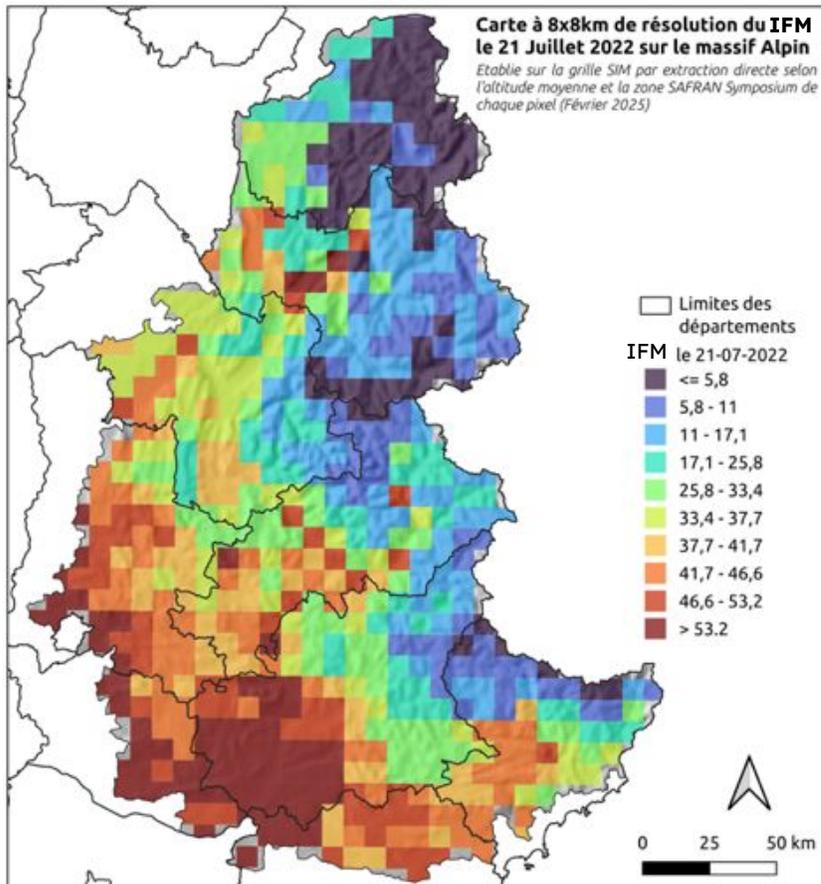




# Perspectives d'amélioration

## Amélioration de la précision de l'exposition dans les zones à fort relief

Approche actuelle : Safran 8km

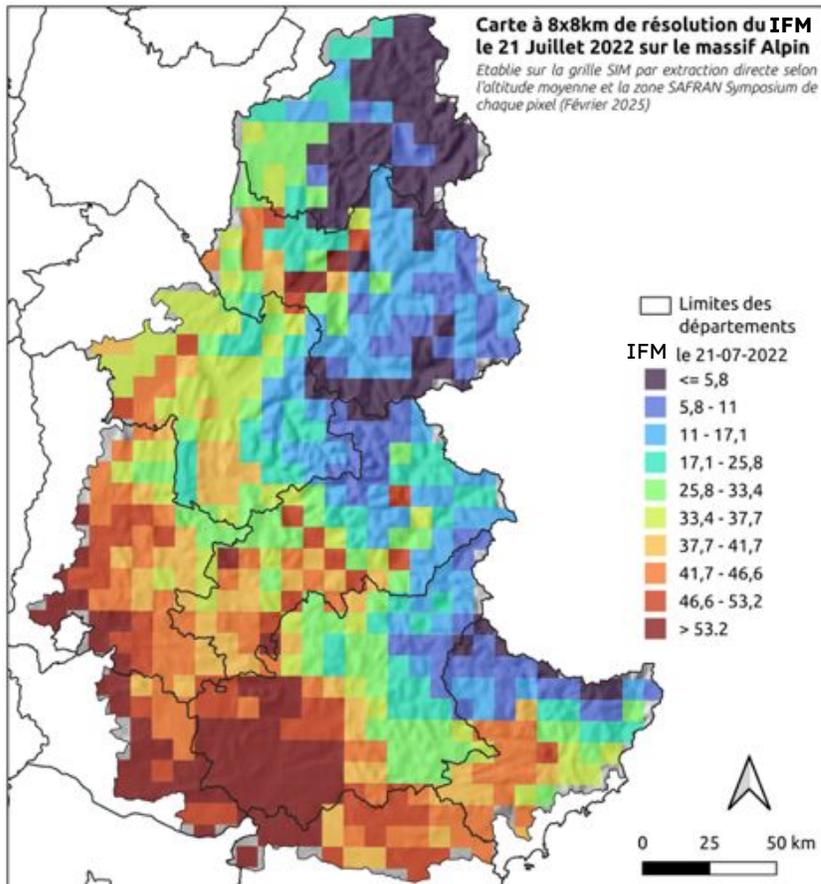




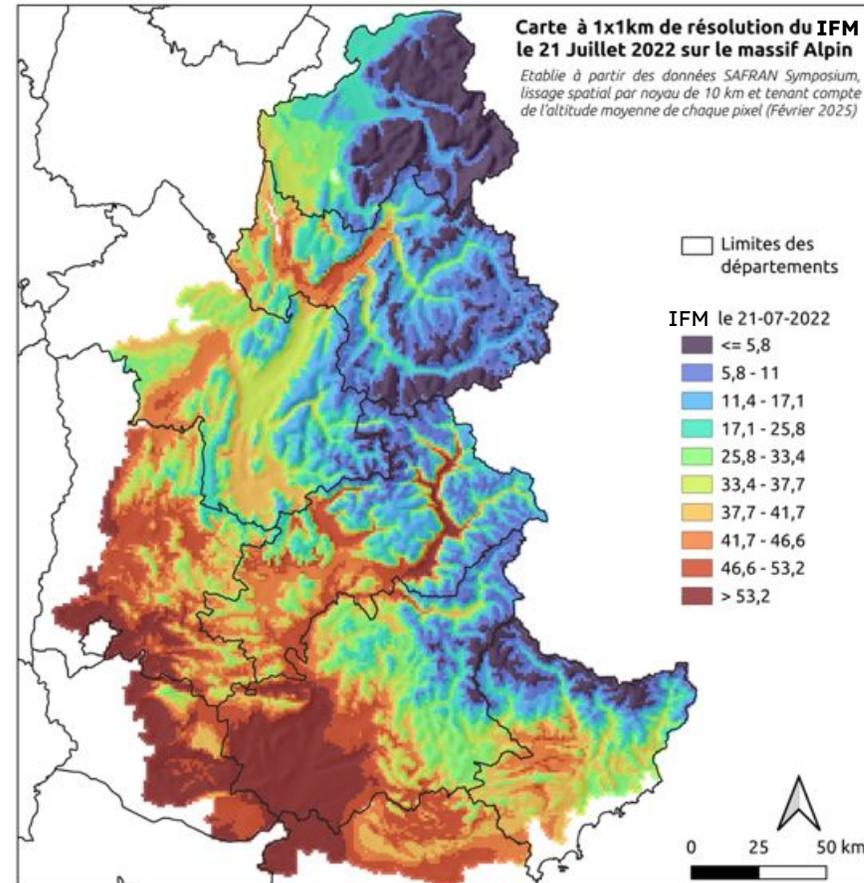
# Perspectives d'amélioration

## Amélioration de la précision de l'exposition dans les zones à fort relief

Approche actuelle : Safran 8km



Nouvelle approche à 1km avec données Safran Symposium



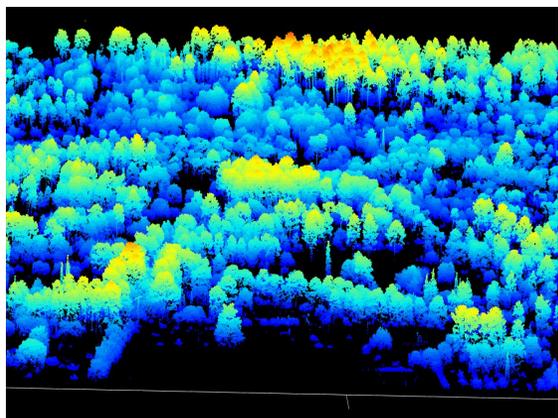
→ Méthodologie à intégrer dans les futures travaux nationaux, qui permettra de mieux caractériser l'exposition des peuplements de montagne



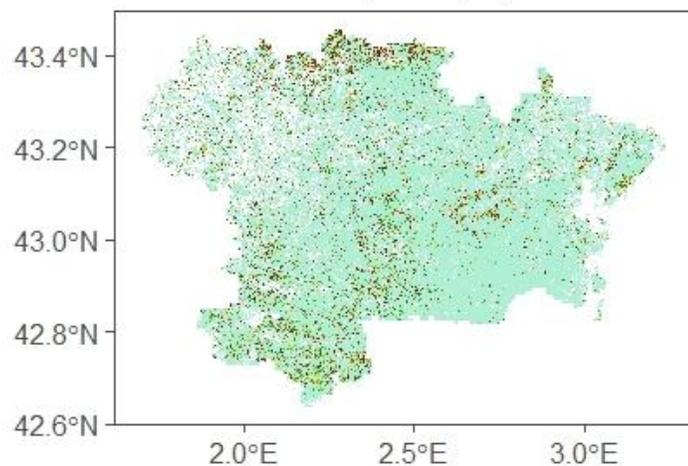
# Perspectives d'amélioration

## Intégrer la structure des peuplements

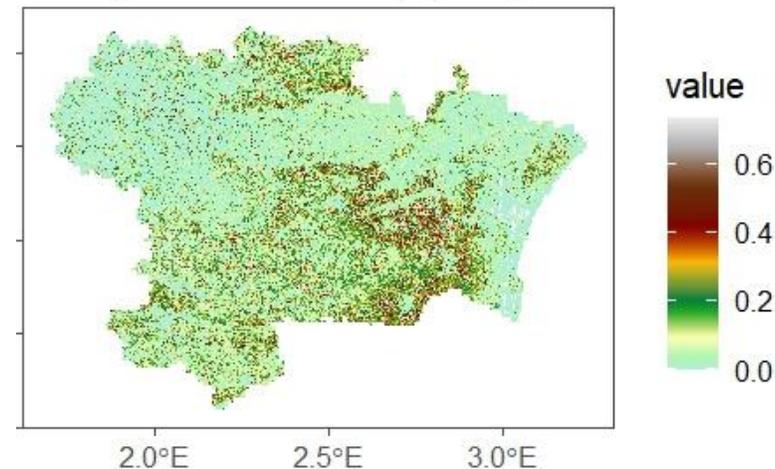
Utilisation du LiDAR HD pour cartographier les facteurs clés du roussissement/passage en Cime (ex dans l'Aude)



Base de canopée (m)



Charge en surface (Kg.m<sup>2</sup>)



Approche développée dans le post-doc d'Olivier Martin (INRAE URFM) pour caractériser la combustibilité des peuplements



→ Perspectives de cartographie de la vulnérabilité prenant en compte **essence** ET **structure**  
Travaux nationaux (INRAE + ONF + IGN) + thèse Camille Revertegat financée par INRAE et l'ADEME)

**MERCI  
POUR  
VOTRE  
ATTENTION**

[sylvain.dupire@inrae.fr](mailto:sylvain.dupire@inrae.fr)



**INRAE**



**Incendie Villargondran (73) - Juillet 2022**