



**Coralie CHARBONNEL**  
*Exiom Partners*



**Antoine HERANVAL**  
*ENSAE - CREST*



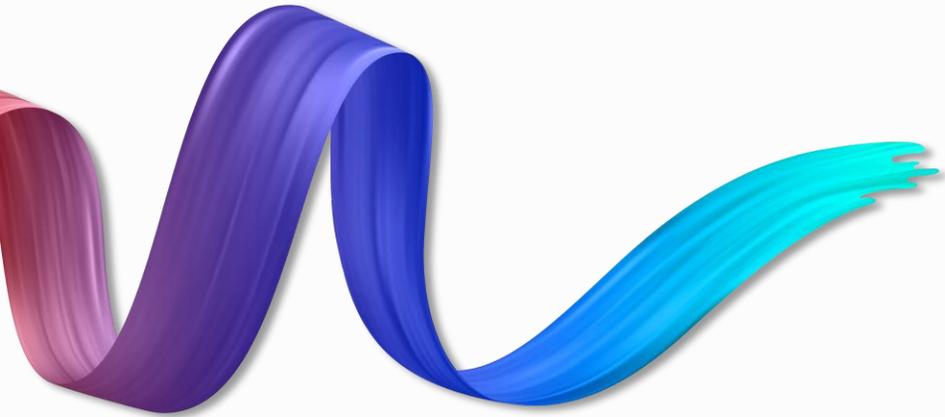
**Thomas PEYRAT**  
*Exiom Partners - CREST - IMT*

**Modélisation du risque des feux de forêt**



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Des données et un indicateur
- 3 Une étude et un modèle
- 4 Nos travaux en cours
- 5 Assurance et perspectives



1 Introduction

# INTRODUCTION

## Les feux de forêt en France : de nombreux événements récents



1949

Sud Bordeaux

50 000 hectares brûlés  
84 morts



2022

Gironde

30 000 hectares brûlés  
50 000 personnes évacuées



2022

Monts d'Arrée & Forêt  
de Brocéliande

2 000 hectares brûlés



2023

Argelès-sur-Mer

480 hectares brûlés  
4 000 vacanciers évacués



2024

Corse

145 Hectares



**7 084 feux de forêts**

déclarés à mi-2022 contre  
4000 feux par an en moyenne  
lors de la décennie 2007-2018



**+ 70 000**

hectares de forêts brûlées en  
2022



**3**

des plus grands incendies  
ayant touché la France ces 40  
dernières années  
se sont déclenchés  
en 2021 et 2022.

# INTRODUCTION

## Les feux de forêt : de quoi parle-on ?



Un feu de forêt est défini comme étant **une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace.**



● On parle de **feu de forêt** lorsque l'incendie couvre une surface minimale de 0,5 hectare d'un seul tenant.



● Les **mégafeux** touchent quant à eux, une surface allant de 1 000 à 10 000 hectares.



● Les feux considérés comme **extrêmes** s'illustrent par leur dimension exceptionnelle > 10 000 hectares brûlés).



### Feu de sol

brûlent la matière organique contenue dans l'humus. Leur vitesse de propagation reste faible, mais les dégâts sont considérables



### Feu de surface

brûlent les couches basses de la végétation. Leur vitesse de propagation dépend de la force du vent



### Feu de cime

brûlent les couches supérieures de la végétation. Leur vitesse de propagation étant très rapide, ils sont difficiles à maîtriser.

# INTRODUCTION

## Les feux de forêt : explication du phénomène

Pour qu'il y ait inflammation et combustion, trois facteurs doivent être réunis :

### > UN COMBURANT

Un comburant est une substance qui "entretient" la combustion. Elle a propriété de permettre la combustion d'un combustible. **C'est généralement le dioxygène de l'air.**

### > UNE ENERGIE

Une source d'énergie est nécessaire pour démarrer et maintenir une réaction de combustion. Généralement, **la chaleur dégagée par la combustion est suffisante pour auto-entretenir la réaction.**

### > UN COMBUSTIBLE

Un combustible est une substance qui brûle telle que le bois ou le pétrole. Plus précisément, c'est un composé chimique qui peut se consumer lors d'une combustion.



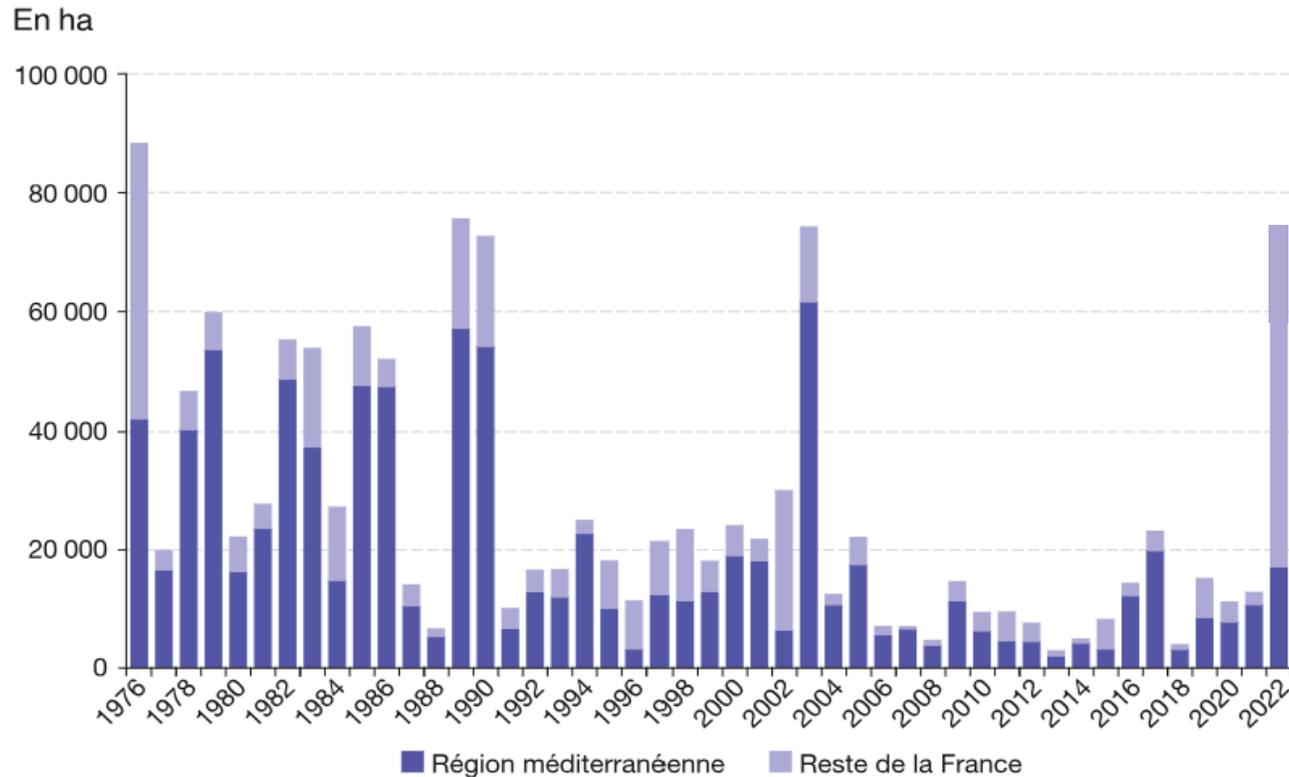
Un feu de forêt peut être d'origine :

- > **Naturelle** (dû à la foudre ou à une éruption volcanique).
- > **Humaine** : soit de manière intentionnelle, soit de manière accidentelle (barbecue, mégot de cigarette, feu d'écobuage mal contrôlé, travaux...).
- > Il peut également être provoqué par des **infrastructures** (ligne de transport d'énergie, dépôt d'ordure, ligne de chemin de fer, etc.).

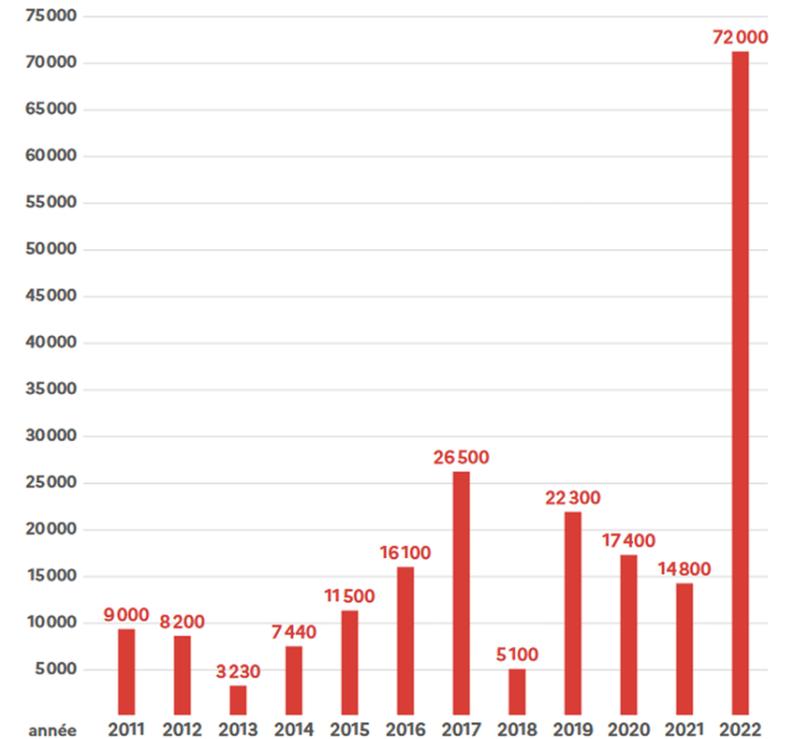
# INTRODUCTION

## Evolution au cours du temps

### SURFACES DE FORÊTS BRÛLÉES CHAQUE ANNÉE ENTRE 1976 ET 2022



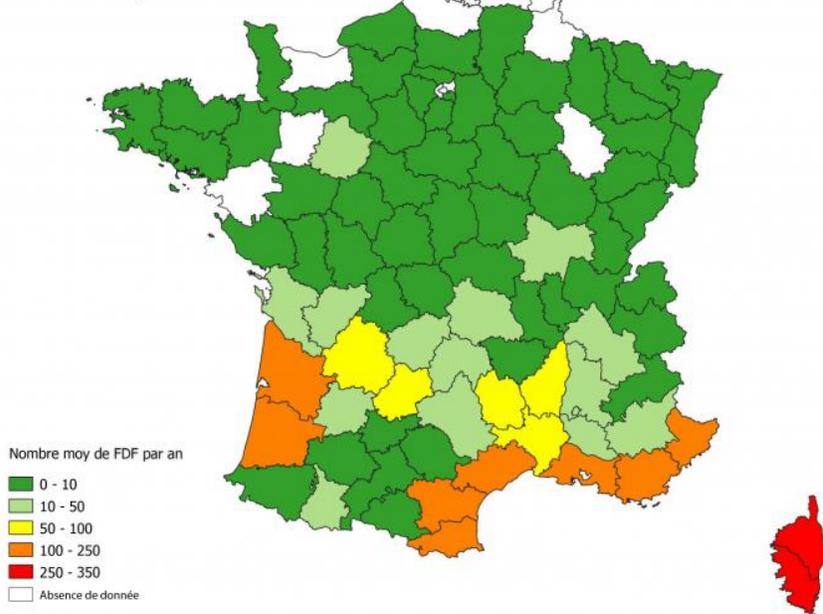
### Surfaces brûlées en France sur 11 ans (hectares)



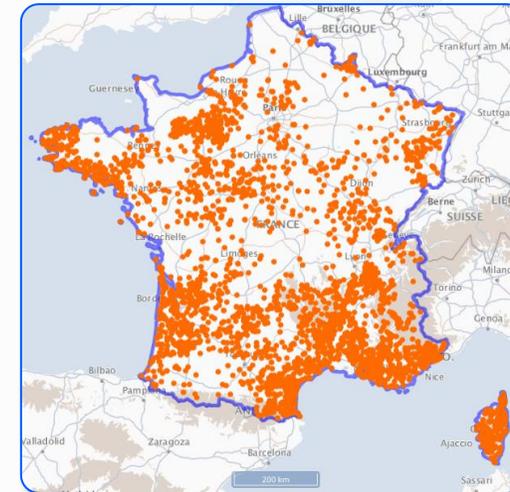
# INTRODUCTION

## Les feux de forêt : répartition géographique

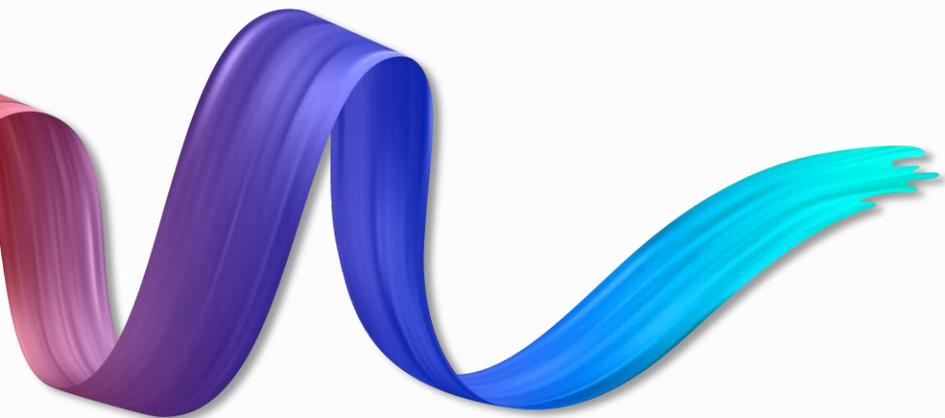
Moyenne annuelle du nombre d'incendies qualifiés comme Feu de forêt  
Période 2007 - 2018 / Source BDIFF



- > La France est le quatrième pays européen le plus boisé avec **16,9 millions d'hectares de forêt** sur son territoire métropolitain.
- > Historiquement, en **zone méditerranéenne** et le **sud-ouest**.
- > Elargissement de l'exposition à **toute la France** comme le montre l'année 2022



Carte des communes où au moins un incendie de forêt a été signalé en 2022 (BDIFF)



2

Des données et un indicateur

# DES DONNÉES ET UN INDICATEUR

Une base de données centrale qui recense l'historique des feux en France

## Base de Données sur les Incendies de Forêts en France

La base de données sur les incendies de forêt (BDIFF) est une application internet chargée de centraliser l'ensemble des données sur les incendies de forêt sur le territoire français depuis 2006 et de mettre l'ensemble de cette information à disposition du public et des services de l'Etat.



**MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
ET DE LA SOUVERAINETÉ  
ALIMENTAIRE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**MINISTÈRE  
DE L'INTÉRIEUR  
ET DES OUTRE-MER**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IGN**

INSTITUT NATIONAL  
DE L'INFORMATION  
GÉOGRAPHIQUE  
ET FORESTIÈRE

45 000 lignes et 32 covariables dont :

DATE

SURFACE BRULEE

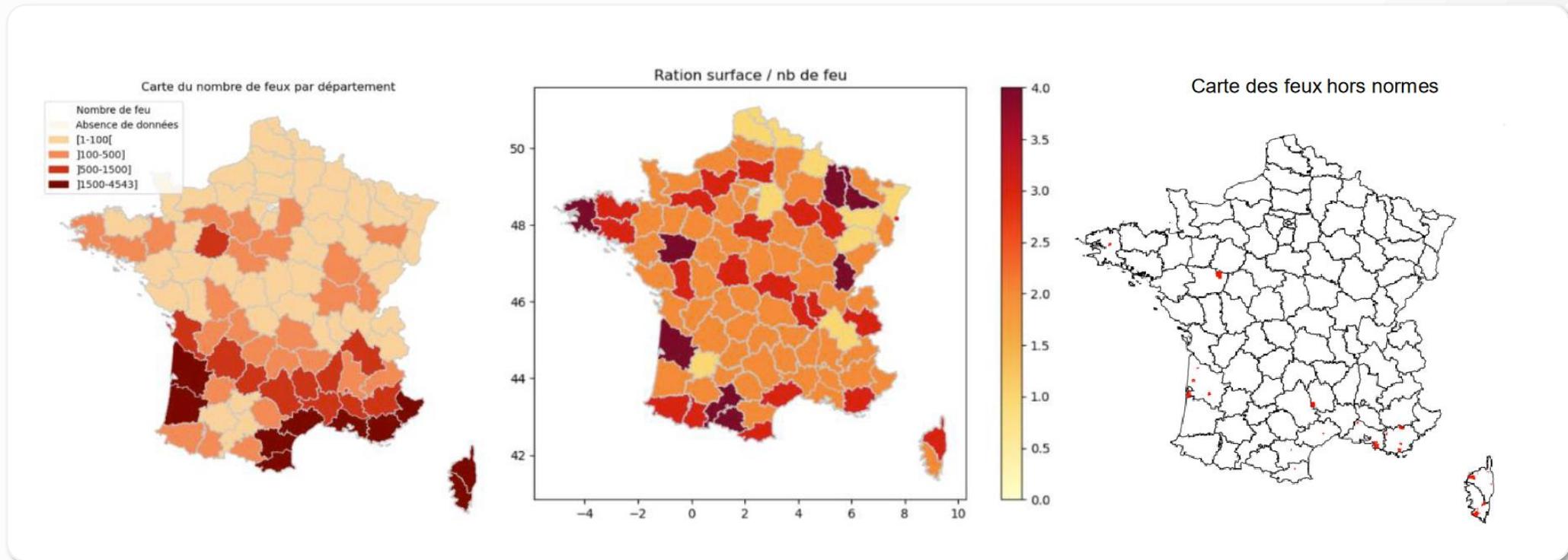
LOCALISATION

CONDITIONS METEOROLOGIQUES

ORIGINE DU FEU

# DES DONNÉES ET UN INDICATEUR

Exemple sur l'année exceptionnelle de 2022



Extension géographique des feux de forêt depuis 2006 : une tendance marquée à la hausse, renforcée par une année 2022 exceptionnelle.

# DES DONNÉES ET UN INDICATEUR

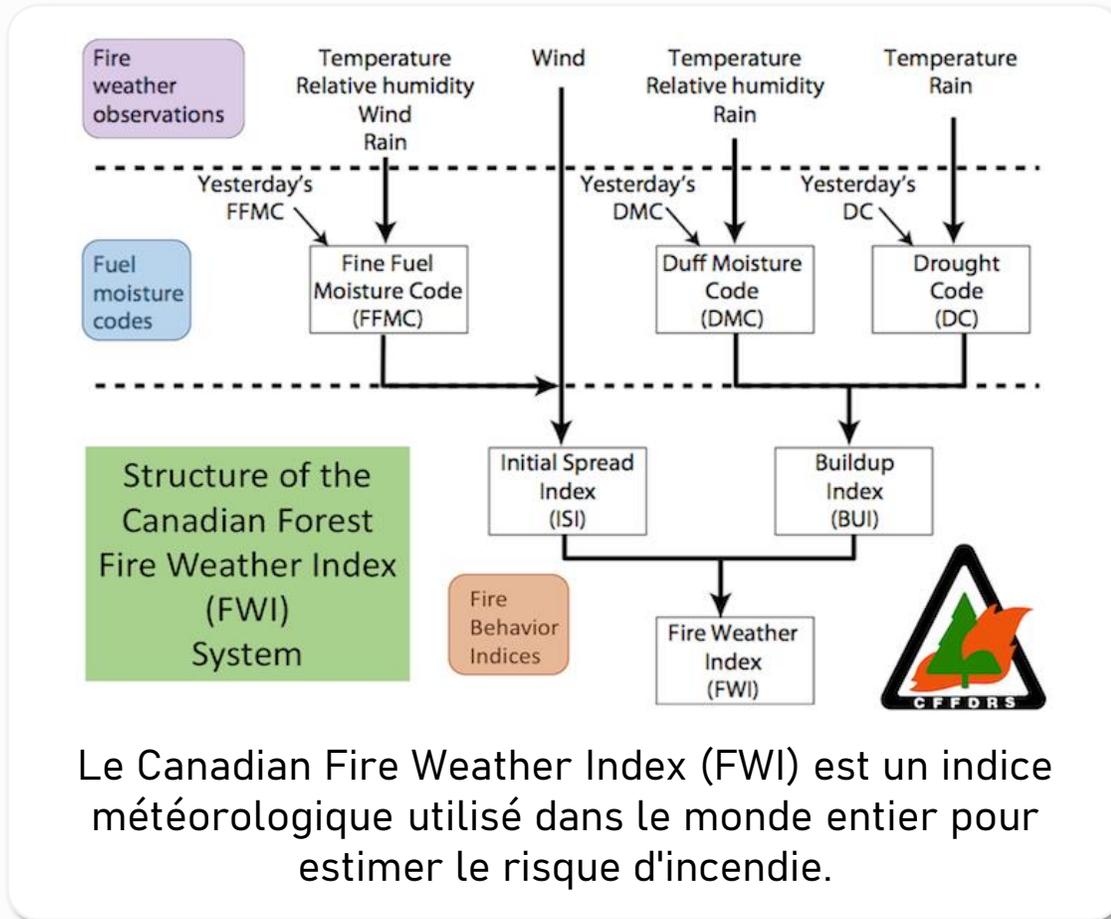
## The Canadian Fire Weather Index (FWI) : un indicateur de risque

> Indice développé et utilisé au Canada depuis 1976

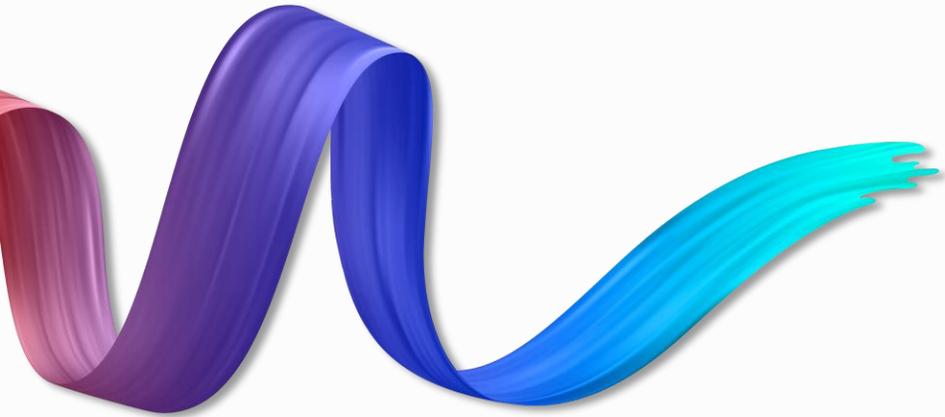
> Indice qui décrit le niveau de risque pour une région donnée en fonction de variables météorologiques

> Méthode utilisée par l'European Forest Fire Information System pour évaluer le niveau de danger aux feux.

> Existence d'autres indicateurs comme le MARK-5, KBDI et NFDRS.



Le Canadian Fire Weather Index (FWI) est un indice météorologique utilisé dans le monde entier pour estimer le risque d'incendie.



3

Une étude et un modèle

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

Le changement climatique : des effets bien documentés

**INRAE**

**Projections des effets du changement  
climatique sur l'activité des feux de forêt  
au 21ème siècle :  
Rapport final  
(31 mai 2023)**

François Pimont<sup>1</sup>, Jean-Luc Dupuy<sup>1</sup>, Julien Ruffault<sup>1</sup>, Eric Rigolot<sup>1</sup>,  
Thomas Opitz<sup>2</sup>, Juliette Legrand<sup>2</sup>, Renaud Barbero<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INRAE URFM, Avignon

<sup>2</sup> INRAE BIOSP, Avignon

<sup>3</sup> INRAE RECOVER, Aix-en-Provence

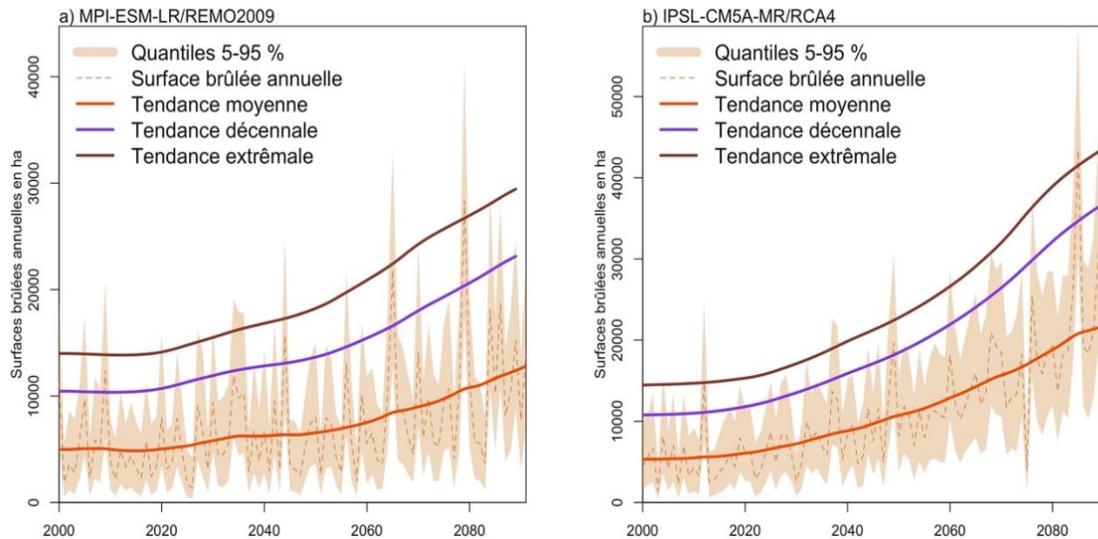
Contribution technique à la mission d'expertise conjointe sur l'extension des  
zones à risque d'incendie de forêt et de végétation à échéance du milieu et fin  
du siècle dans le contexte du changement climatique

Rapport réalisé dans le cadre de la convention MAA-INRAE du 9 mai 2022,  
n°G 03 / 2022

- > Rapport complet sur la modélisation du risque lié aux feux de forêt
- > Des projections climatiques en fonction des scénarios d'émissions ont été réalisées
- > Travaux académiques qui se basent sur le FMI et un modèle probabiliste

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## Projections : une augmentation des surfaces brûlées à prévoir



**Figure 3.5.** Projections de l'activité des feux moyenne (en rouge), décennale (en violet) et extrême (en marron), ainsi que des quantiles des surfaces brûlées potentielles pour chaque année (calculés à partir des quantiles 5% et 95% de 300 simulations de *Firelihood*) au 21<sup>ème</sup> siècle selon le RCP 8.5, et selon deux modèles contrastés de la sélection DRIAS 2020.

> Variabilité des surfaces brûlées prédite par les 300 simulations pour deux modèles climatiques selon le RCP 8.5

> En plus des tendances moyennes, décennale et extrêmes déjà présente l'enveloppe orange correspondant aux quantiles 5-95%

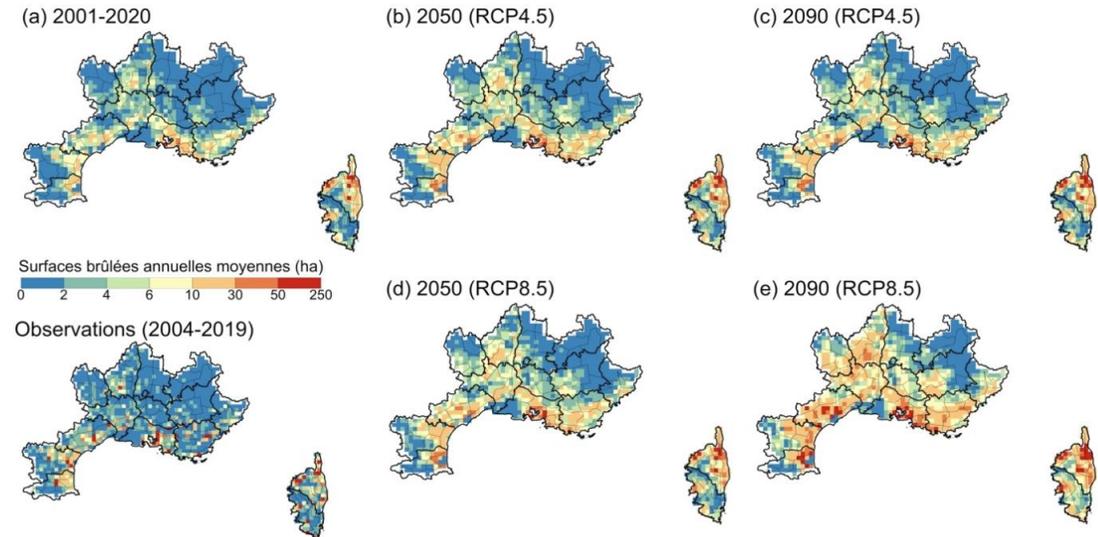
> On note que les années correspondant à des pics météorologiques sont fréquentes

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## Projections : une expansion des zones à risque

> Sous l'effet du changement climatique, les surfaces brûlées augmentent partout, mais de façon plus marquée dans les endroits où les surfaces brûlées sont déjà importantes.

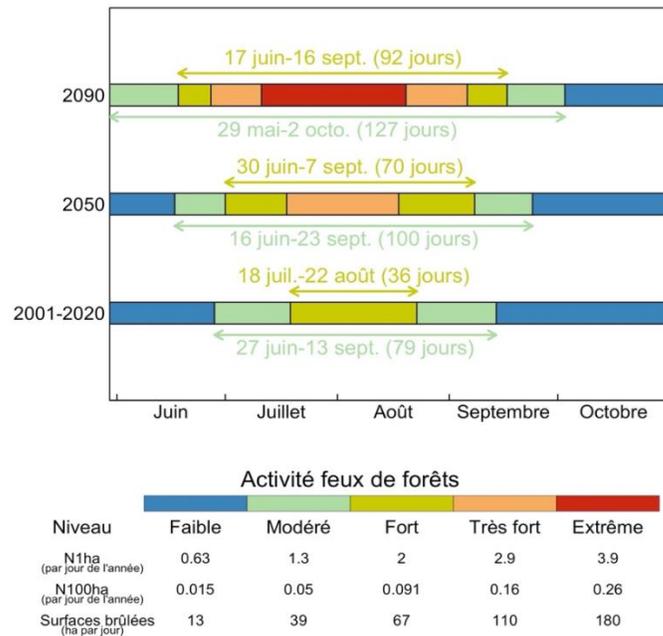
> Ces zones d'expansion, qui présentent encore actuellement une activité limitée, vont concerner des populations et des territoires dans lesquels la culture du risque et la politique de prévention sont moins développées.



**Figure 3.6.** Surfaces brûlées annuelles moyennes (en ha par pixel de 8 km de côté), selon les projections climatiques du modèle *Firelihood* pour la période historique (a) et les horizons 2050 et 2090 sous scénario RCP 4.5 (b et c) et RCP 8.5 (d et e). A titre de référence, les observations issues de la base de données Prométhée pour la période 2004-2019 sont présentées en bas à gauche. Les délimitations en traits noirs épais correspondent aux limites des départements, alors que les traits fins correspondent au sous-découpage des zones météorologiques « feux de forêt » définies par Météo-France.

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## Projections : une extension de la saison des feux



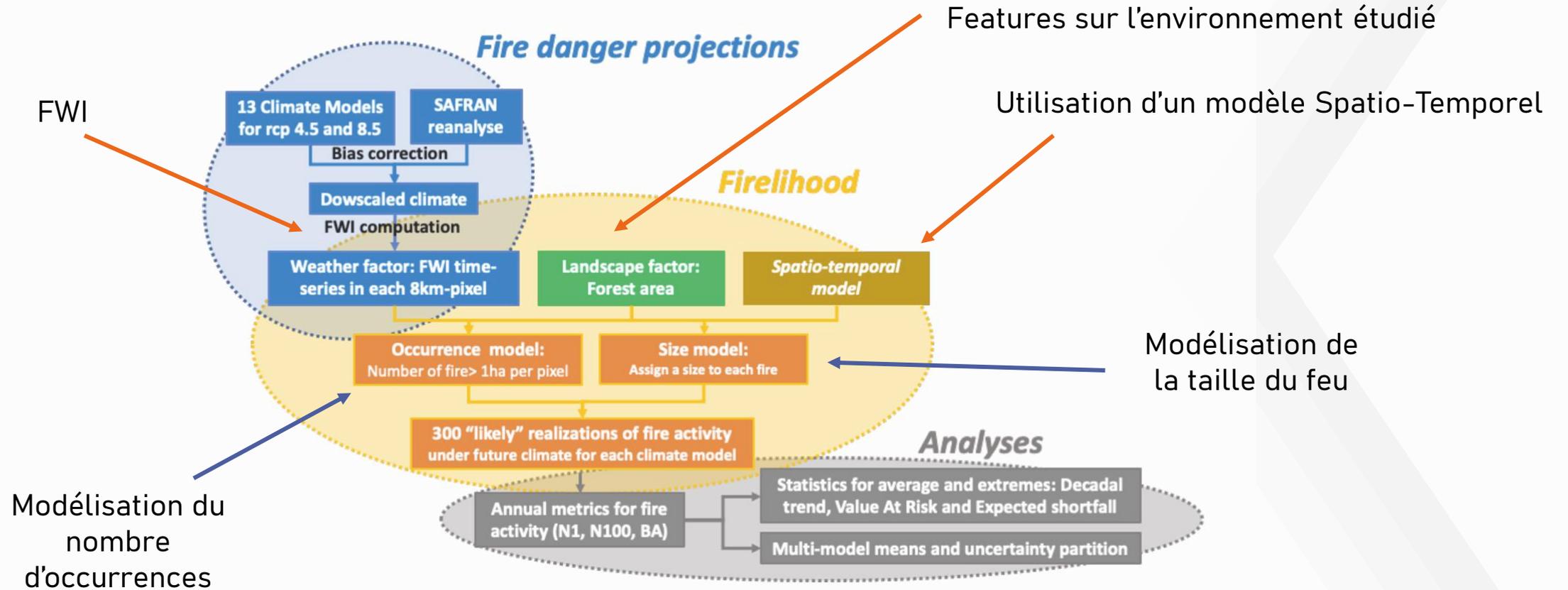
**Figure 3.13.** Évolution du niveau d'activité des feux journaliers selon le RCP 8.5 (même figure pour le RCP 4.5 disponible en Annexe C). Les périodes correspondant à un niveau au moins modéré et au moins fort s'allongent aux horizons 2050 et 2090.

> La longueur de la saison de feu passerait donc de 79 jours à 100 puis 127 jours sous RCP 8.5, alors que le cœur de saison passerait de 36 à 92 jours en fin de siècle.

> Ces allongements de saison de feu sont susceptibles d'induire fatigue accrue des personnels et usure prématurée des matériels impliqués, et vont nécessiter une adaptation des dispositifs opérationnels

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## L'architecture de Firelihood



# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

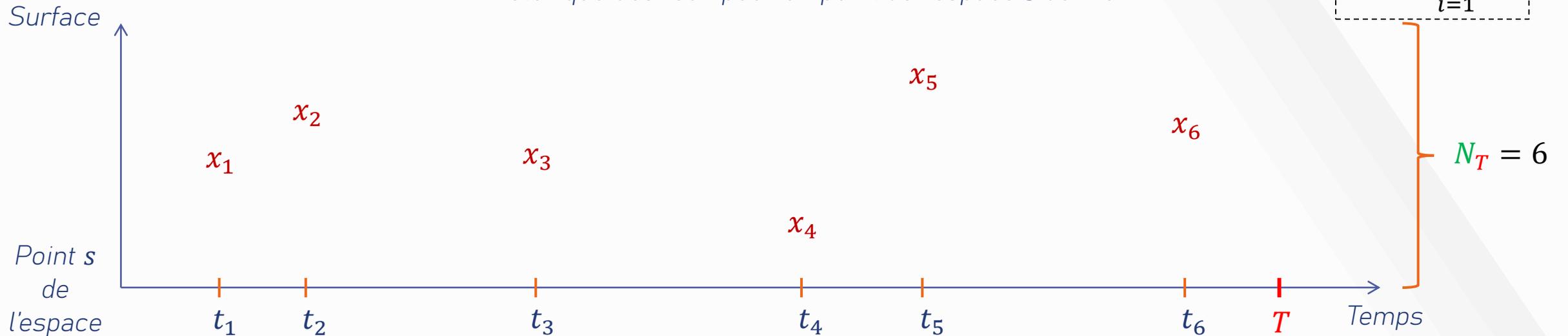
## La modélisation par un processus spatio-temporel ponctuel marqué

### Modéliser un feu :

Nous considérons dans la modélisation qu'un feu survient à une date précise  $t \in \mathcal{T}$  et à localisation de l'espace  $s \in \mathcal{S}$ . De plus, ce feu possède une taille  $x \in \mathbb{R}^+$ , qui correspond à la surface brûlée. Ainsi nous allons considérer qu'un feu est composé de ces trois informations  $\mathfrak{F} := (s, t, x)$ .

### Illustration dans le cas unidimensionnel :

*Historique des feux pour un point de l'espace  $s$  donné*



# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## La modélisation par un processus spatio-temporel ponctuel marqué

### Comment compter le nombre de feux sur un point donné ?

De façon générale, un processus de comptage  $(N_t)$  est caractérisé par son intensité  $\lambda_t$  qui représente la probabilité infinitésimale d'observer un évènement.

Ainsi lorsque :

- $\lambda_t = \lambda$  une constante,  $(N_t)$  est un processus de Poisson homogène
- $\lambda_t = \lambda(t)$  une fonction déterministe,  $(N_t)$  est un processus de Poisson inhomogène
- $\lambda_t = \mu(t) + \int_0^t \phi(t-s)dN_s = \mu(t) + \sum_{\{\tau_i < t\}} \phi(t - \tau_i)$ ,  $(N_t)$  est un processus de Hawkes

Dans le domaine des géostatistiques, on considère plus généralement que lorsque l'intensité  $\lambda_t$  est une fonction déterministe  $\lambda(t)$  il s'agit d'un processus de Poisson et lorsque l'intensité  $\lambda_t$  est la réalisation d'un processus stochastique  $(\Lambda_t)$  il s'agit d'un processus de Cox.

# UNE ÉTUDE ET UN MODÈLE

## La modélisation par un processus spatio-temporel ponctuel marqué

### Le Log Gaussian Cox Process (LGCP)

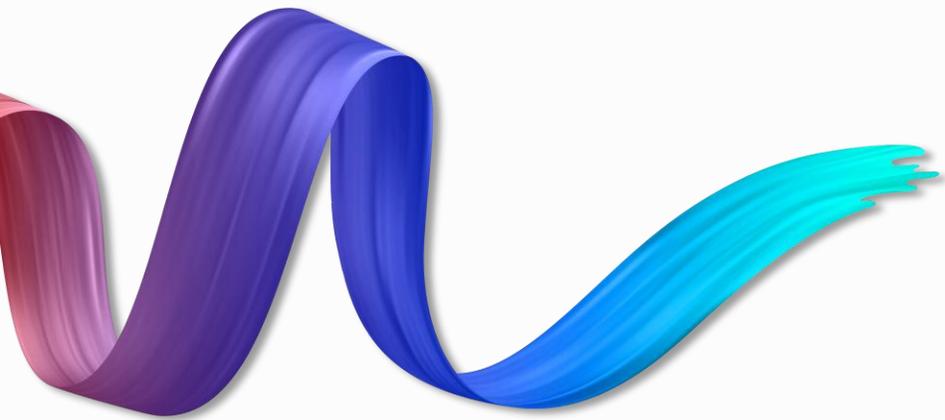
Dans un LGCP que nous allons considérer, l'intensité du processus est stochastique et de la forme,

$$\log(\lambda_t(s)) = \beta_0 + \sum_i \beta_i f_z(z_i(s)) + f_{spatial}(s)$$

Où,  $z_i$  est la  $i$ -ème covariable du modèle et  $f_{spatial}$  est un champ aléatoire Gaussien avec une matrice de covariance de Matérn.

### Dans le cadre de l'inférence Bayésienne

- > Un schéma d'inférence Bayésienne couramment utilisé dans le cadre des LGCP est l'Integrated Nested Laplace Approximation (INLA) qui exploite des approximations de Laplace afin d'accélérer les temps de calculs (*par rapport à la méthode MCMC par exemple*).
- > Cette méthode est couplée avec une approche par SPDE afin d'approximer le champ Gaussien par un GMRF (Gaussian Markov Random Field).

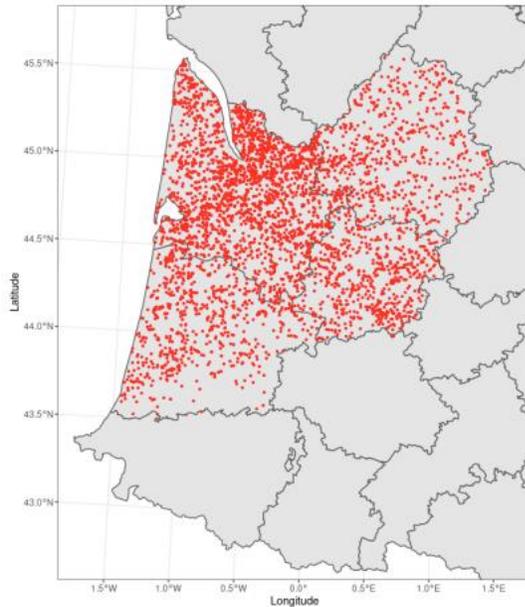


#### 4 Nos travaux en cours

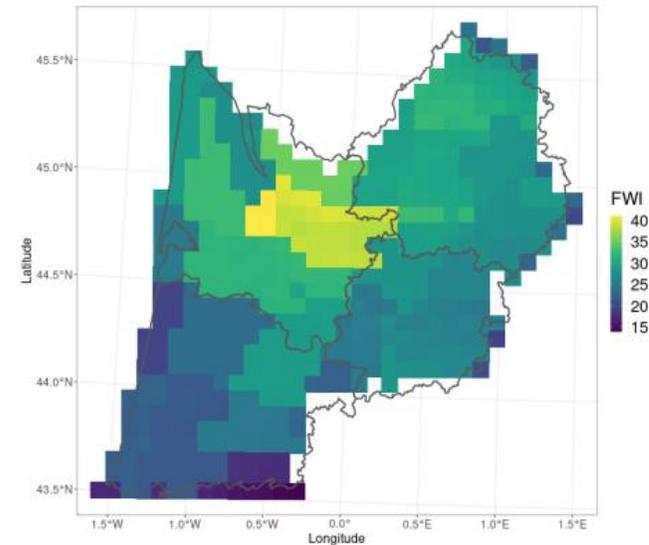
- A Prise en main du modèle existant
- B La création de nouvelles covariables
- C Répartition d'un feu au sein d'une zone
- D La création d'une application

# NOS TRAVAUX EN COURS

## Prise en main d'un modèle existant



Répartition des feux dans la région  
Aquitaine entre 2006 et 2020

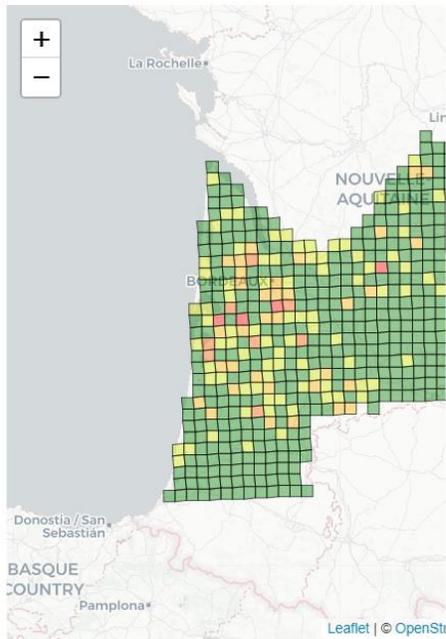


Répartition spéciale de l'FWI dans la  
région Aquitaine le 4 juillet 2014

# NOS TRAVAUX EN COURS

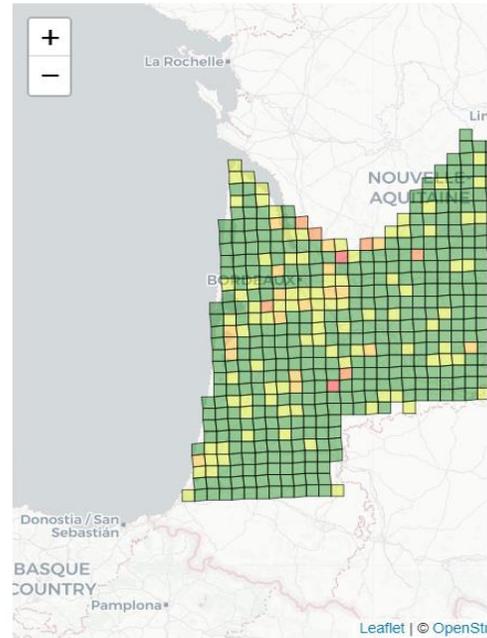
## Prise en main d'un modèle existant

### Simulated fires



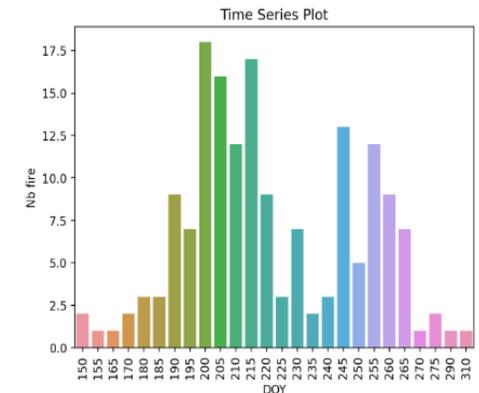
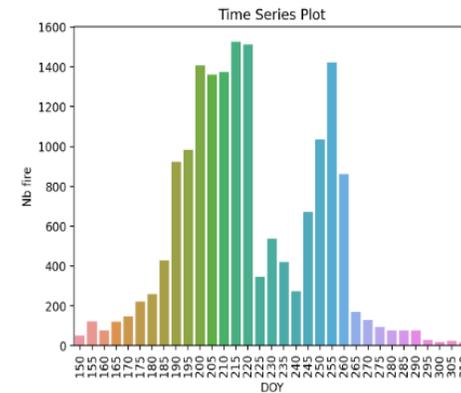
Modèle de base

### Historical fires



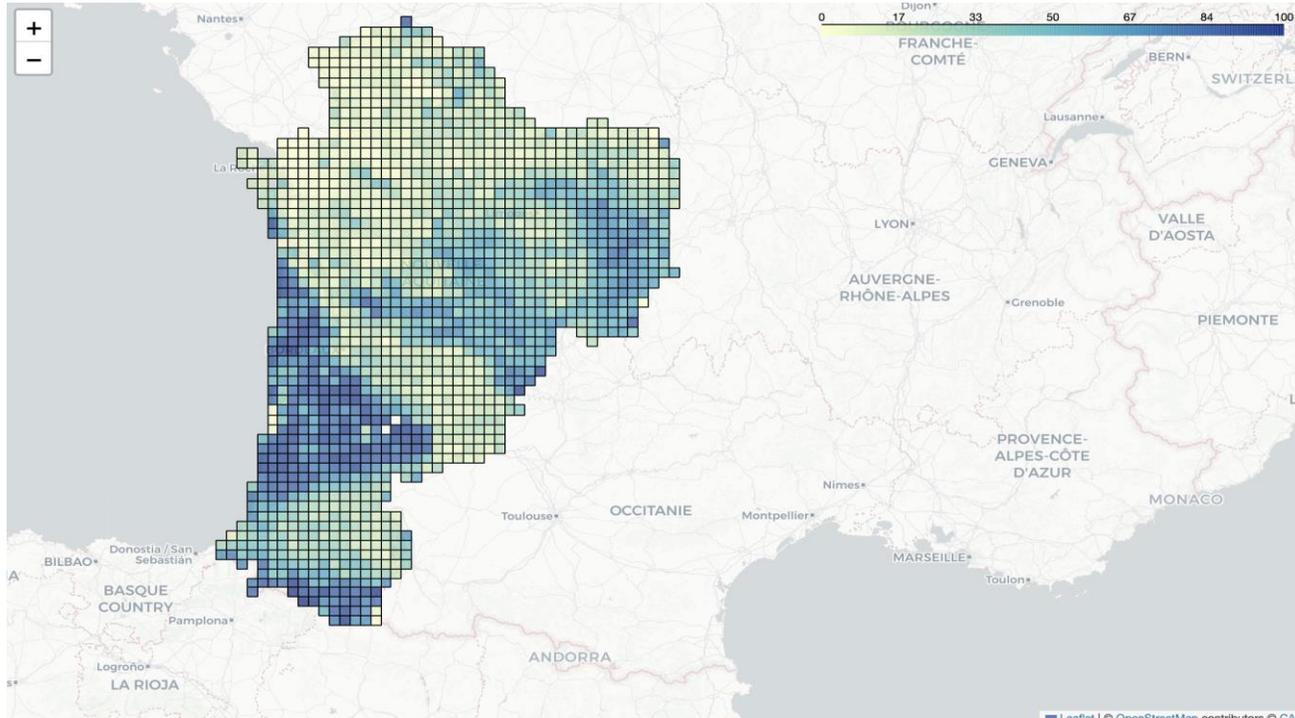
Données historiques

- Les principales covariables du modèle de base sont la surface de forêt, et le FWI
- Le modèle capte bien la distribution spatiale et temporelle des feux de forêt au sein de la région étudiée



# NOS TRAVAUX EN COURS

## La création de nouvelles covariables



Part de surface boisée par zone

- > L'accès à de nouvelles données spatiales permettrait la création de nouvelles covariables au sein de la modélisation
- > Cependant l'espace de stockage et les temps de calculs peuvent être des facteurs limitants lors de la création et l'implémentation de certaines de ces covariables

# NOS TRAVAUX EN COURS

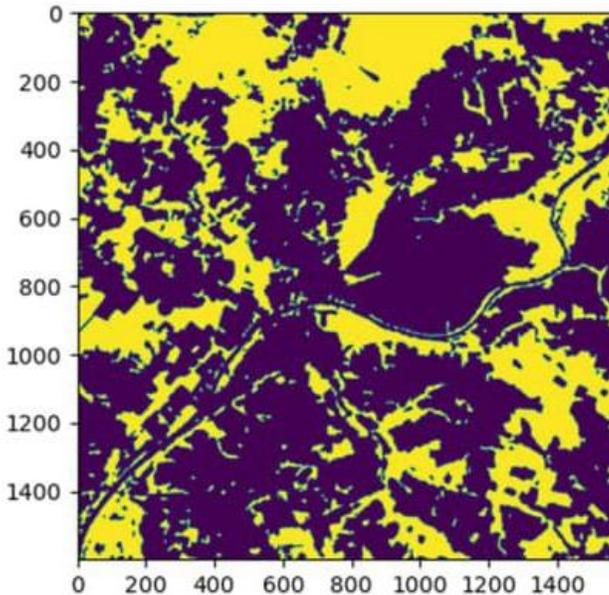
## La création de nouvelles covariables



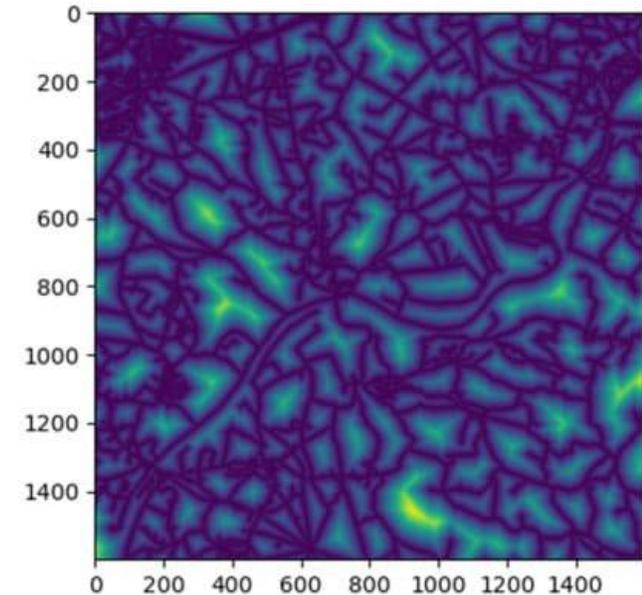
Les principales causes de début d'incendie sont souvent liées aux facteurs humains



A partir de certaines des données d'OpenStreetMap il est par exemple possible de calculer la distance d'un point à la route la plus proche.



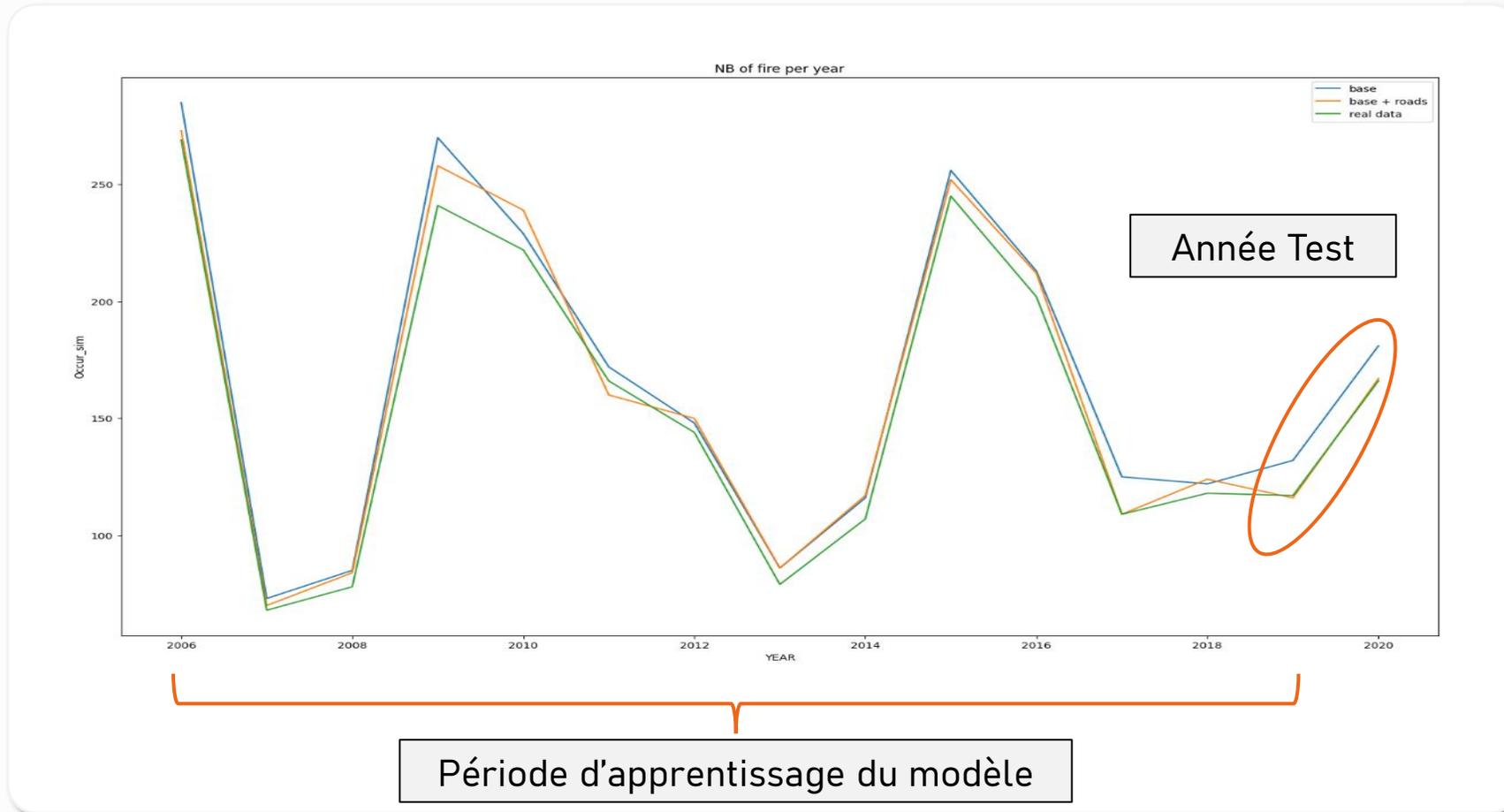
Zones boisées sur une zone



Distance de la forêt à la route la plus proche

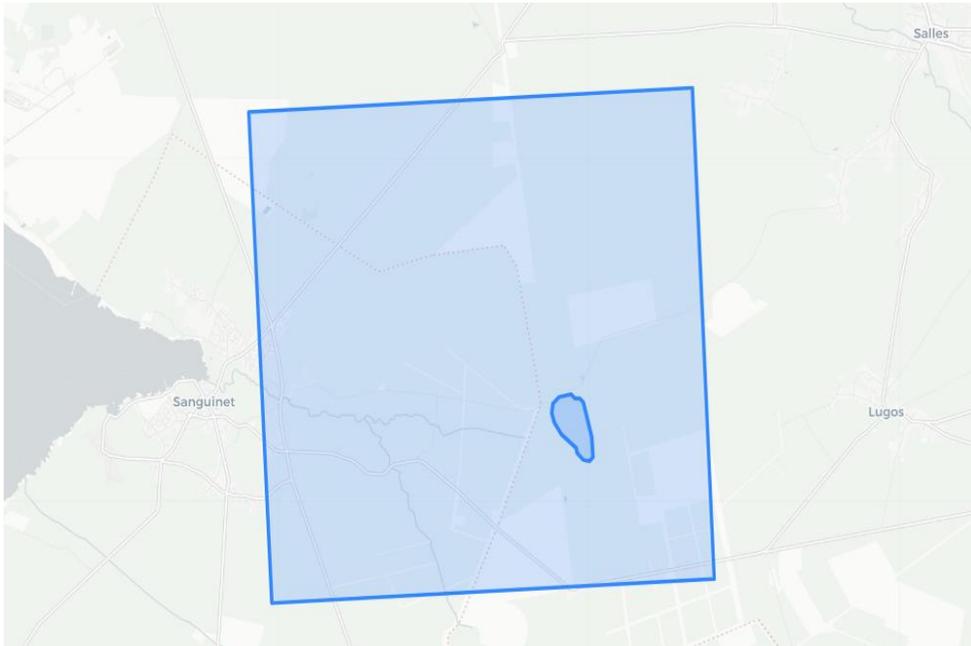
# NOS TRAVAUX EN COURS

## Comparaison des différents modèles



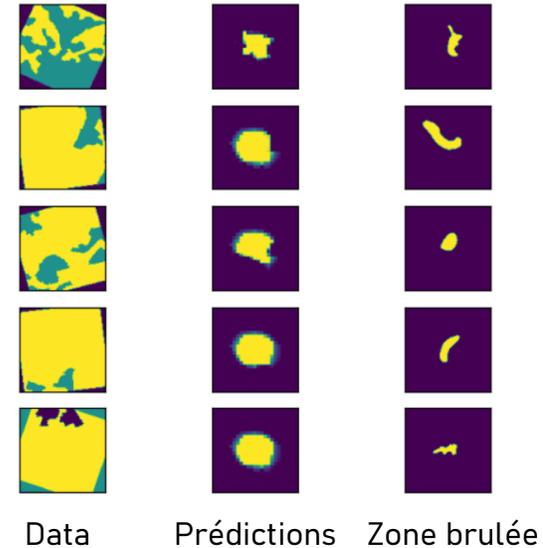
# NOS TRAVAUX EN COURS

## Répartition de la surface brûlée au sein d'une zone



Contour d'un feu de forêt à partir de données satellites au sein d'une zone d'étude

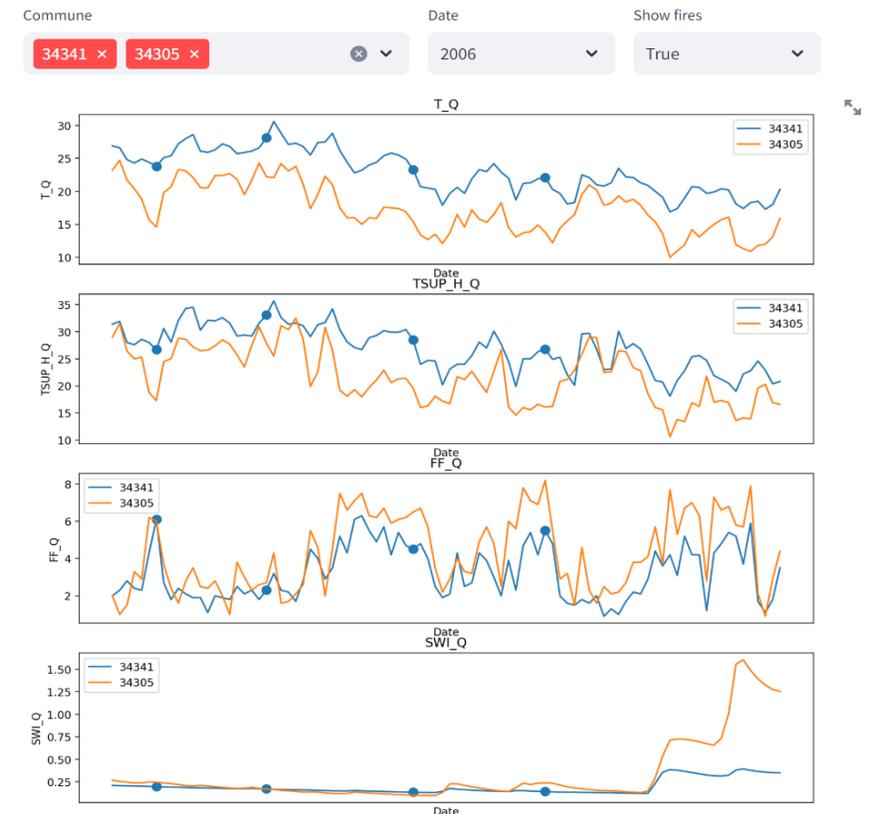
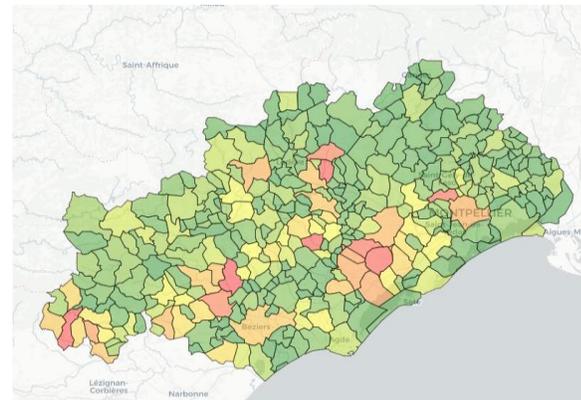
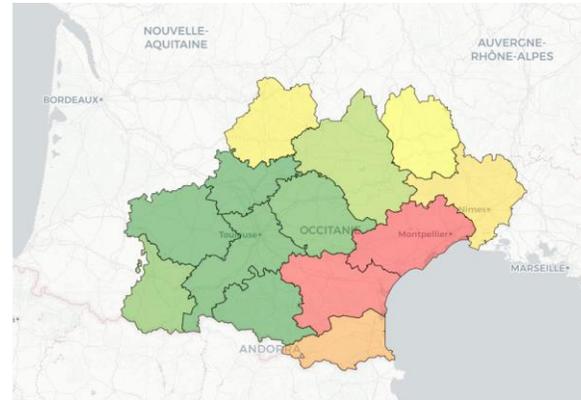
**Objectif** : connaissant les coordonnées du carré 8kmx8km, sachant qu'il y a un feu avec une aire brûlée S (résultat d'INLA), prédire la forme de la zone brûlée pour une simulation.

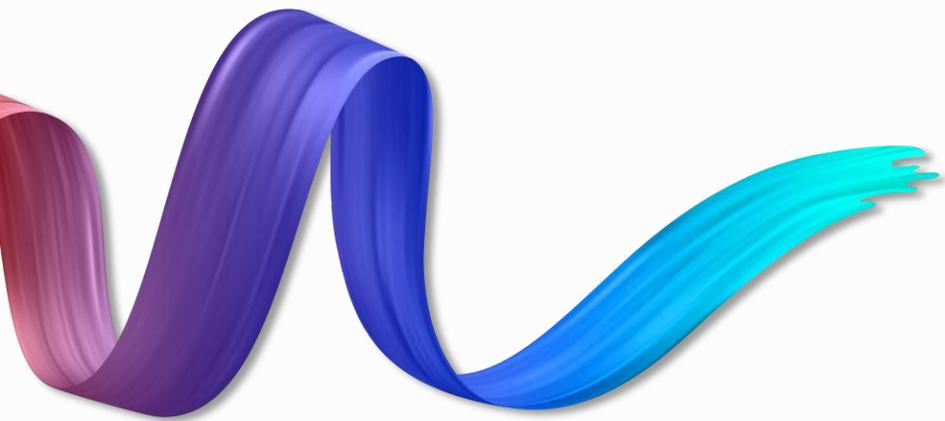


# NOS TRAVAUX EN COURS

## La création d'une application à destination des communes

- Création d'une application synthétisant diverses données autour du risque des feux de forêt et des données climatiques
- Permet notamment de comparer les données de diverses communes et périodes au cours du temps
- Future intégration d'un module de modélisation pour le risque des feux de forêt





5

Assurance et perspectives



### Forêts

- > Assurance dommage
- > Responsabilité civile.

- > Reboisement
- > Perte de revenus

- > >75% de forêts privées
- > 5% des propriétaires assurés

- > Taille
- > Type et âge de la végétation
- > Présence de points d'eau, d'infrastructures
- > Localisation

Garanties

Options

Assurés

Variables clés

- > Incendie et explosion (logement uniquement)

- > Relogement
- > Perte de revenus (pro)
- > Terrain

- > Obligatoire pour les locataires
- > Facultative propriétaires occupants

- > Débroussaillage
- > PPRIF
- > Prévention
- > Localisation

Habitation

La politique de **défense de la forêt contre les incendies** (DFCI) du ministère de l'Agriculture et l'Alimentation repose sur 4 grands axes :



- 01** **Prévoir** le risque et traiter les causes (météo, réseau hydrique, recherche des causes...).
- 02** **Surveiller les forêts** pour détecter les départs de feux et intervenir rapidement (patrouilles, guet...).
- 03** **Équiper, aménager et entretenir l'espace rural**, dont l'espace forestier (coupures de combustibles, débroussaillage, équipements de surveillance et d'intervention, signalisation, cartographie...).
- 04** **Informers le public** et former les professionnels (débroussaillage des jardins, préparation et aménagement des habitations...).

- > *Les plans de prévention des risques Incendie de forêt (PPRIF) visent à éviter des implantations étant à l'origine de départs de feu et difficiles à protéger en cas d'incendie.*
- > *A ce jour près de 200 PPRIF ont été approuvés (45 % en PACA, 23 % en Occitanie, 22 % en Aquitaine et 10 % ailleurs).*

### Amélioration des indicateurs

L'ouverture au public des données de météo France, permet d'envisager l'adaptation ou la création d'indices à différentes échelles spatiales.

### Développement de l'aspect économique

La prise en compte des pertes dans la modélisation, permettrait l'intégration de données sur les sinistres permettant d'enrichir les perspectives d'adaptation aux modèles assurantiels.

### Création de nouvelles covariables

L'intégration de nouvelles données permettrait de capter des mesures de prévention, des facteurs plus dynamiques comme les mouvements de population, ou plus généralement l'interaction avec les facteurs humains.

### Exploration de nouveaux modèles

Possibilité de s'inspirer de ce qui se fait dans le domaine sismique ou de la contagion comme pour le risque Cyber et d'appliquer par exemple les processus de Hawkes.