



**HAL**  
open science

## Le risque lié aux incendies de forêt : contexte et contribution de l'INRA

Eric Rigolot, François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Nicolas Martin-StPaul,  
Julien Ruffault

### ► To cite this version:

Eric Rigolot, François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Nicolas Martin-StPaul, Julien Ruffault. Le risque lié aux incendies de forêt : contexte et contribution de l'INRA. Réunion de la section forêt-bois, Académie d'Agriculture de France (AAF). FRA., Nov 2019, Paris, France. pp.35. hal-02789051

**HAL Id: hal-02789051**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02789051>**

Submitted on 5 Jun 2020

**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.



# Le risque lié aux incendies de forêt

## Contexte et contribution de l'INRA

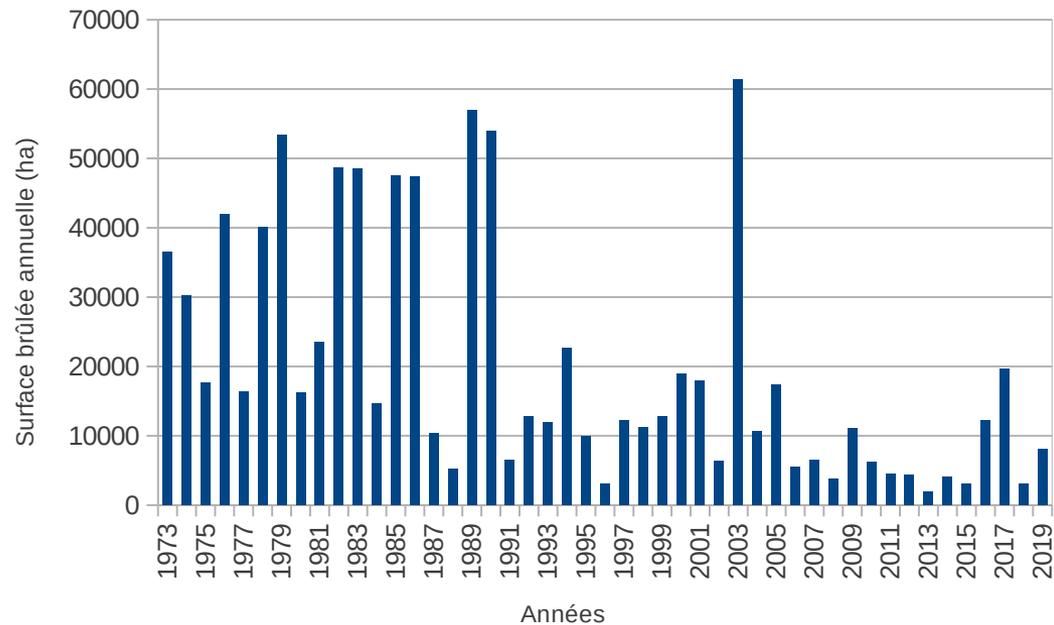
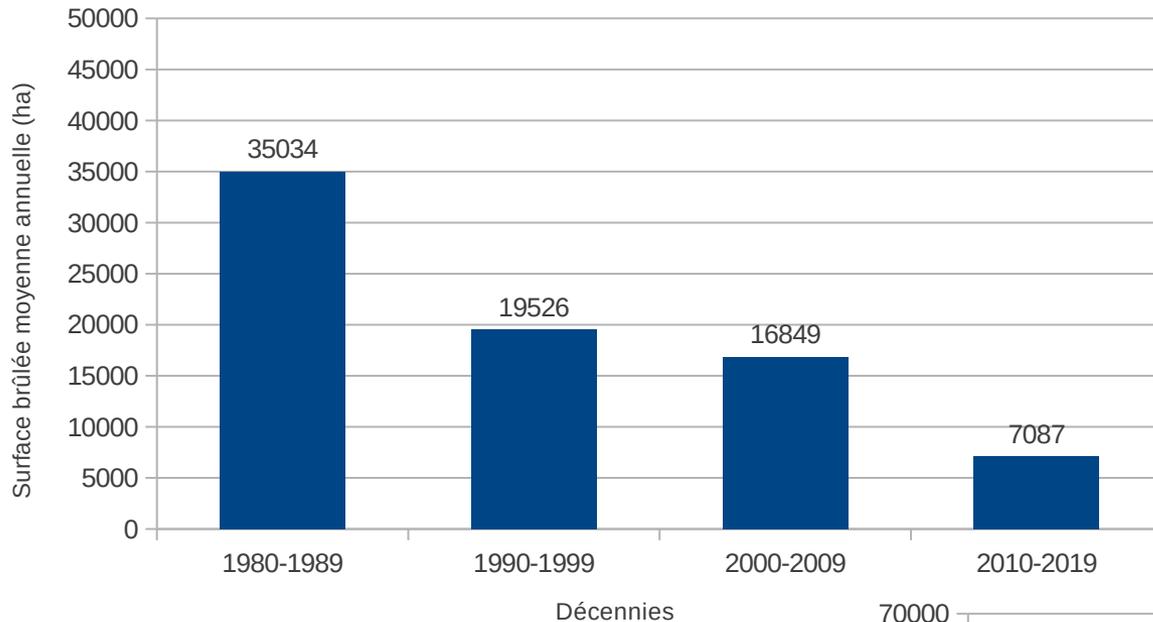
Eric Rigolot, Jean-Luc Dupuy, Nicolas Martin, François Pimont,  
Julien Ruffault



INRA, Unité de recherche  
Écologie des Forêts Méditerranéennes, Avignon

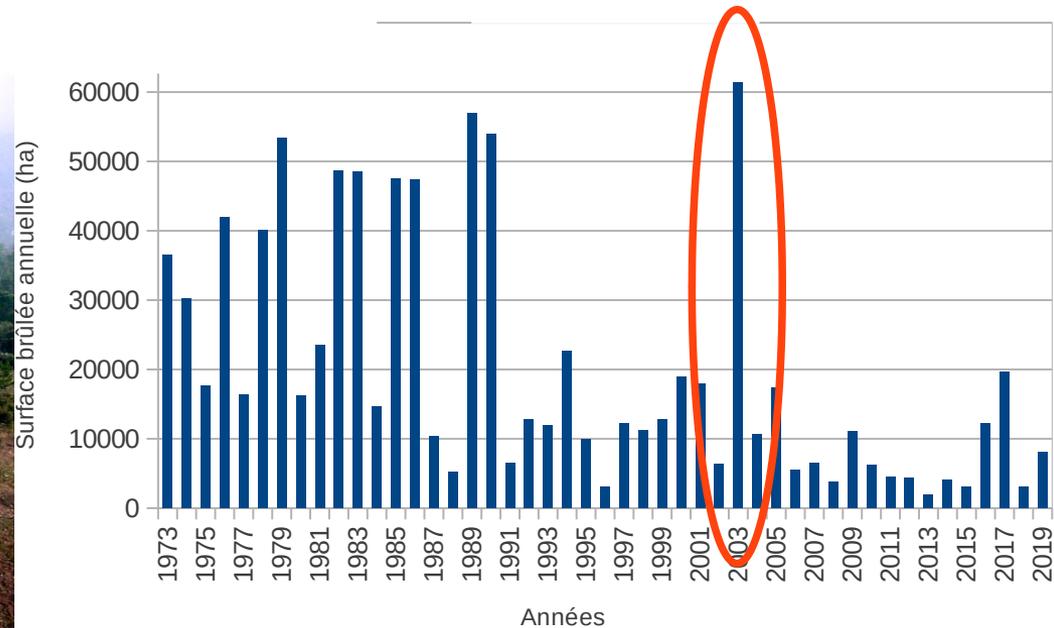
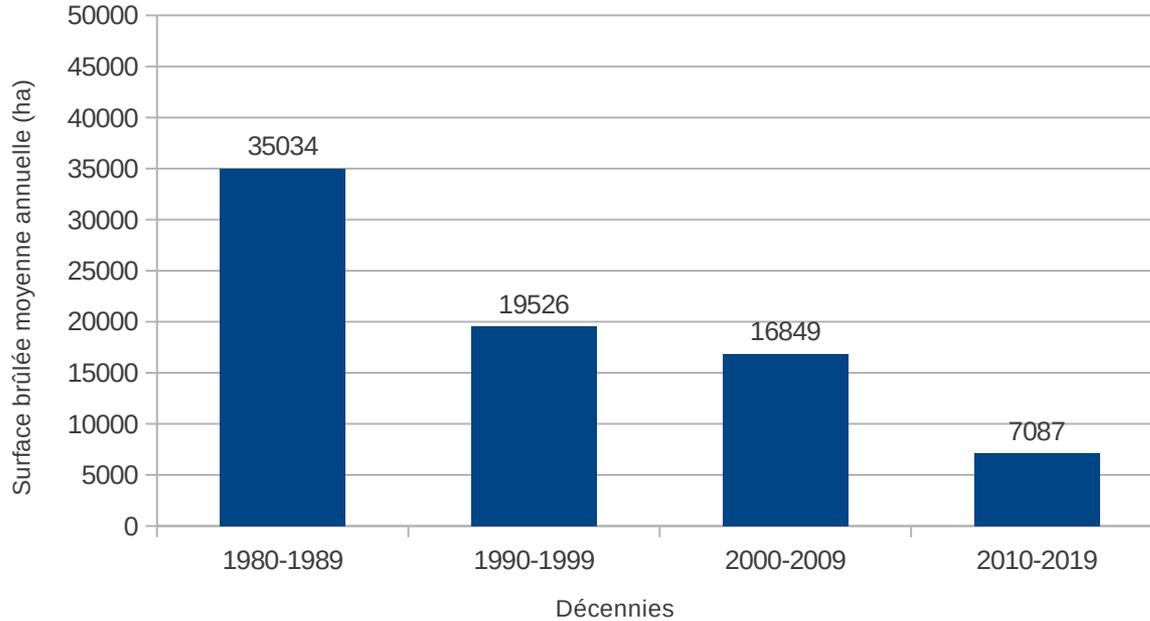
# Les feux de forêt en France

## Un risque sous contrôle ?



# Les feux de forêt en France

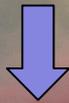
## Un risque sous contrôle ?



# Les limites du système

**En situation normale,**  
les parades en place pour atténuer le risque feux de forêt  
jouent efficacement leur rôle.

Conditions  
météorologiques  
peu sévères



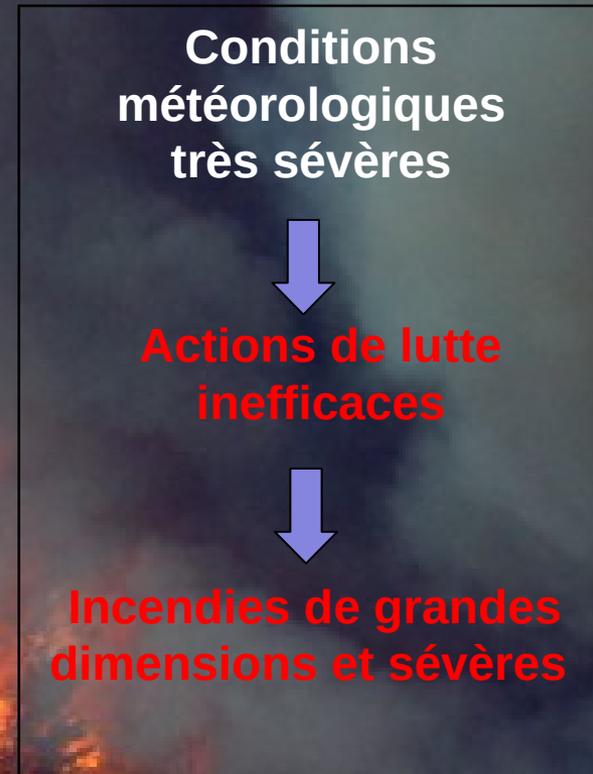
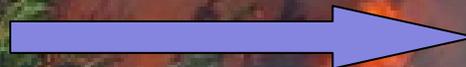
Actions de lutte  
efficaces



Petits incendies

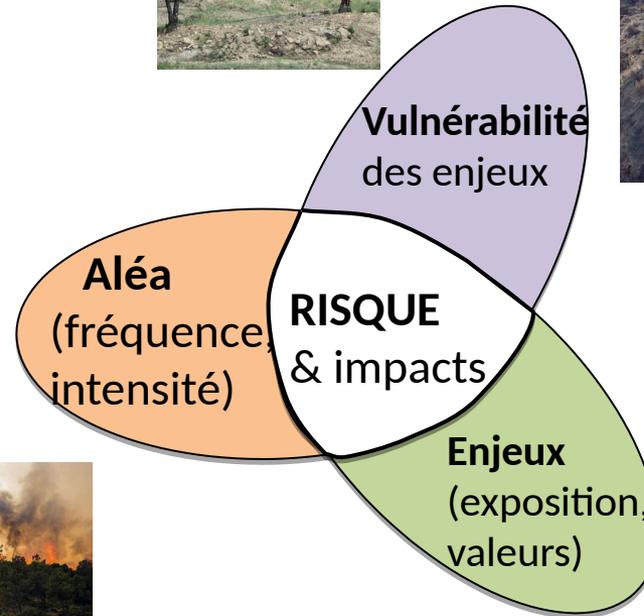
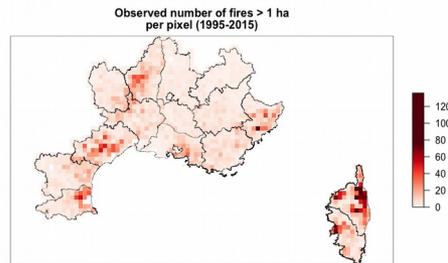


# Les limites du système



# Le risque d'incendie et les enjeux de son évaluation

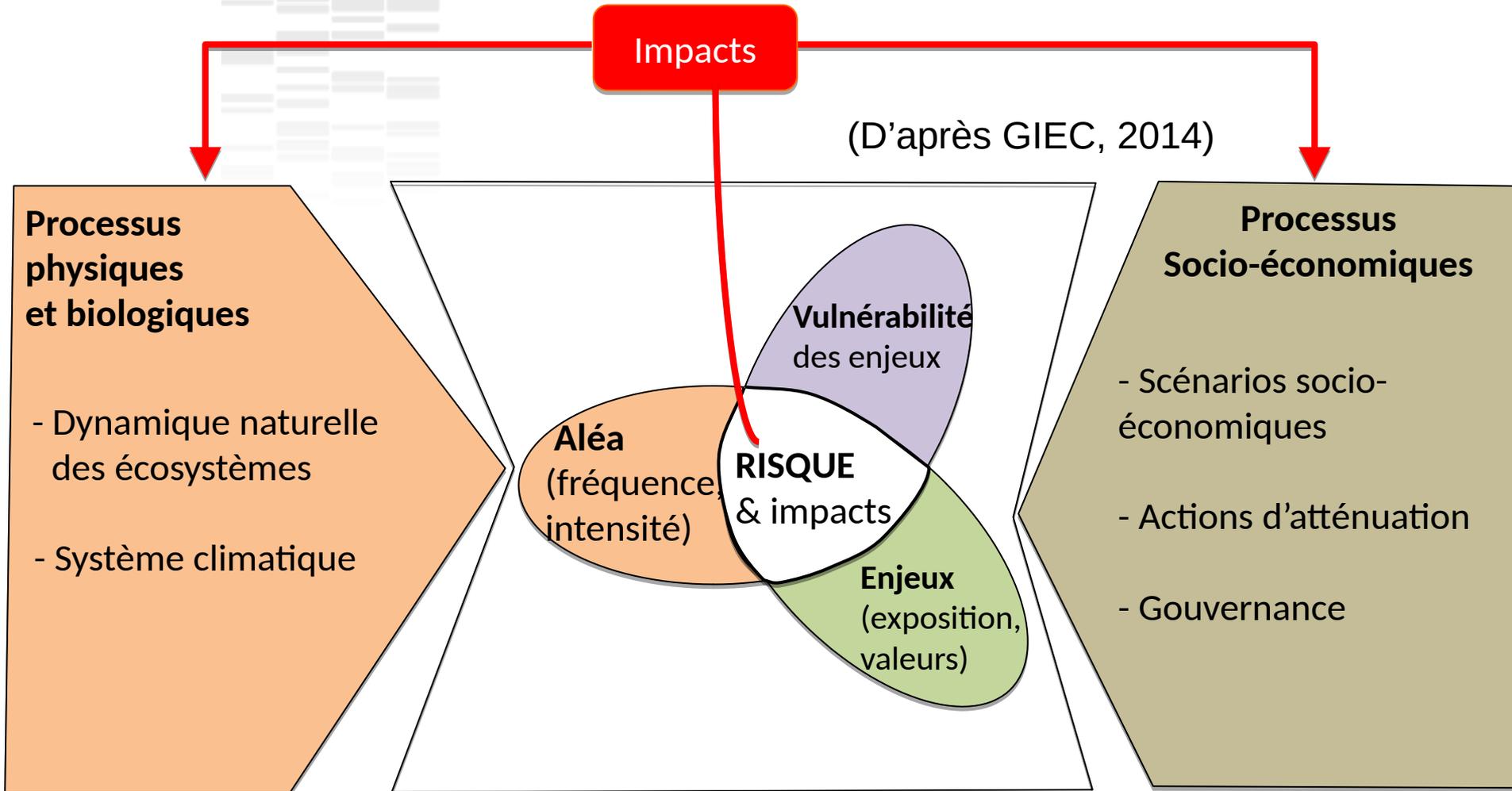
(D'après GIEC, 2014)



## ❖ Objectifs opérationnels : anticiper et réduire le risque

- Prédiction du danger saisonnier
- Cartes d'aléa structurel
- Ouvrages DFCI, gestion du combustible
- Aménagement du territoire, normes de construction

# Le risque d'incendie dans un cadre global



Introduction espèces à croissance rapide  
Augmentation du puits de C forestier  
...

# Le risque d'incendie et son évolution

## 1) Déprise rurale et sous-exploitation des forêts

### Processus physiques et biologiques

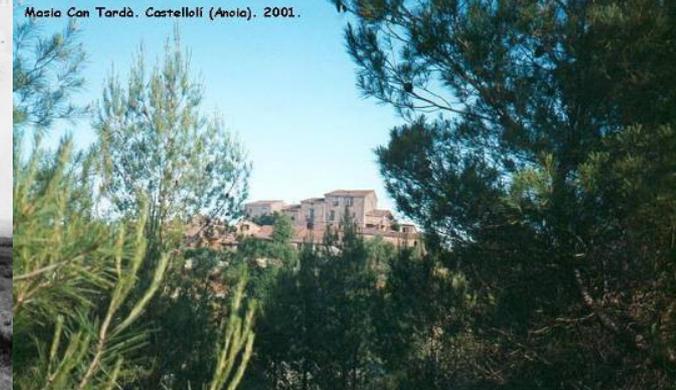
Dynamique naturelle des écosystèmes

- Augmentation du taux de boisement
- Augmentation du Stock (biomasse)
- Évolution structure et composition

1910



1991



# Le risque d'incendie et son évolution

## 2) Changement climatique : évolution du risque



- ❖ IFM = danger d'incendie (base météorologique)
- ❖ Le danger d'incendie a augmenté sur la période récente [Fréjaville and Curt, 2015]
- ❖ ... et devrait s'accroître encore dans les prochaines décennies

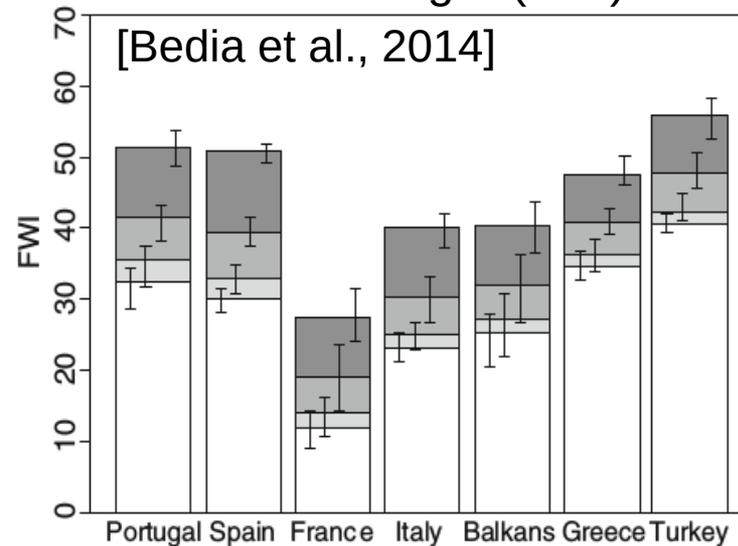
### Processus physiques et biologiques

#### Système climatique

- Variabilité naturelle du climat
- Changement climatique
  - Événements extrêmes
  - Augmentation du danger
  - Extension géographique du danger

### Indice de danger (IFM)

[Bedia et al., 2014]



- 2071-2100
- 2041-2070
- 2011-2040
- 1971-2000
- ⊢ Uncertainty

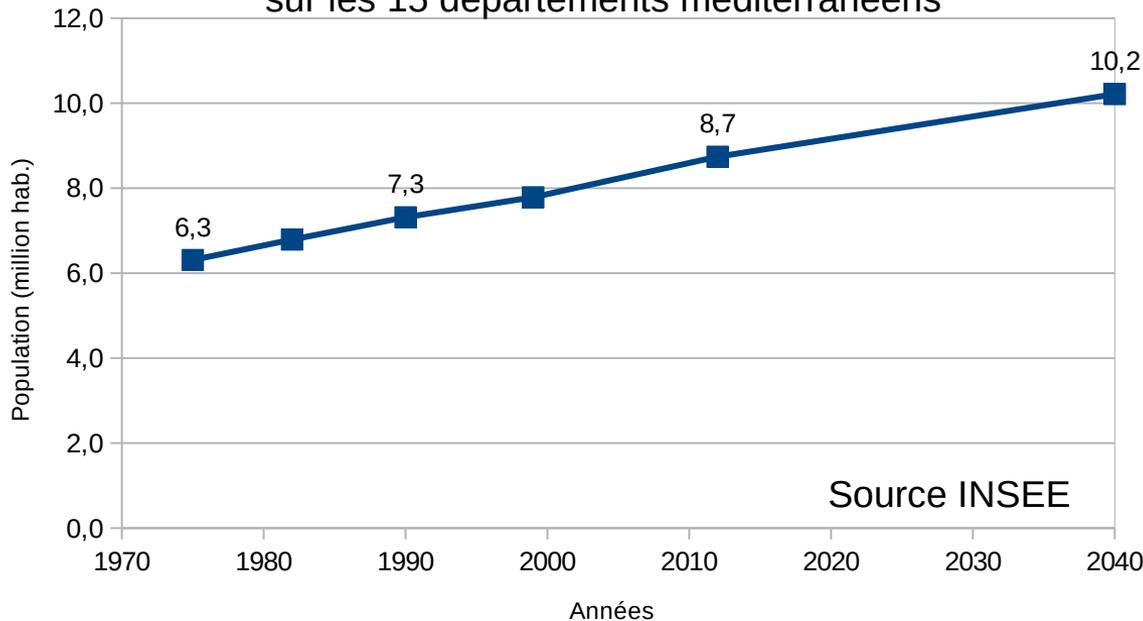
| Scénario A1B

# Le risque d'incendie et son évolution

## 3) Développement démographique et pression urbaine



Evolution passée et projection démographiques sur les 15 départements méditerranéens



**Progression de la population 2007 – 2040 (Insee) :**

**LR : + 28,5%**

**PACA : + 14,9%**

**=> 500 000 constructions en zone d'aléa fort (ONF, 2008)**

### Scenarios socio-économiques

#### Actions d'atténuation

- Atténuation de la vulnérabilité
  - ex. OLD
- Atténuation de l'exposition des enjeux
  - ex. Maîtrise de l'étalement urbain

#### Gouvernance

- Politique d'urbanisme
- Politique d'aménagement rural

## • Portugal : 15 octobre 2017

### ❖ en 24 heures

- 220 000 ha brûlés
- 900 habitations principales touchées
- 45 victimes et des centaines de blessés

Credit image : Roscomos

## 2018, Village de Mati en Grèce

- ❖ Une centaine de victimes lors du même incendie

## La menace des méga-feux

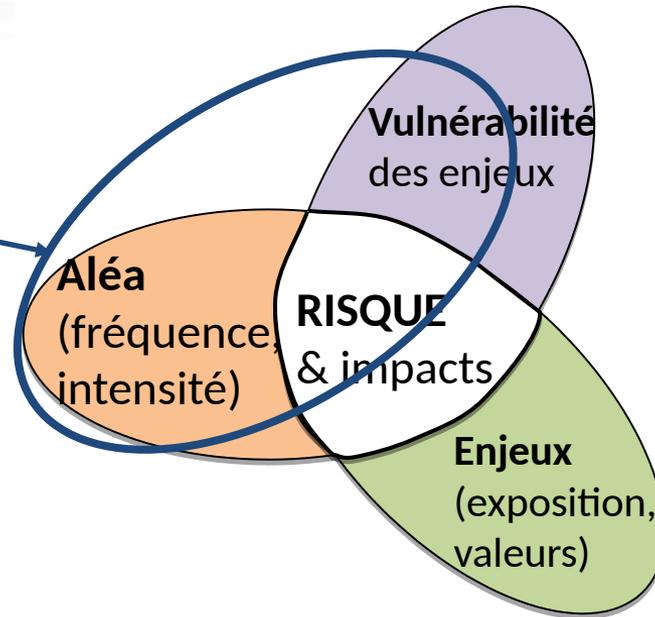
## • Californie, Camp Fire, novembre 2018

- ❖ 61 000 ha
- ❖ 85 victimes
- ❖ 14 000 résidences détruites

## L'incendie de Rognac (2700 ha) 10 août 2016

# Les recherches de l'INRA sur l'évaluation du risque d'incendie

Les recherches  
de l'INRA



## Plan

1. Évaluation du risque aux échelles locales : approche physique
2. Évaluation du danger aux échelles régionales : approche empirique

# Les recherches de l'INRA sur l'évaluation du risque d'incendie

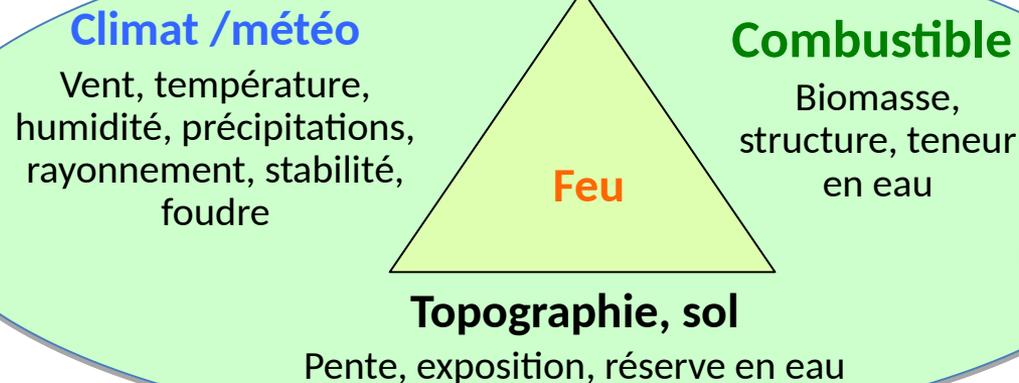
## ❖ Questions

A l'échelle (locale) d'un événement de feu :

- quels sont les mécanismes d'ignition, de propagation et d'extinction ?
- comment les facteurs biophysiques interviennent ? quels effets quantitatifs ?

A l'échelle (régionale) d'une distribution de feux :

- quelles sont les caractéristiques du régime des feux ?
- quels en sont les facteurs déterminants ? Prédicibilité ?



# 1. Évaluation du risque aux échelles locales : approche physique

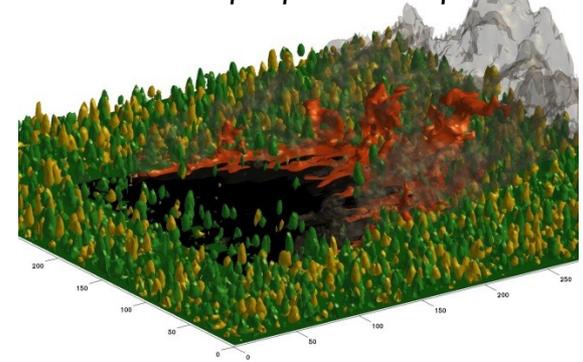


# Modélisation physique du feu : FIRETEC

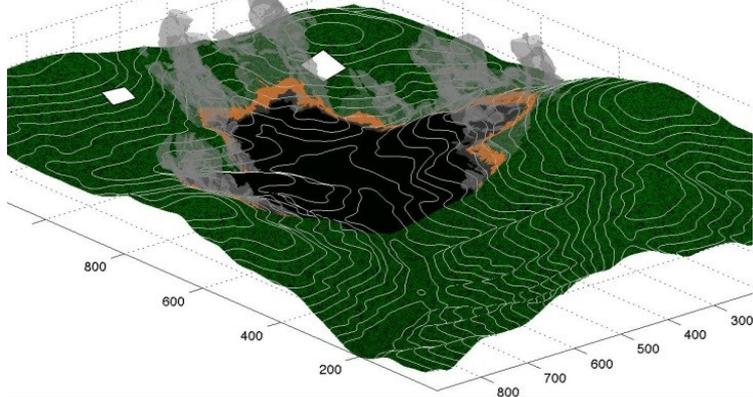
*Simulation en peuplement dépérissant*

## Modèle

- Couplage des processus physiques du feu aux processus de la dynamique atmosphérique
- Résolution numérique d'edp sur grille 3D
- Interactions feu-atmosphère-végétation-topographie



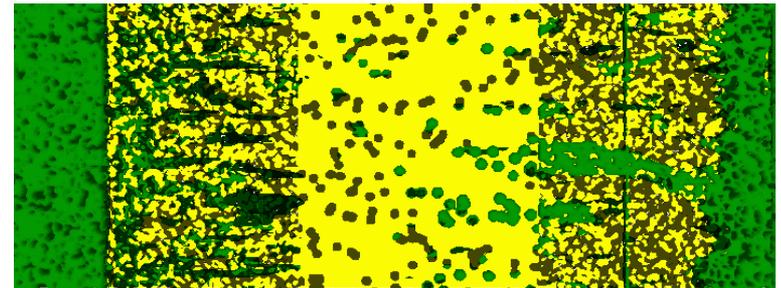
*Simulation sur paysage (les Adrets des Maures)*



## Conditions initiales et aux limites

- Atmosphère : profil empirique, ou champ 3D par pré-calcul du vent
- Topographie : carte altitudes
- Combustible : biomasse, surface exposée et teneur en eau, des éléments fins, distribuées en 3D

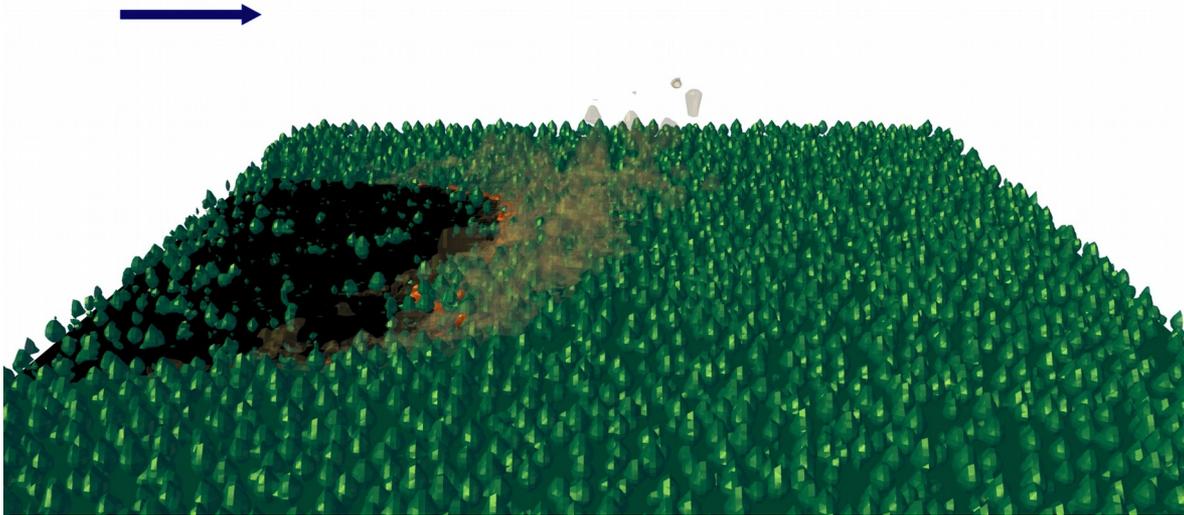
*Consommation des arbres en peuplement et sur éclaircie*



## Simulations

- Résolution spatiale : 2 m
- Simulations du peuplement au petit paysage (< 500 ha)
- Prédications : vitesse, puissance, flux, températures, ...

# Influence de l'état hydrique de la végétation Par simulation numérique

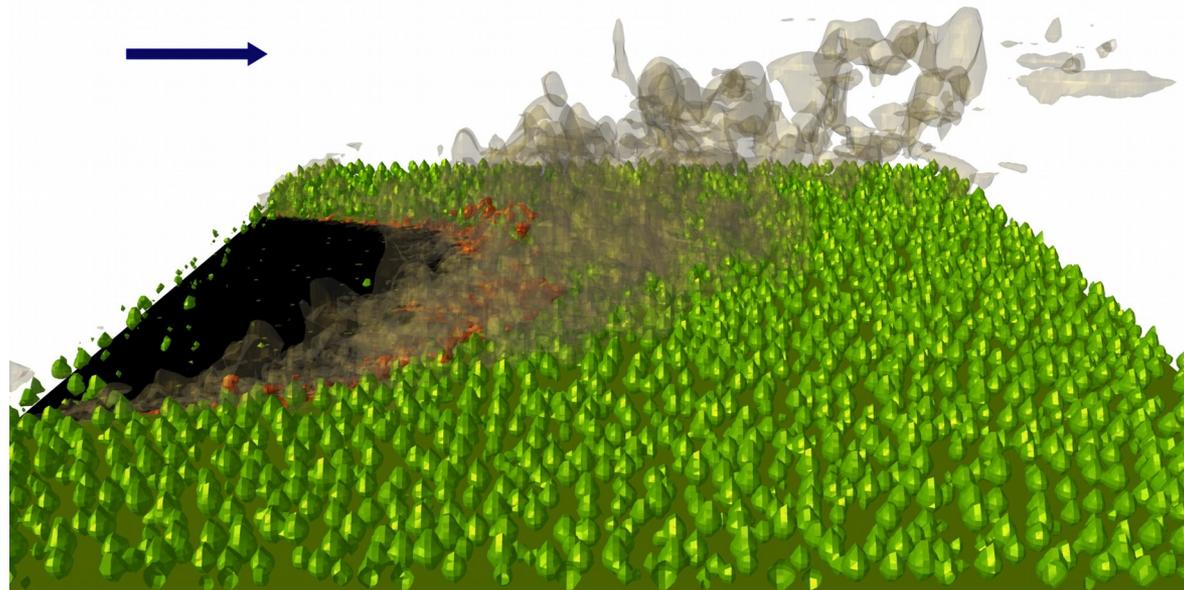


**Teneur en eau :**

Fin de printemps :

Pin d'Alep 120 %

Sous-bois 98 %



Fin d'été :

Pin d'Alep 90 %

Sous-bois 56 %

# FIRETEC : évaluations

## International Crown Fire Modelling Experiment

(Stocks et al. 2004, Can J For Res)

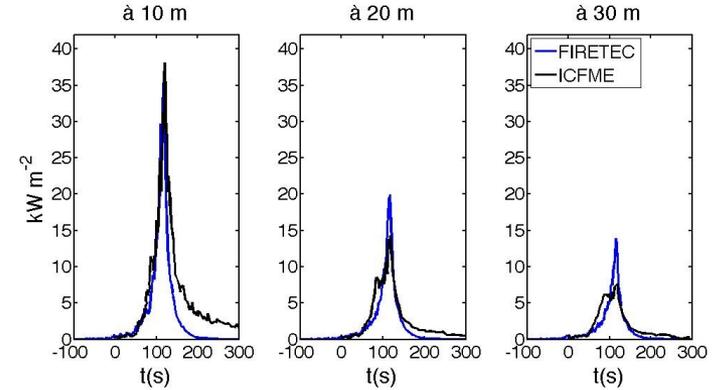


### Vitesses de feu

(m/s)	Plot 1	Plot 4	Plot 6	Plot 9
Vent	2.8	4.1	6	6.9
Vit .Exp	0.6	0.7	0.6	1.2
Vit. Firetec	0.7	0.7	0.8	1.1

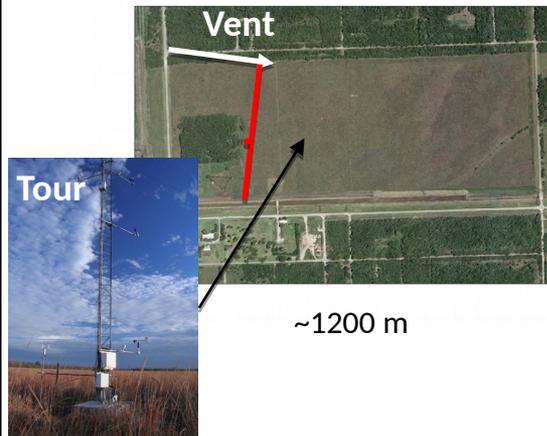
(Pimont et al. 2014, ICFR)

### Flux radiatifs observés et simulés

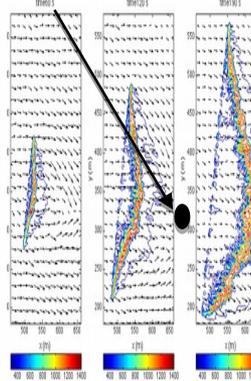


## Fireflux Experiment

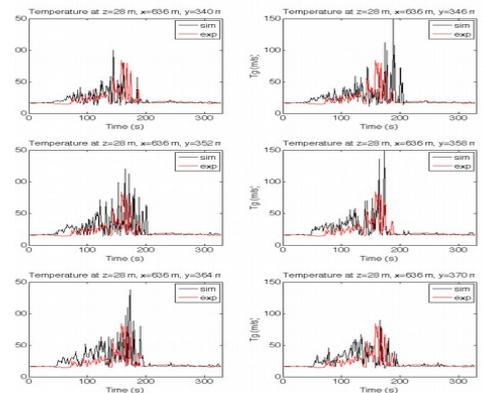
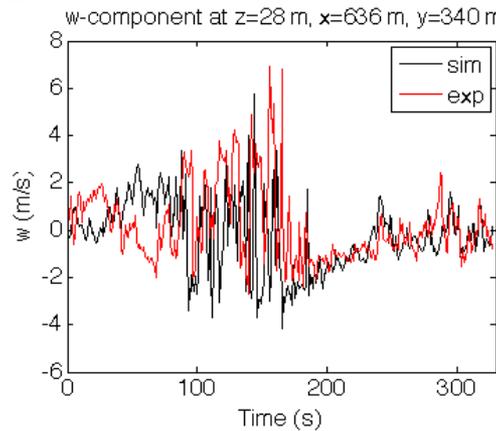
(Clements et al. 2007, BAMS)



### Tour



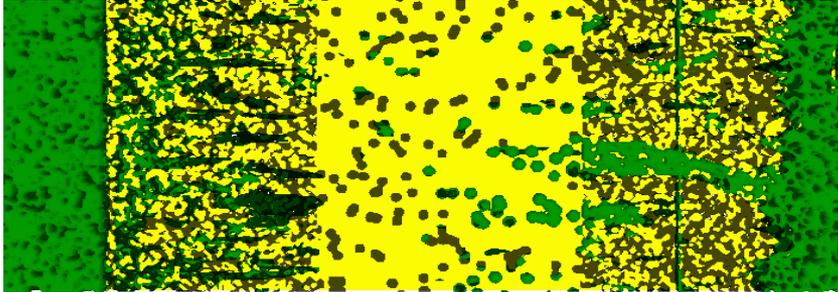
### Vitesse verticale et température dans le panache



(Dupuy et al. 2014 ICFR)

# FIRETEC : quelques applications

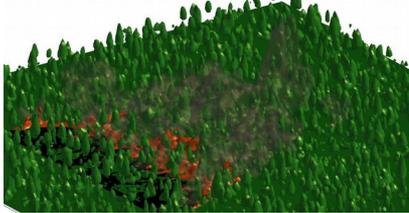
Consommation des arbres en peuplement et sur éclaircie



Pimont et al. 2011, AFS

Effet du dépérissement

Peuplement sain

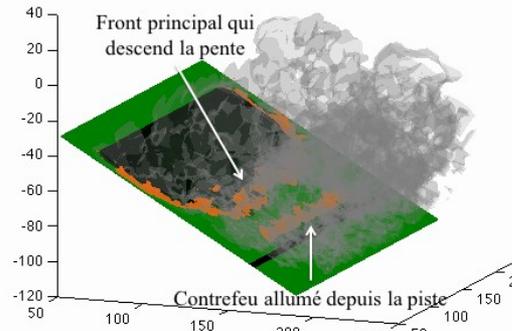


58% mortalité



Sieg et al. 2017, Fire Ecol.

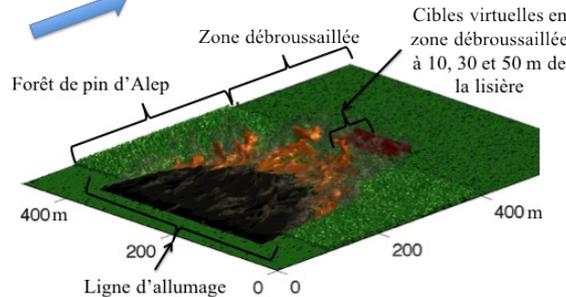
Simulation de contre-feu



Dupuy et al. 2011, IJWF

Effets du débroussaillage sur les flux (OLD)

Directions du vent et du feu



Pimont et al. 2014, ICFR

Impact de la fréquence de brûlage dirigé

Intensité de feu en fonction du nombre d'années après traitement



Communauté	1	2	3	4	Contr
Taillis pin/chêne	1500	2000	13100	13800	14800
Taillis épars	650	900	8100	9300	10500
Garrigue à chêne vert	350	1600	6400	6400	7700
Garrigue à chêne kermès	900	3600	5300	5400	6300
Garrigue à romarin	1500	3300	5800	5900	6000
Prairie	900	900	900	900	900

Cassagne et al. 2010, Ecol. Mod.

Radiant heat flux (kW m<sup>-2</sup>) Gas temperature (°C)

d=10 m d=30 m d=50 m d=10 m d=30 m d=50 m

**Run 1**  
No slope  
Cleared fuel-break

25 (28) 8.6 (9.2) 5.5 (5.9) 287 (323) 105 (111) 71 (78)

**Run 2**  
30% slope  
Cleared fuel-break

31 (35) 12 (13.2) 8.4 (9.1) 329 (404) 110 (130) 59 (70)

**Run 3**  
No slope  
10 m-respaced trees

22 (26) 8.3 (8.8) 5.4 (5.9) 280 (336) 108 (120) 68 (75)



# Fuel Manager

## Modeling initial step

- **Plants:**
  - Detailed inventory
  - Observed distribution
  - Modelled distribution
- **LayerSets:**
  - Set of Observed Layers
  - Predefined understorey
  - Succession model

## Fire library

**3D fuels Scene**  
Plants, LayerSets

- Calculate fuel properties
- Visualization
- Apply fuel treatments
- Model fire behavior
- Model fire effects

**FIRETEC,  
WFDS**

**Simulate growth over time**  
Plant Dynamics  
Succession models

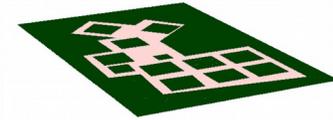
Pimont et al. 2016, EMS

# Applications

Modéliser le combustible (e.g. ICFME)



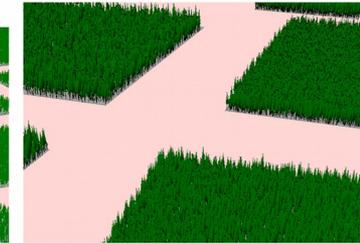
a)



b)

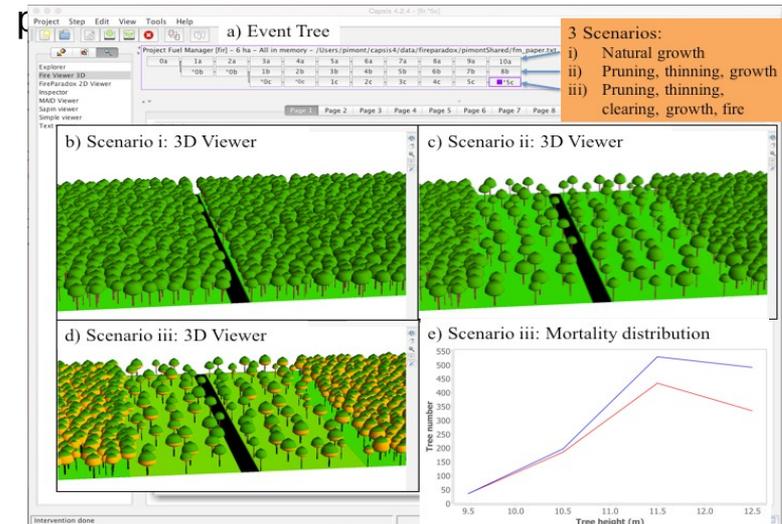


c)



d)

Simuler des scénarios (gestion et

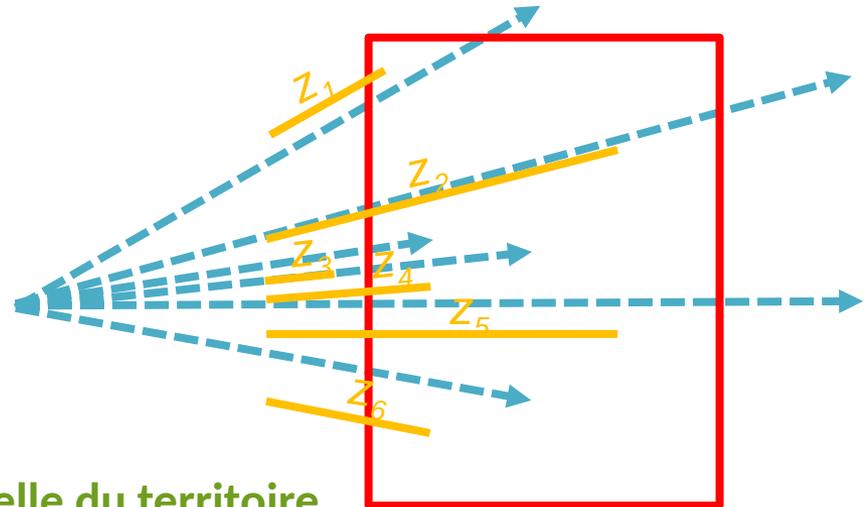


# Le LiDAR terrestre, un outil pour mesurer le combustible (et la surface foliaire)

Notre équipe développe des méthodes pour évaluer la **biomasse combustible et sa structure** à partir de scans LiDAR

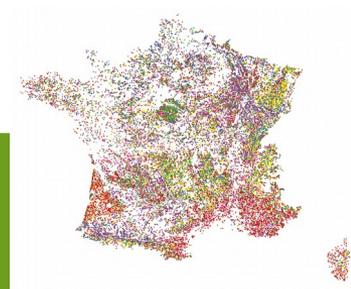
la probabilité des rayons d'être interceptés augmente avec la quantité (surface) des « éléments fins » locaux, donc les nuages de points 3D peuvent servir à mesurer la distribution du combustible sur des petites placettes

Pimont et al. 2015 RS, Pimont et al. 2018 RSE, 2019 RS + Thèse (Soma et al. 2018 RS)



## Prise en compte de la « structure » à l'échelle du territoire

- L'IGN procède à des scans LiDAR systématiques des placettes « Forêts » (4000 points « forêts » scannés depuis 2009) pour l'évaluation de la ressource forestière.



# Evaluation de la structure du combustible

Vidéo tirée du multi-scan de la parcelle témoin du dispositif de Font-Blanche  
(pin d'Alep/chêne vert)



**Thèse Maxime Soma**

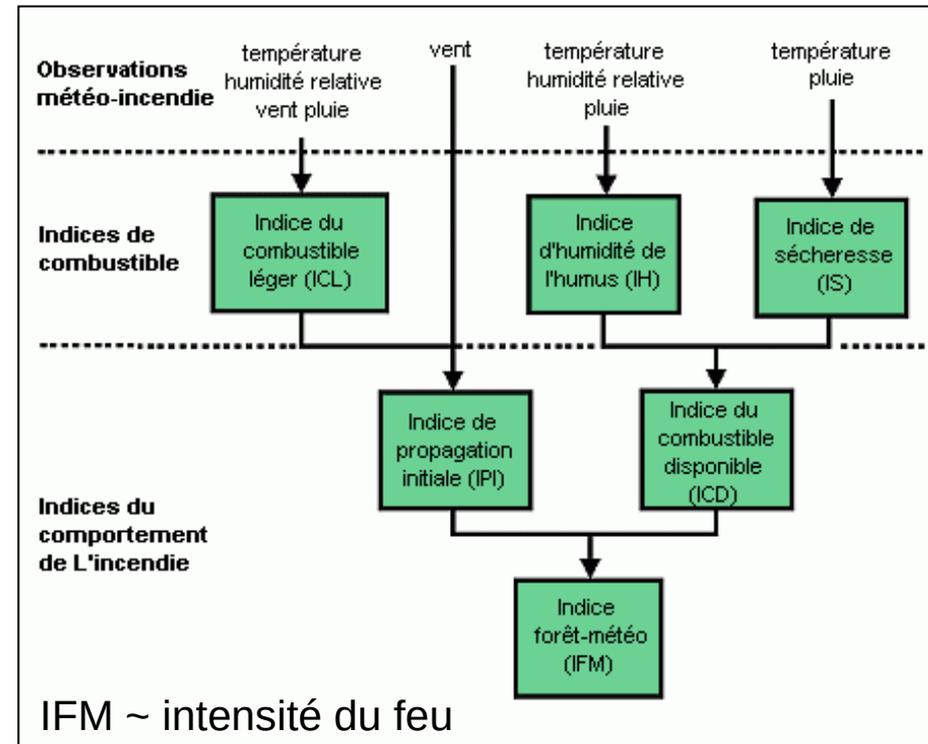
## 2. Évaluation du danger aux échelles régionales : approche empirique



# Le danger d'incendie

- Les indices de danger :
  - dépendent de la météo seule,
  - ne sont pas des observables
- Le niveau de danger doit traduire :
  - la difficulté à maîtriser l'incendie,
  - les impacts attendus du feu.
- L'activité des feux (nombre, surfaces) est la variable opérationnelle d'intérêt

## Indice Forêt Météo



## Questions

- L'IFM est utilisé dans la prévision saisonnière ou les projections à long terme :
  - est-il un bon indicateur de l'activité des feux ?
  - quelles sont les pistes d'amélioration pour la prévision du danger ?

# Extension de la zone à risque d'incendie en France

## Incertitudes sur le danger future associées aux projections climatiques

L'augmentation du danger dans le sud et à l'ouest est confirmée (eg Chatry et al 2010, Bedia et al 2014)

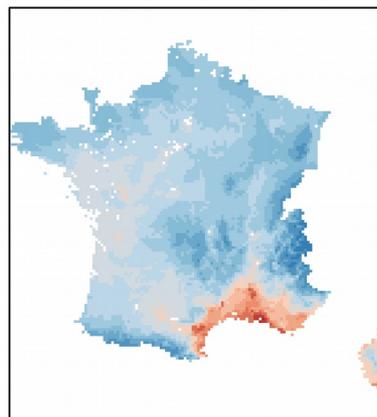
Cette augmentation est importante avec peu d'incertitude au sud, et très incertaine à l'ouest

Thèse d'Hélène Fargeon (2016-2019)

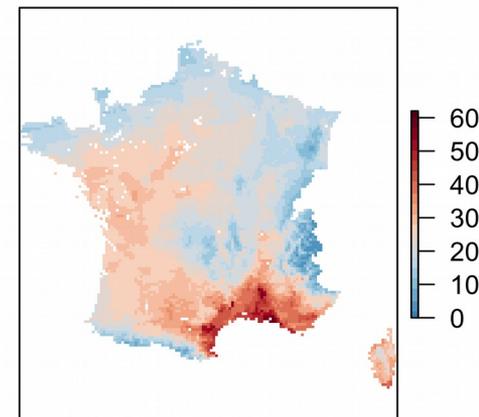
Fargeon et al. 2018, ICFFR  
Submitted to Climatic  
Change

5 models, rcp4.5 and 8.5  
90th percentile of FWI

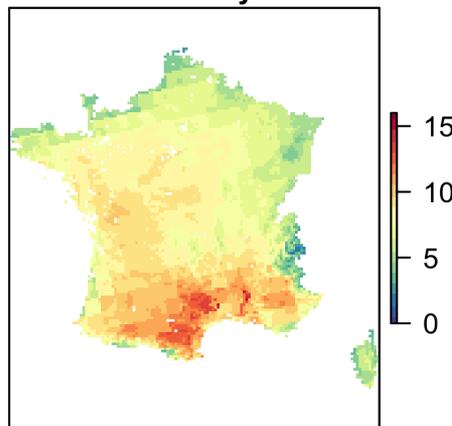
Multimodel mean  
1995-2015



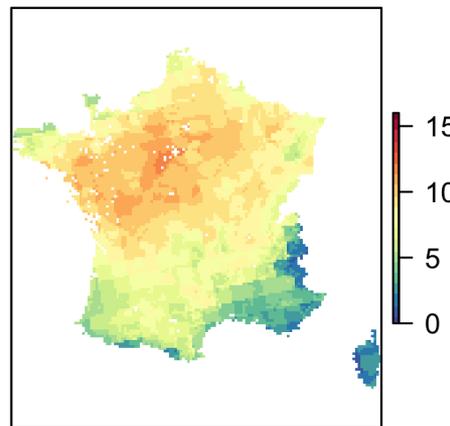
Multimodel mean rcp8.5  
2078-2098



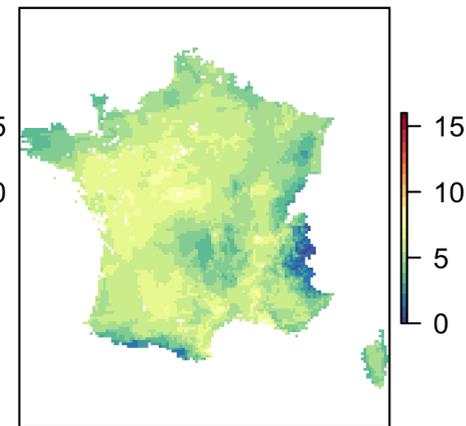
Multimodel mean rcp8.5  
Anomaly



Model uncertainty rcp8.5  
2078-2098

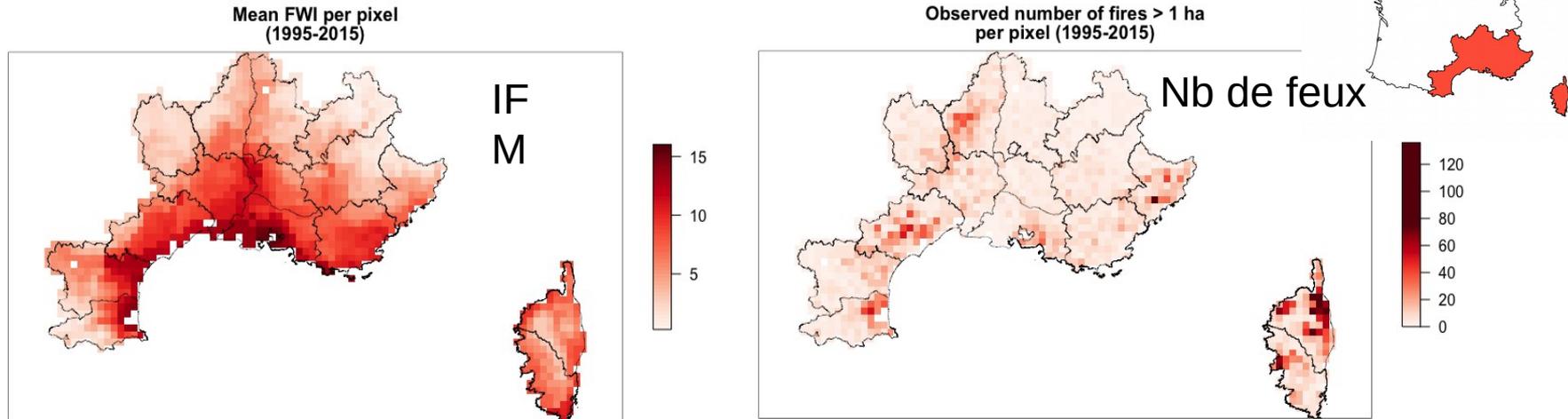


Annual variability  
1995-2015



# Développement d'un modèle d'occurrence des feux

Le climat (IFM ou FWI) n'explique pas seul l'activité des feux



Thèse d'Hélène Fargeon

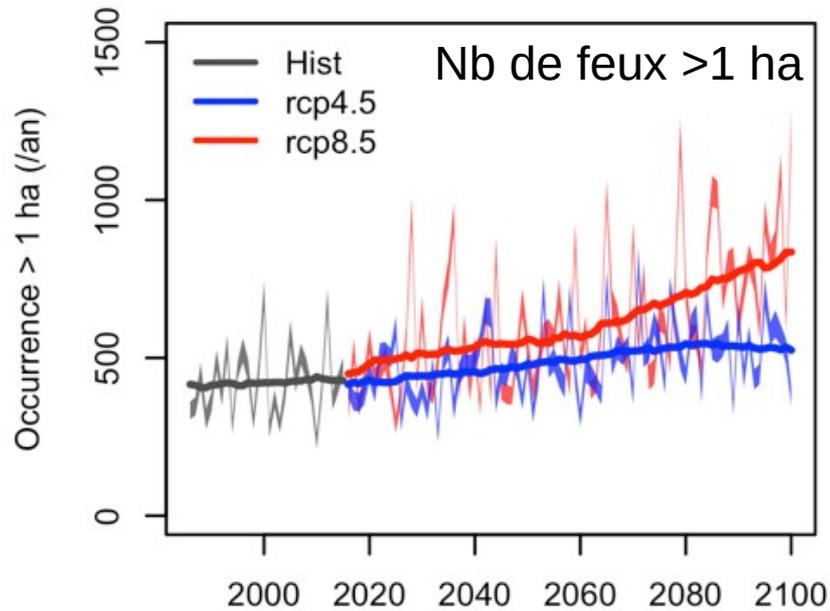
- **Objectif** : séparer l'effet du climat (IFM) des autres effets
- **Données** de la base Prométhée (extrait sur 1995-2015, feux > 1 ha)
- **Variables** explicatives: IFM journalier (SAFRAN), Surface forestière du pixel + effets aléatoires temporel (semaine de l'année) et spatial (pixel)

Ajustement par une **approche bayésienne** (collaboration avec INRA BioSP)

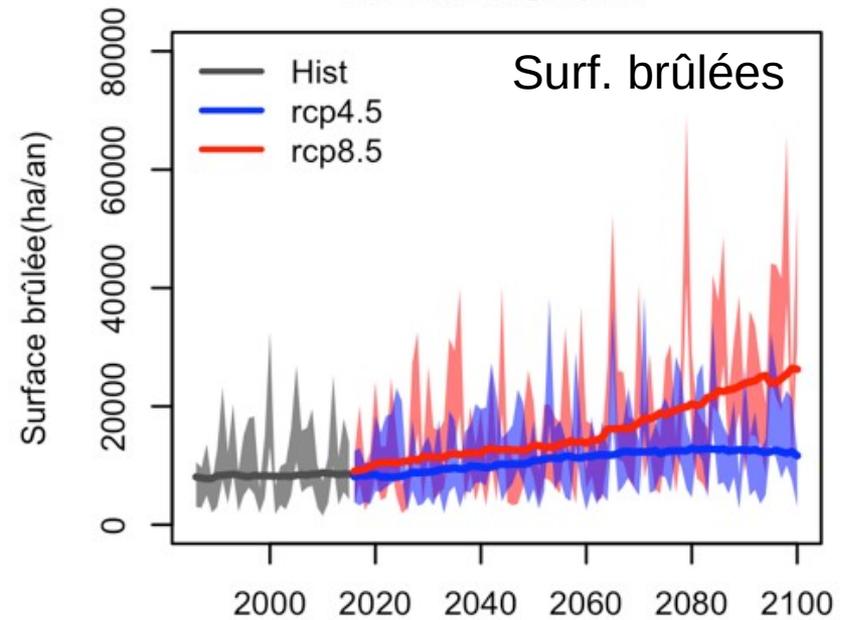
# Projections en nombre d'incendies et en surface brûlées



MPI REMO run1

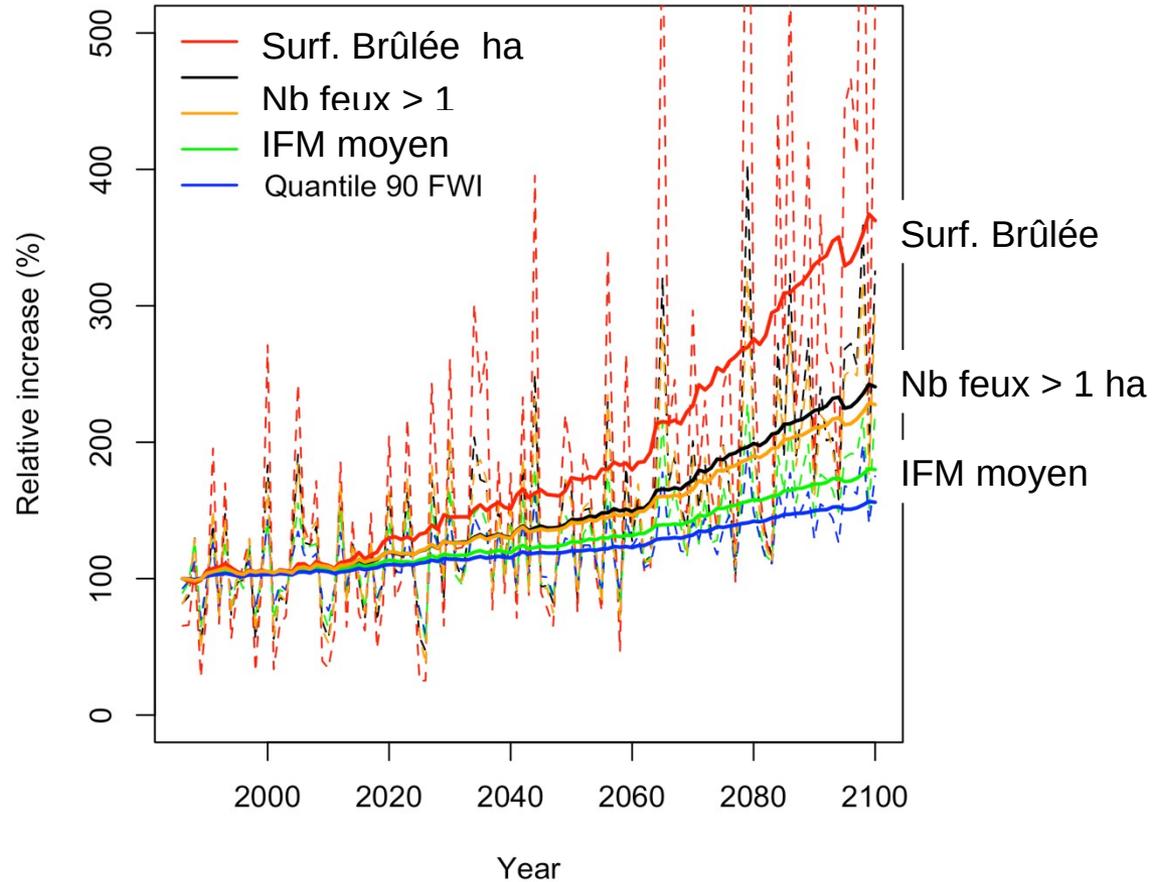


MPI REMO run1



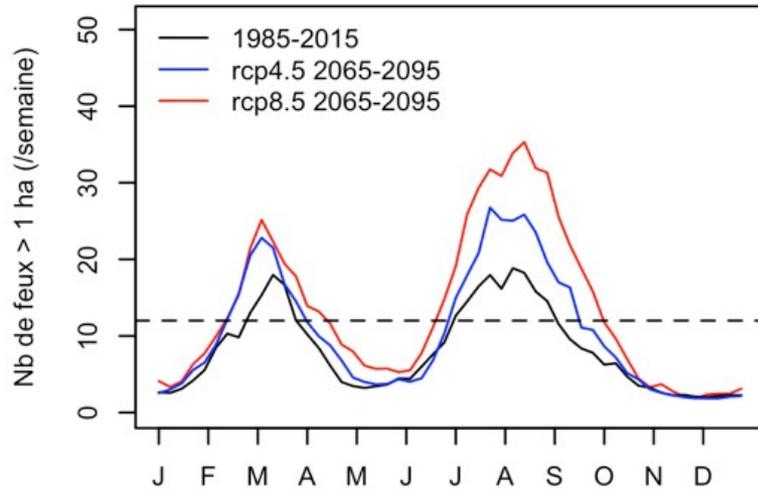
# Projections en nombre d'incendies et en surface brûlées

Relative increase of the different metrics

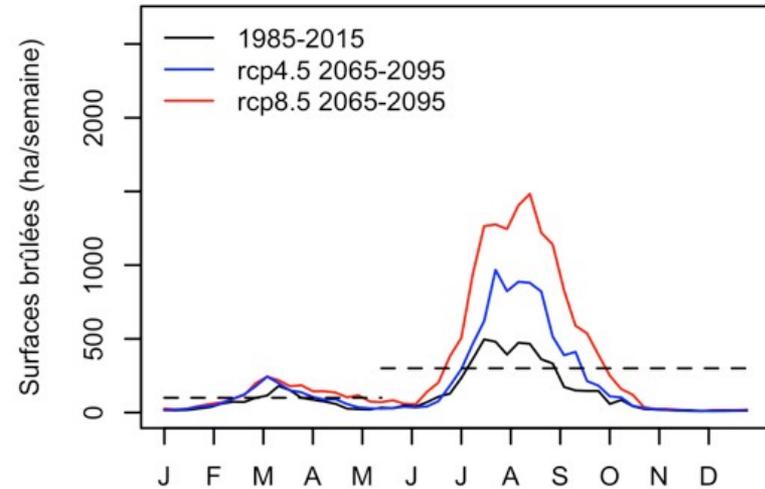


# Evolution saisonnière des nombres d'incendies et des surfaces brûlées

MPI REMO run1



MPI REMO run1

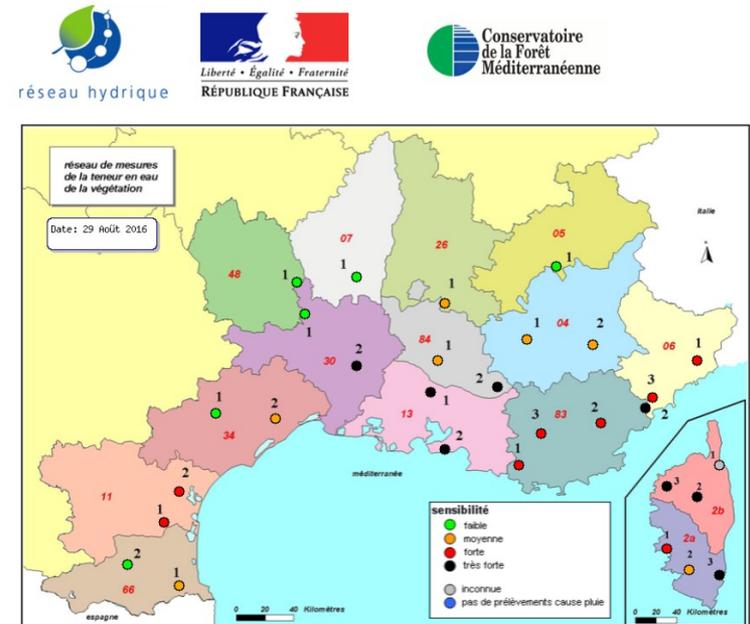


# Évaluation du danger : l'effet de la sécheresse est-il bien pris en compte ?

- L'IFM traduit l'impact de la sécheresse sur le combustible *mort*.
- L'Etat Major de Zone s'appuie :
  - sur l'IFM calculé par Météo-France
  - sur le *Réseau Hydrique*, i.e. le niveau de teneur en eau (TE) de la végétation

## **Le Réseau Hydrique**

18 ans de données sur 33 sites, 2 espèces arbustives par sites, entre 10 et 27 relevés par an : environ 20 000 données  
(Martin StPaul et al. 2018 AFS)

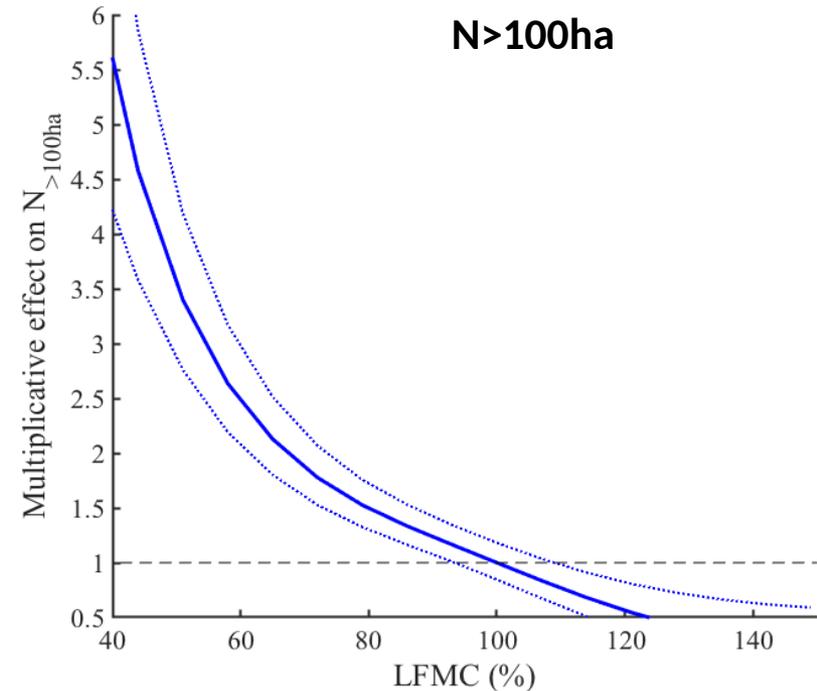
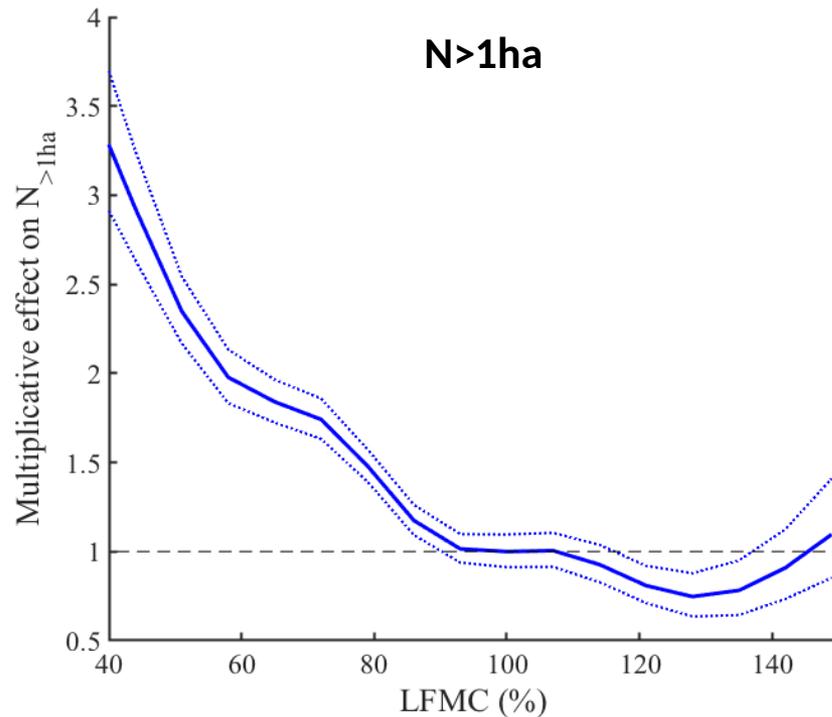


## Questions

- Quel est l'effet de la teneur en eau du “vivant” sur le feu ?
- Les indices de sécheresse rendent-ils compte des dynamiques de TE observées ?

# La teneur en eau du “vivant” : effet sur le nombre de feux

Modèle ajusté sur les données Prométhée au voisinage des points du Réseau Hydrique



=> Fort effet surtout pour TE < 90%

# Prédicibilité de la teneur en eau

Ruffault et al. 2018, AFM

- Données hebdomadaires de teneur en eau des arbustes (*Réseau hydrique*)

Comparées à

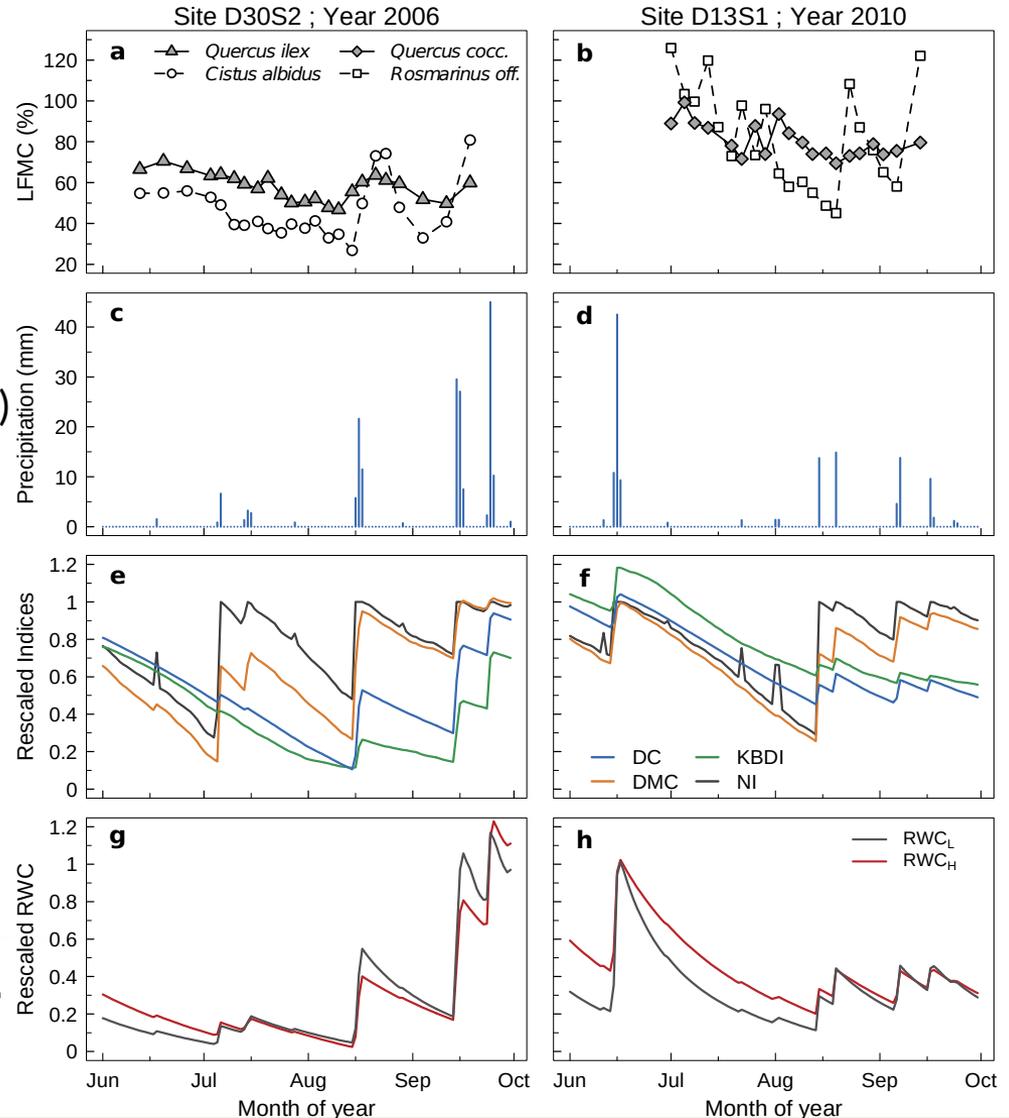
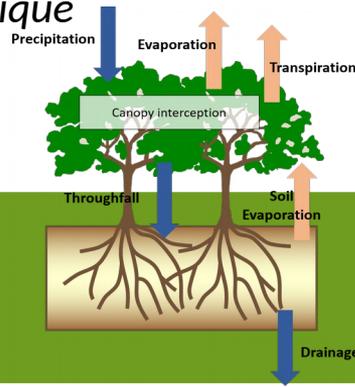
- Données climatiques journalières  
*Réanalyse SAFRAN 8x8 km (rain, T°, WS, G)*



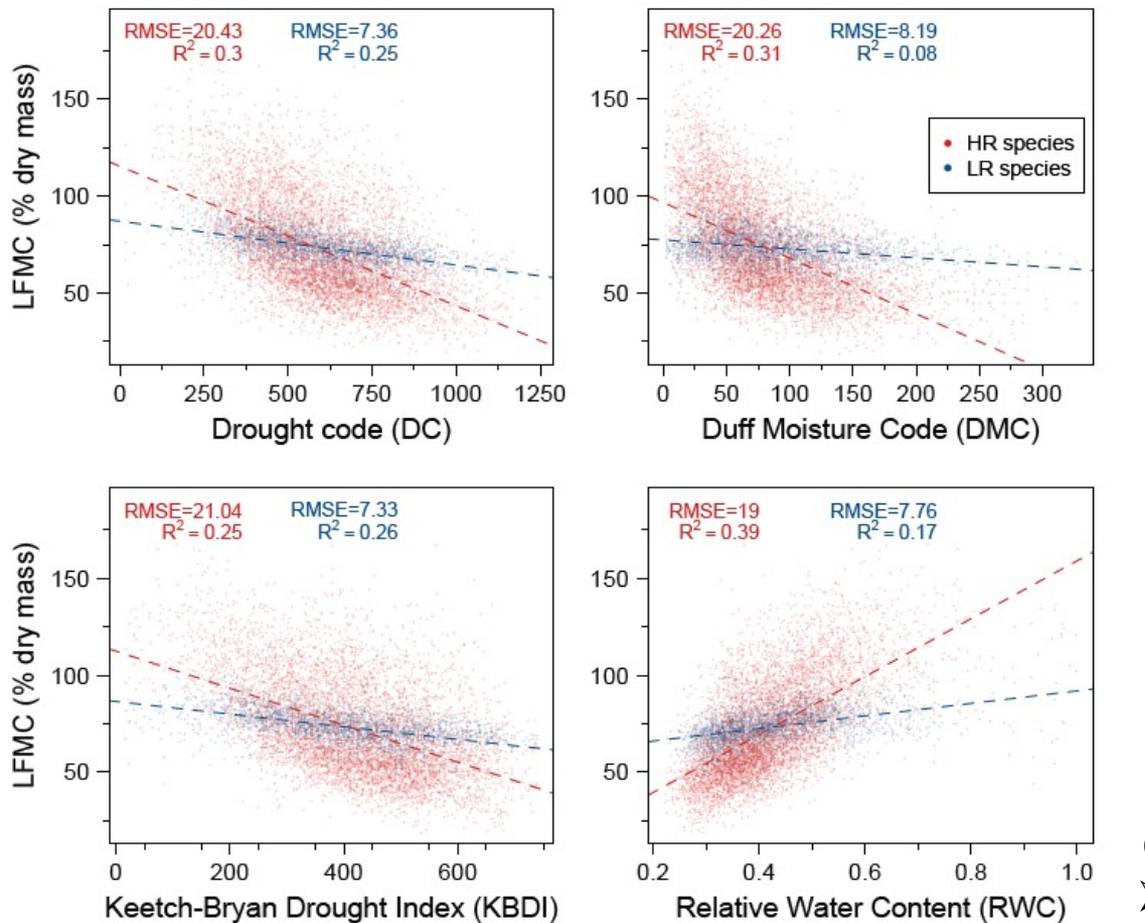
- Indices de sécheresse empiriques  
*Keetch Byram Drought Index, NI, Drought Code, Duff Moisture Content*



- Contenu en eau relatif du sol (RWC)**  
*Modèle de bilan hydrique*



# Prédicibilité de la teneur en eau



Corrélations de différents indices avec la teneur en eau des feuilles vivantes (LFMC)

Performance limitée des indices empiriques, variable d'un site/espèce à l'autre

(Plus de détails in **Ruffault et al. 2018**, AFM pour les différences entre sites/espèces)

## Hypothèses

Différences entre sites: *RU sol*, *LAI*

Différences entre espèces:

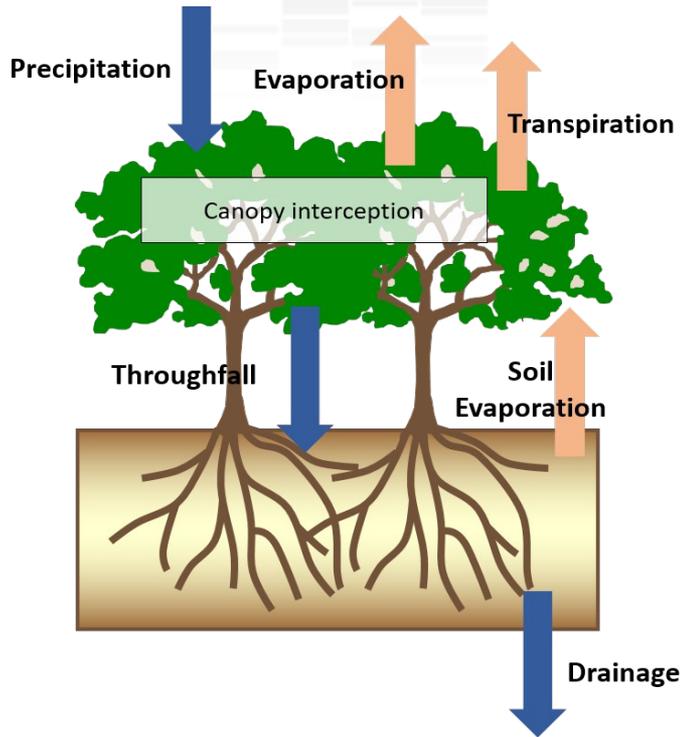
- *Traits hydrauliques des plantes*
- *Profondeur d'enracinement*

## Contenu en eau relatif du sol RWC

- Aussi bon que les indices empiriques
- Paramétrable (*sol*, *LAI*)

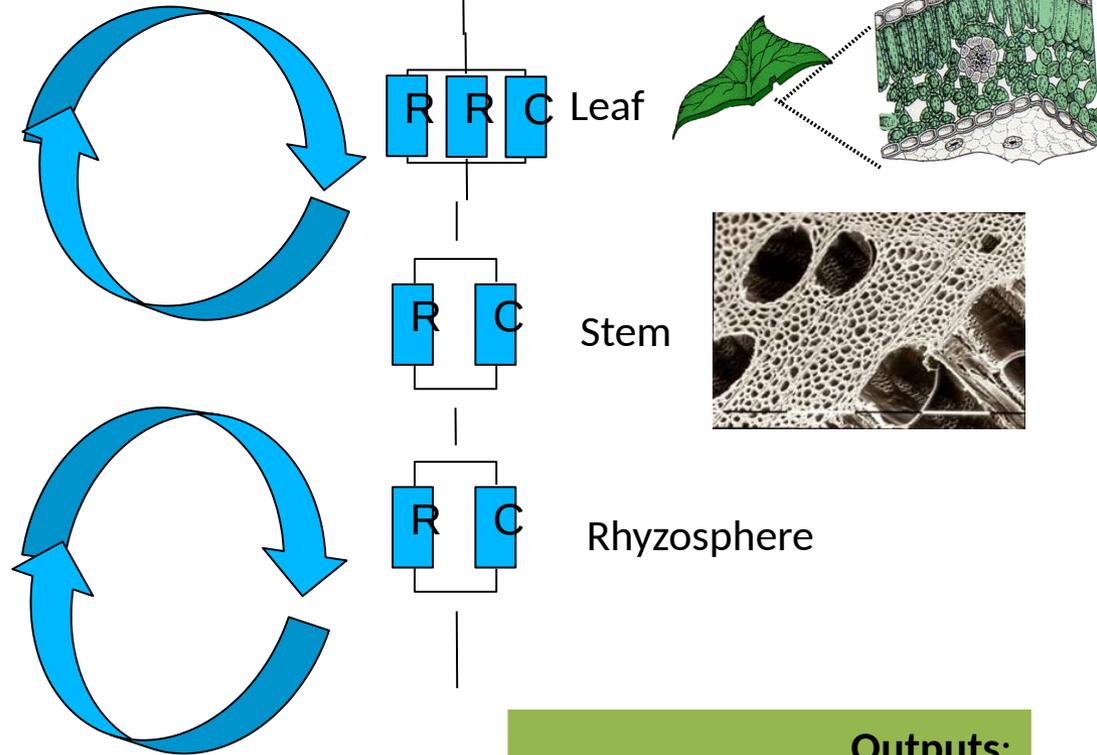
# Prédiction de la teneur en eau : vers une approche biophysique

**Water balance model**  
(Ruffault et al 2013 Clim. Chan)



**Outputs:**  
 Transpiration, Evaporation  
 Soil water content  
 Soil water potential  $\psi_{\text{soil}}$

**Plant hydraulic model: SUREAU**  
(Martin-StPaul et al 2017 Ecol. Let.)



**Outputs:**  
 Plant water potential  $\psi_{\text{plant}}$   
 Plant hydraulic resistance  
**Teneur en eau de la plante**

# Conclusion : vers une approche intégrée du feu

## ❖ Prédire et s'adapter aux nouveaux régimes de perturbation

- FP6 – Fire Paradox
  - Apprendre à vivre avec le feu & wise use of fire
- H2020 - Integrated fire management
  - Extreme Wildfire Events
  - Nouveaux régimes de feux



## ❖ Vers une gestion intégrée du feu

- Meilleure intégration des phases de gestion de la crise

## ❖ Vers une vision multi-risques

- Évaluation des cascades de risque
- URFM : approche pluri-disciplinaire **sciences du feu, écophysiologie**, entomologie
- **INRAE** : évaluation et gestion des risques multiples
- H2020 - Multi-hazard risk management for risk-informed decision making in the EU



## ❖ Vers une approche intersectorielle

- Politique d'urbanisme
- Aménagement rural, énergie

ex. interactions insectes / feux



Sieg et al. 2017, Fire Ecol.



**Merci de votre attention !**

