



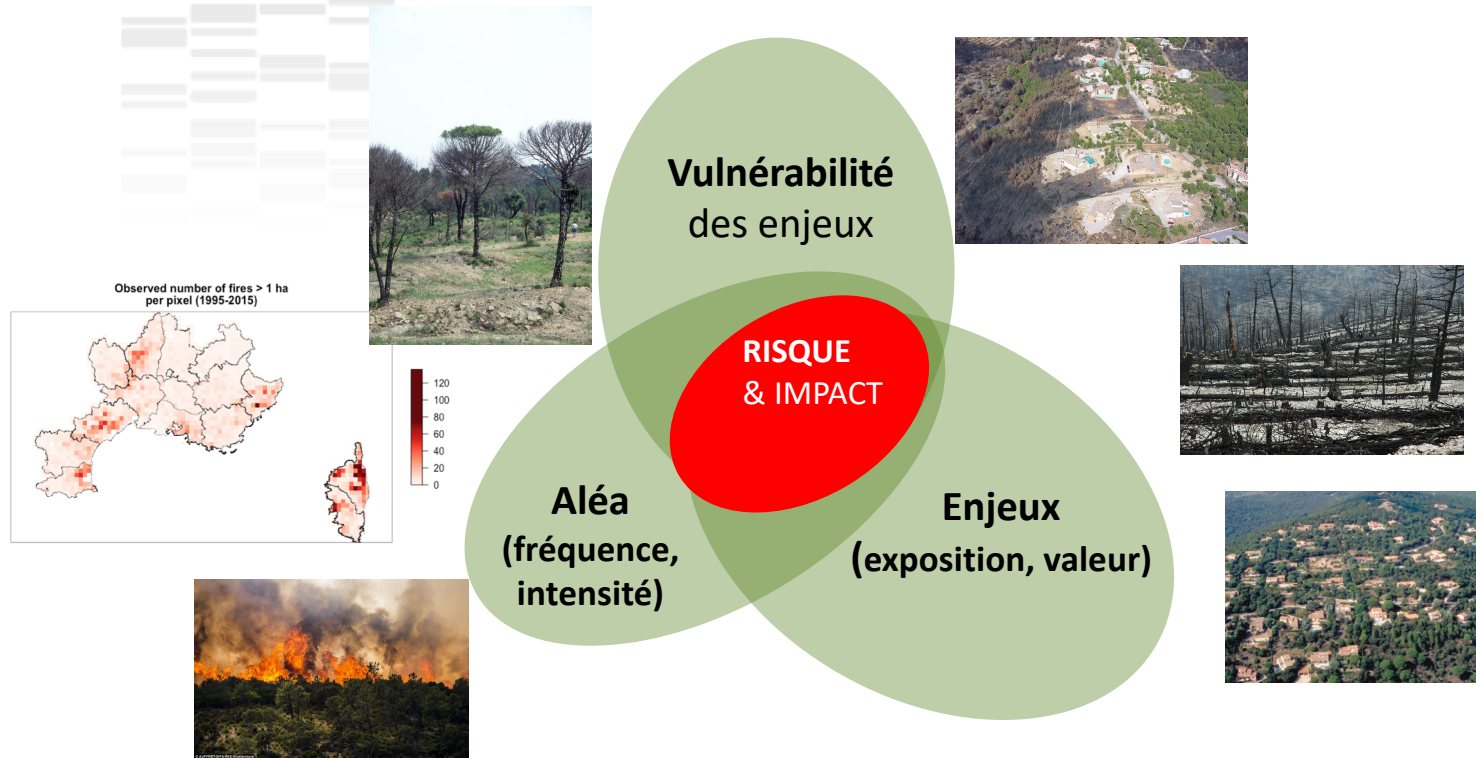
# Evaluation du Risque Incendie

## Contributions de l'INRA

Jean-Luc Dupuy, H el ene Fargeon, Nicolas Martin,  
François Pimont, Eric Rigolot, Julien Ruffault, Maxime Soma



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

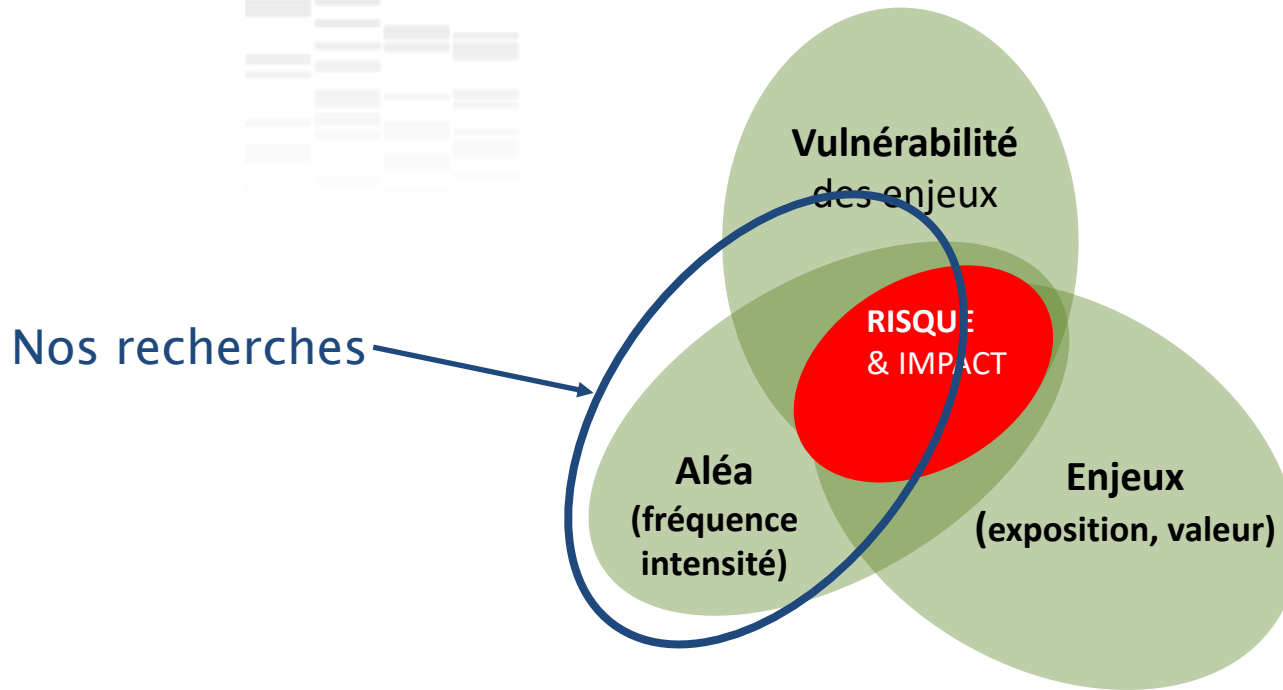


## ❖ Enjeux opérationnels : anticiper et réduire le risque

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



# L'évaluation du risque d'incendie et nos recherches



## Plan

- 1 Evaluation du risque aux échelles locales : approche physique
- 2 Evaluation du danger aux échelles régionales : approche empirique

# L'évaluation du risque d'incendie et nos recherches

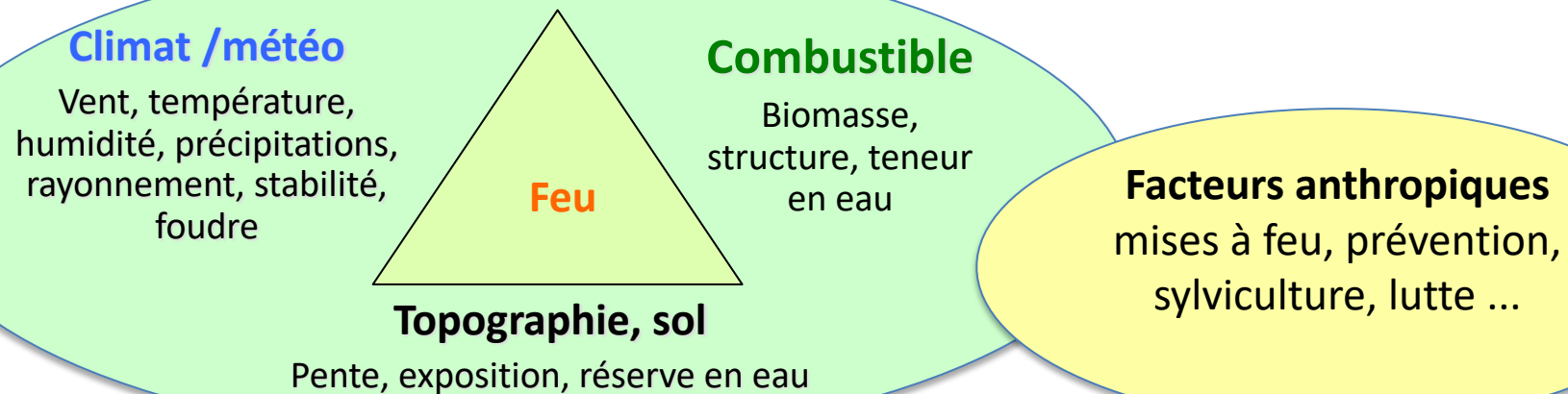
## ❖ Questions

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 Evaluation du risque aux échelles locales : approche physique

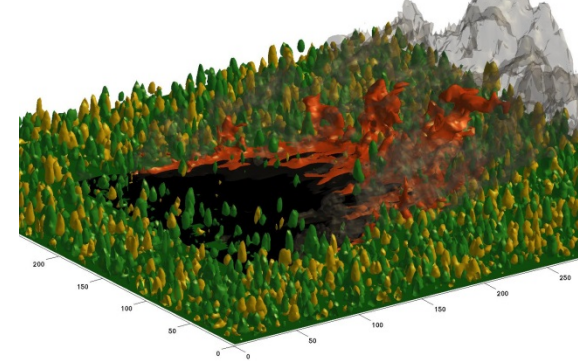


# Modélisation physique du feu : FIRETEC

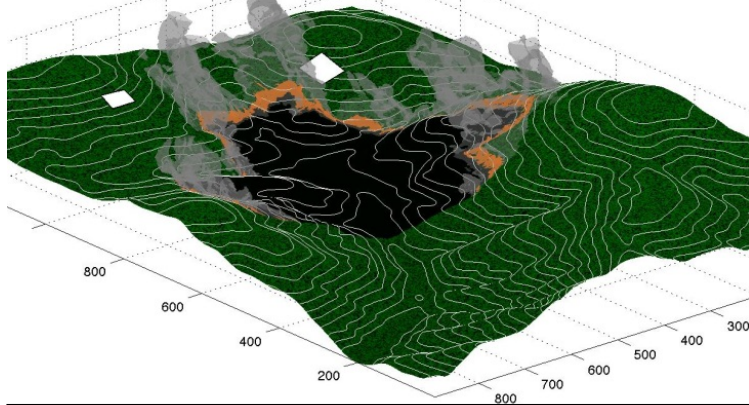
## Modèle

- 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 en peuplement dépérissant*



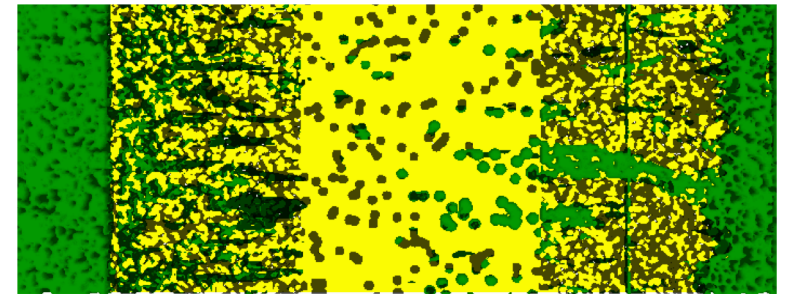
*Simulation sur paysage (les Adrets des Maures)*



## 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*

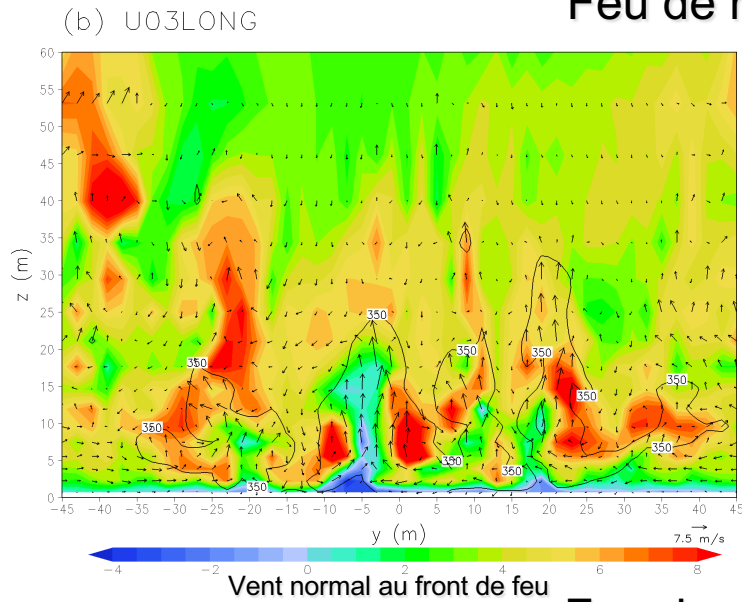


## Simulations

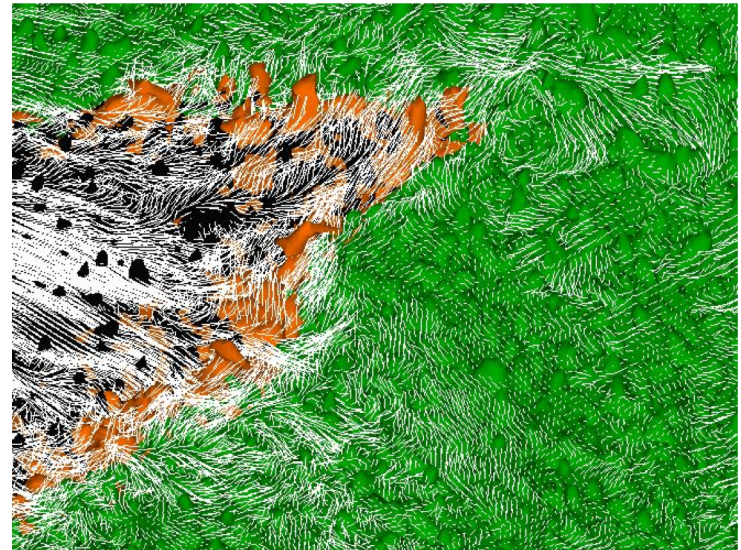
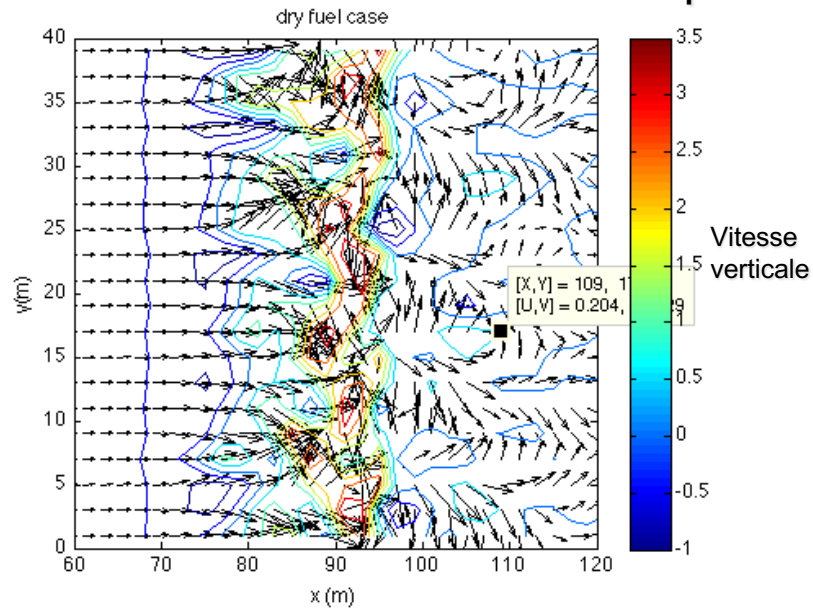
- Résolution spatiale: 2 m
- Simulations du peuplement au petit paysage (< 500 ha)
- Prédiction : vitesse, puissance, flux, températures, ...

# FIRETEC : structure des flammes, instabilités convectives

## Feu de maquis, vue de face



## Feu de prairie, vue de dessus

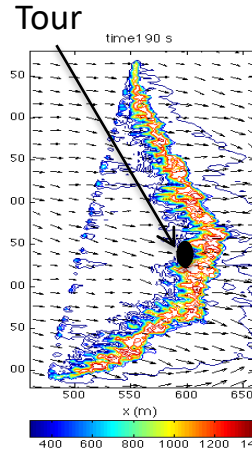
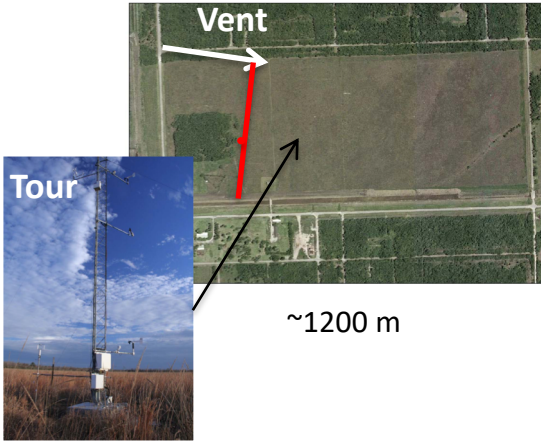




# FIRETEC : évaluations

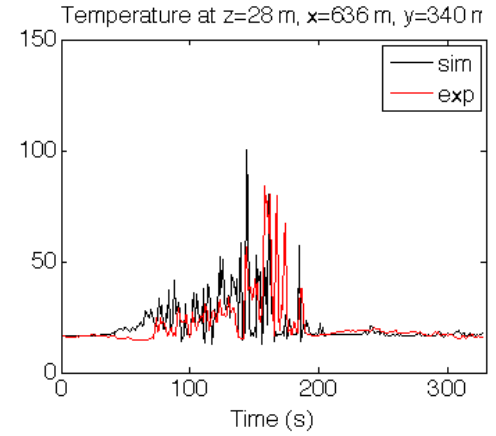
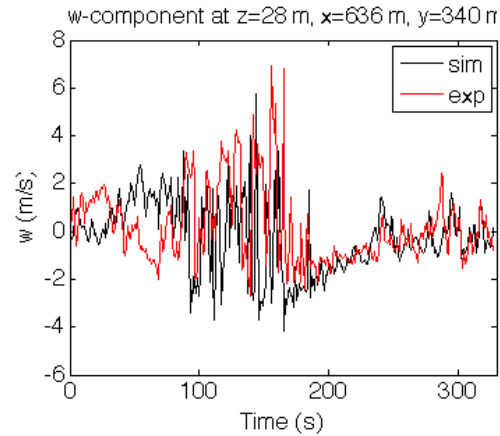
## Fireflux Experiment

(Clements et al. 2007, BAMS)



(Dupuy et al. 2014 ICFFR)

## Vitesse verticale et température dans le panache



## International Crown Fire Modelling Experiment

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

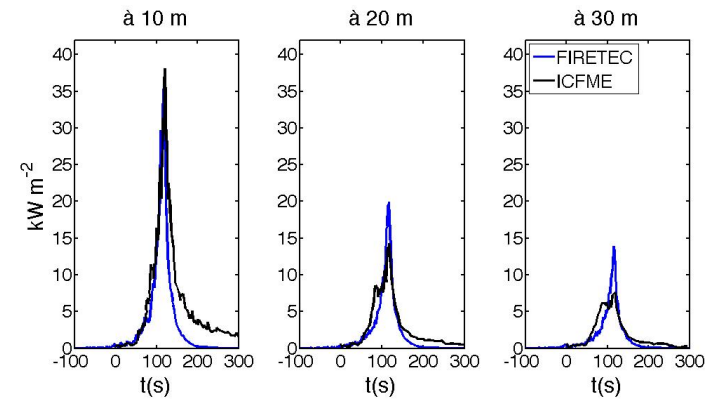


### Vitesses de feu

(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

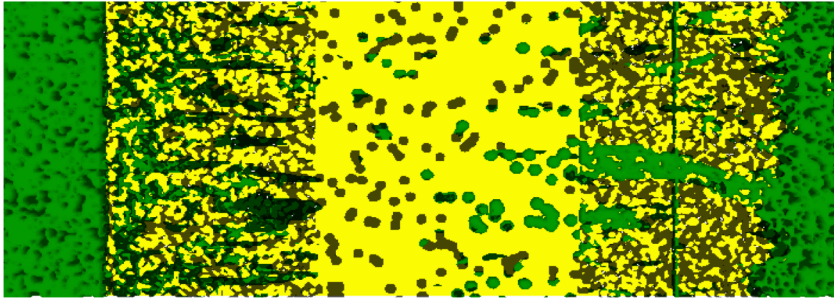
(Pimont et al. 2014, ICFFR)

## Flux radiatifs observés et simulés



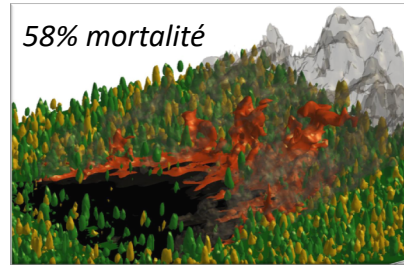
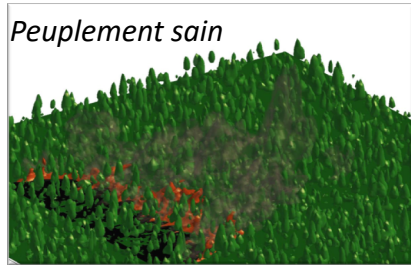
# FIRETEC : quelques applications

Consommation des arbres en peuplement et sur éclaircie



Pimont et al. 2011, AFS

Effet du dépérissement



Sieg et al. 2017, Fire Ecol.

Impact de la fréquence de brûlage dirigé

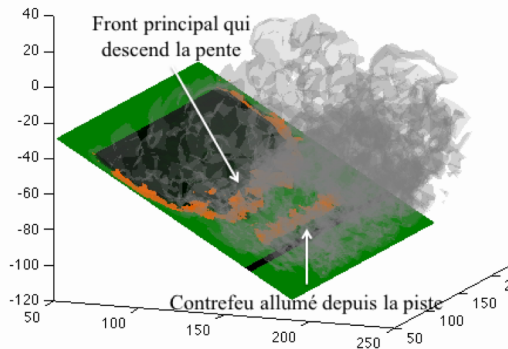


Intensité de feu en fonction du nombre d'années après traitement

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.

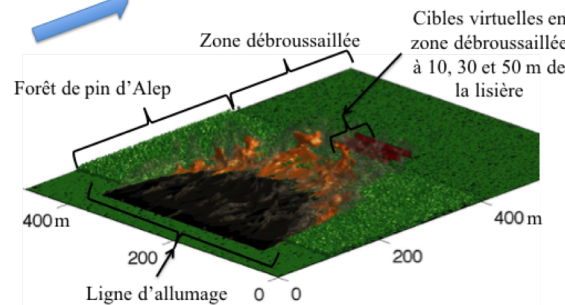
Simulation de contre-feu



Dupuy et al. 2011, IJWF

Effets du débroussaillage sur les flux (OLD)

Directions du vent et du feu



Pimont et al. 2014, ICFR

Radiant heat flux ( $\text{kW m}^{-2}$ )      Gas temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 d=10 m   d=30 m   d=50 m   d=10 m   d=30 m   d=50 m

<b>Run 1</b>						
No slope	25	8.6	5.5	287	105	71
Cleared fuel-break	(28)	(9.2)	(5.9)	(323)	(111)	(78)
<b>Run 2</b>						
30% slope	31	12	8.4	329	110	59
Cleared fuel-break	(35)	(13.2)	(9.1)	(404)	(130)	(70)
<b>Run 3</b>						
No slope	22	8.3	5.4	280	108	68
10 m-respaced trees	(26)	(8.8)	(5.9)	(336)	(120)	(75)
<b>Run 4</b>						
30% slope	30	12	8.0	345	113	63
10 m-respaced trees	(39)	(13)	(8.9)	(422)	(143)	(70)



# 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

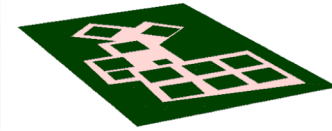
★ Pimont et al. 2016, EMS

# Applications

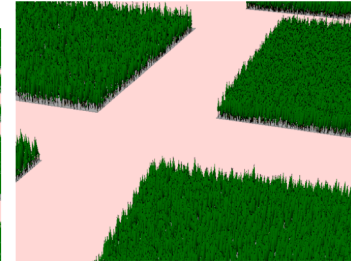
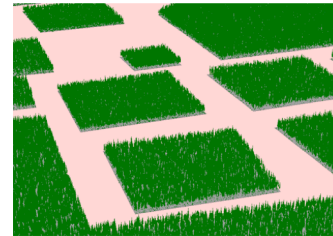
Modéliser le combustible (e.g. ICFME)



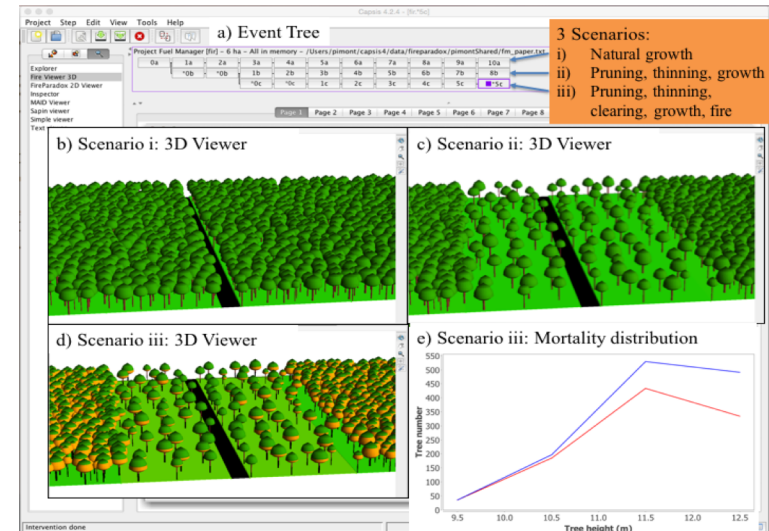
a)



b)



Simuler des scénarios (gestion et perturbations)



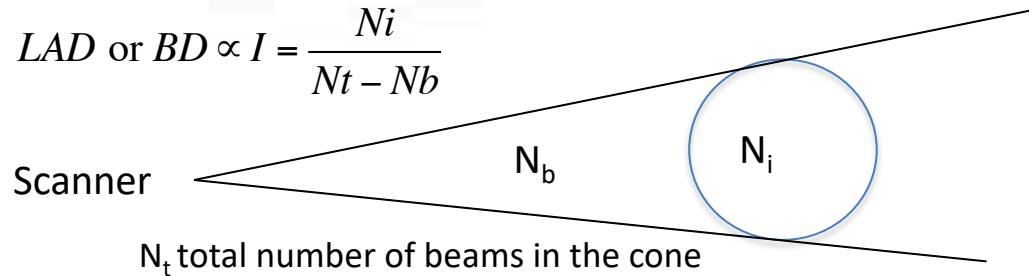


# Evaluation de la structure du combustible

## Le LiDAR terrestre pour évaluer la distribution de surface/biomasse foliaire

- Une approche fondée sur les indices de densité relative (Béland et al. 2011, Pimont et al. 2018 RSE)

$$LAD \text{ or } BD \propto I = \frac{N_i}{N_t - N_b}$$



Chêne pubescent à Javon (84)



- Verrous : occlusion/échantillonnage, hétérogénéité, effet distance scanner – cible, séparation bois/feuille

### • Avancées :

- Proposition d'indices débiaisés (Pimont et al. 2018 RSE)
- Calibration et test des indices sur des branches
- Validations sur des individus
- Applications à l'échelle placette/peuplements (kriging, multi-scans)  
Chêne pubescent à Javon (84), pin d'Alep/chêne vert à FontBlanche

Thèse Maxime Soma  
(2015-2018)

Pimont et al. 2015, RS  
Soma et al. 2018, RS

## Evaluation de la structure du combustible

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



## 2 Evaluation du danger aux échelles régionales : approche empirique

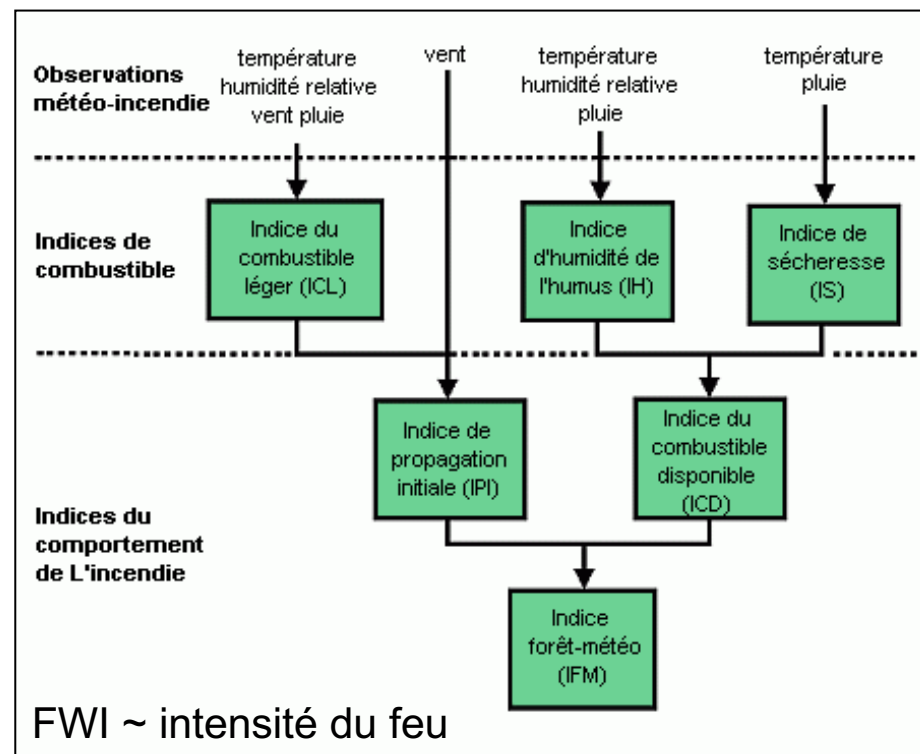




# Le danger d'incendie

- 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

## Fire Weather Index



## Questions

- Le FWI 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)

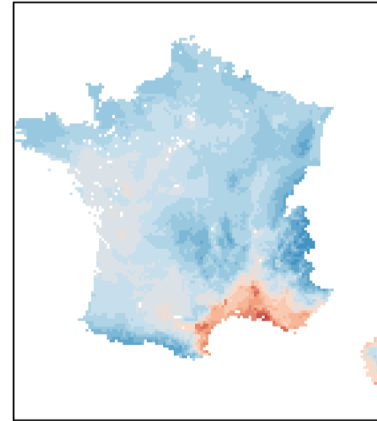
Fargeon et al. 2018, ICFFR

Submitted to Climatic Change

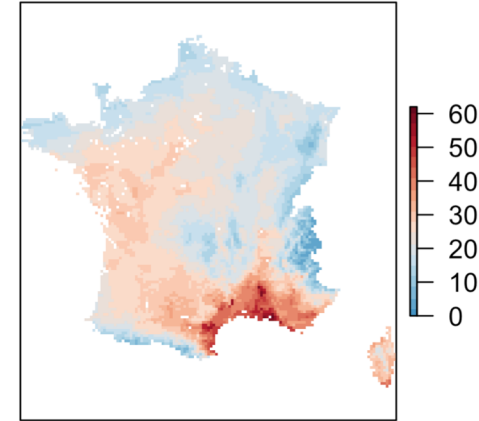
5 models, rcp4.5 and 8.5

90th percentile of FWI

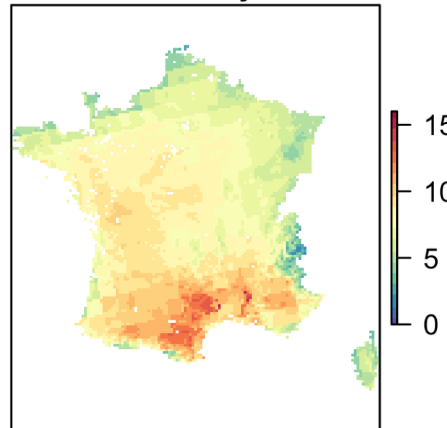
Multimodel mean  
1995-2015



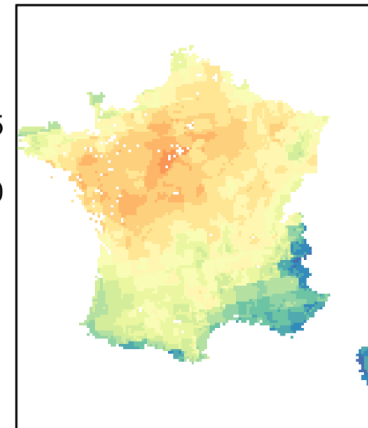
Multimodel mean rcp8.5  
2078-2098



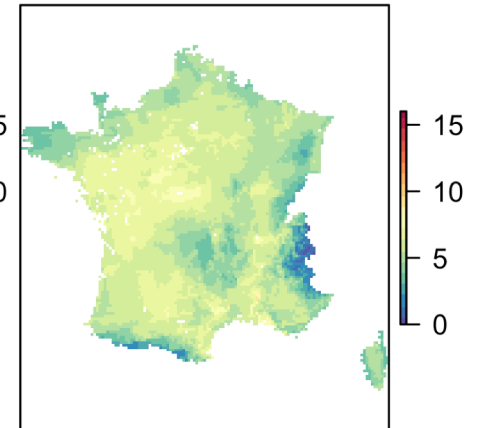
Multimodel mean rcp8.5  
Anomaly



Model uncertainty rcp8.5  
2078-2098

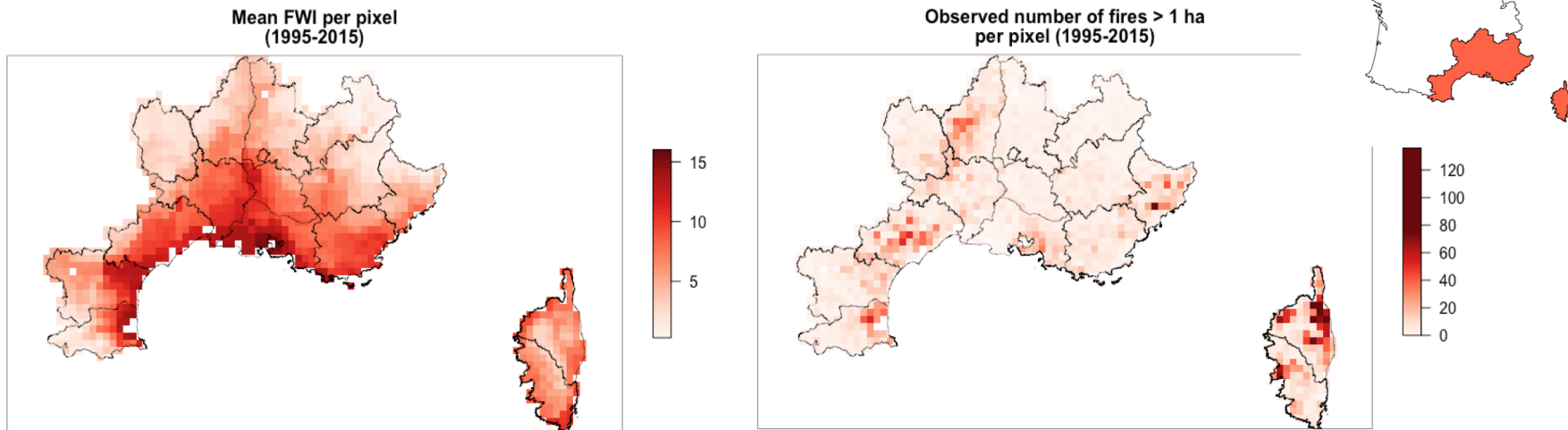


Annual variability  
1995-2015



# Développement d'un modèle d'occurrence des feux

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



Thèse d'Hélène Fargeon

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

$$\text{Fire number} = \text{Intercept} * S * f(S) * g(\text{FWI}) * h(\text{Week}) * i(\text{Pixel})$$

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

# Modèle d'occurrence des feux

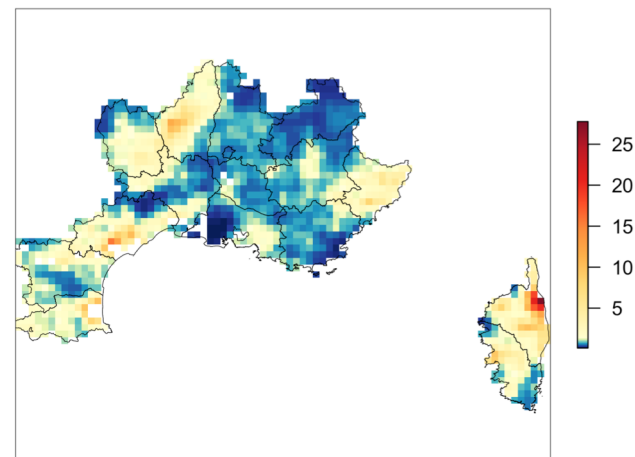
Amplitude des effets :

FWI > Spatial > Forest area ~ Seasonal

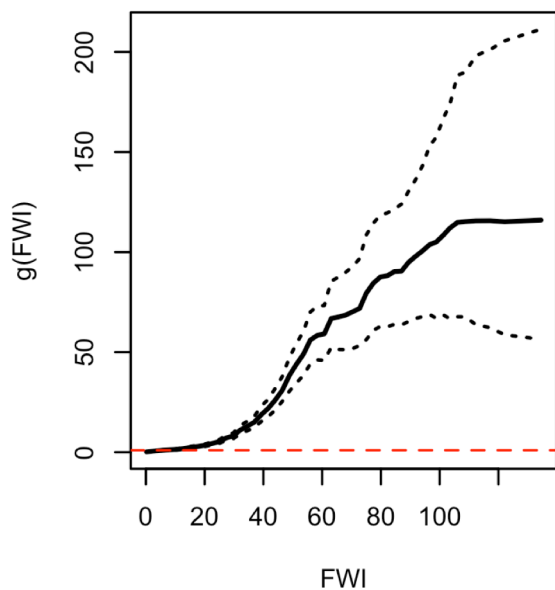
L'effet du FWI est non linéaire, convexe en dessous de 50 et incertain au delà de 50

Fargeon et al. 2018, ICFFR

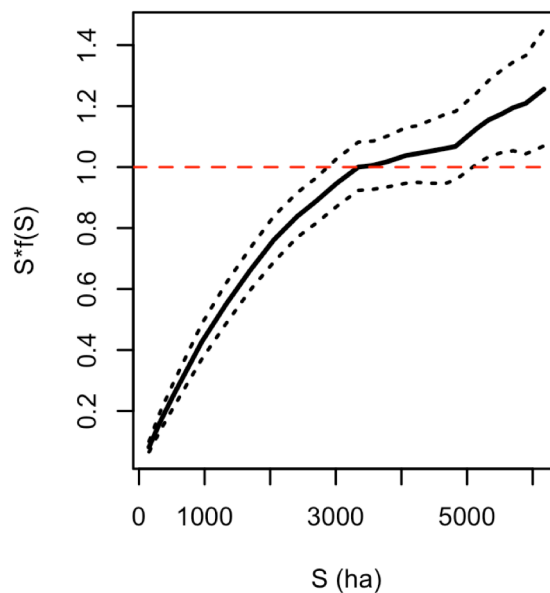
Spatial effect



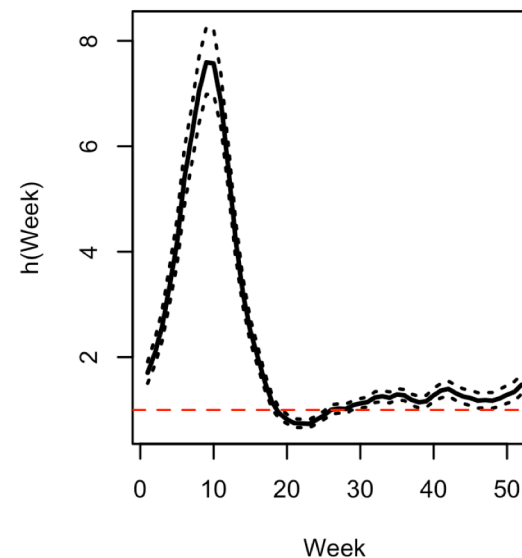
Climate effect



Forested area effect



Seasonal effect

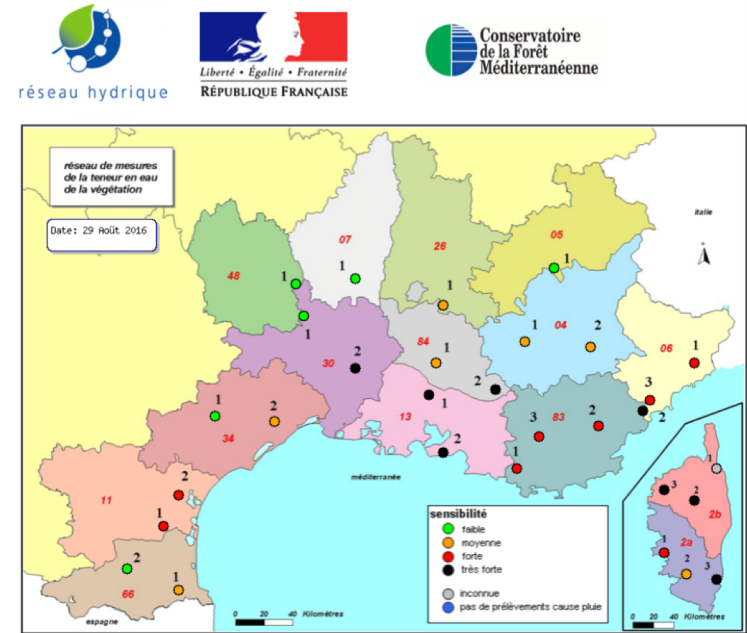


# Evaluation du danger : l'effet de la sécheresse est-il bien pris en compte ?

- Le FWI traduit l'impact de la sécheresse sur le combustible *mort*.
- L'Etat Major de Zone s'appuie :
  - sur le FWI 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 20000 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 ?



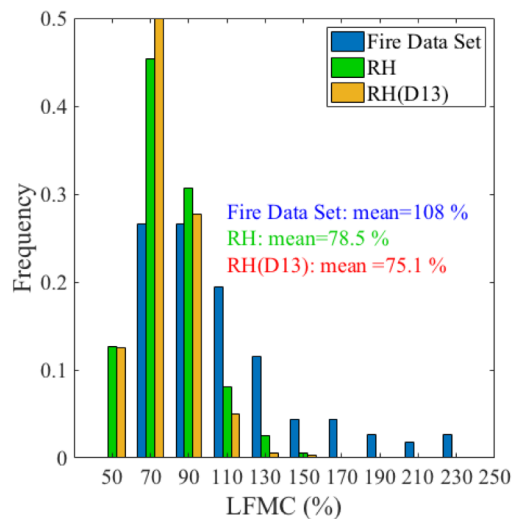
# La teneur en eau du “vivant” : un effet marginal sur le feu ?

**Contexte** : Les feux expérimentaux de terrain montreraient un effet marginal :

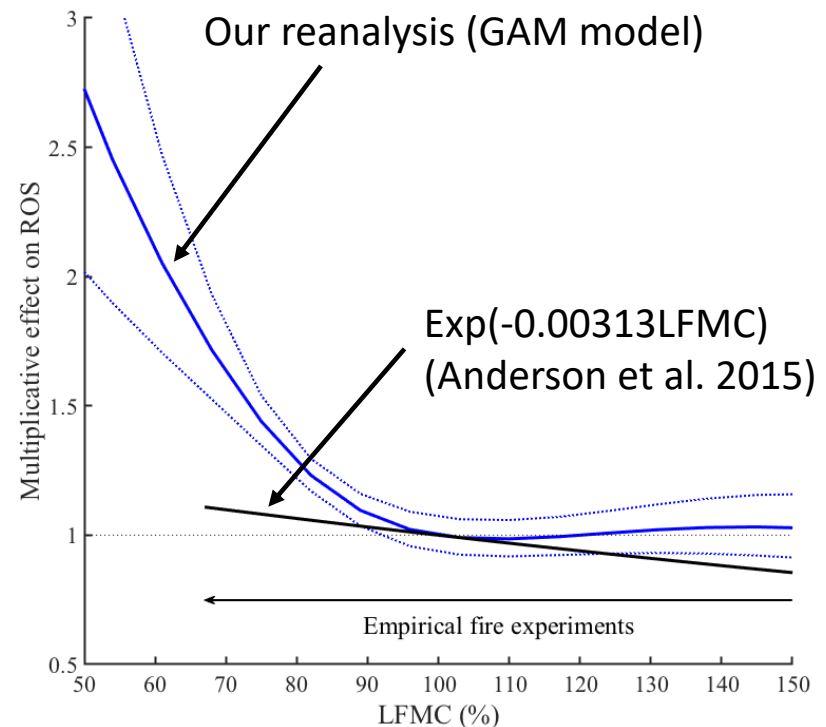
e.g. Alexander&Cruz 2013 (14 NS datasets) ; Anderson et al. 2015 (> 100 feux)

**Une réanalyse** du jeu de données de Anderson et al. 2015 montre plusieurs sources de sous-estimation de l'effet:

- Forme fonctionnelle non adaptée
- Conditions expérimentales plutôt “humides”
- Petite taille des jeux de données
- Incertitude sur les mesures de terrain (vent, végétation)

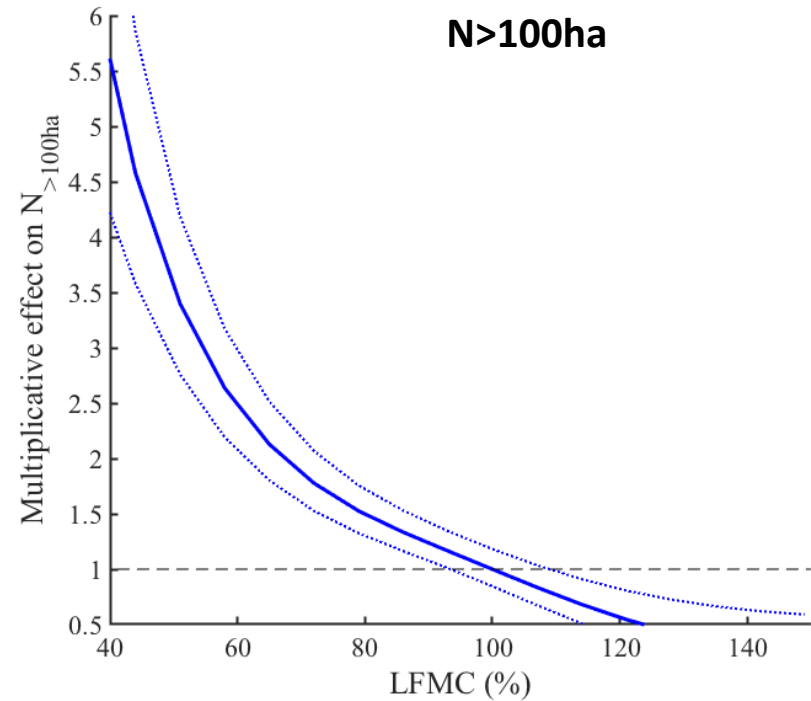
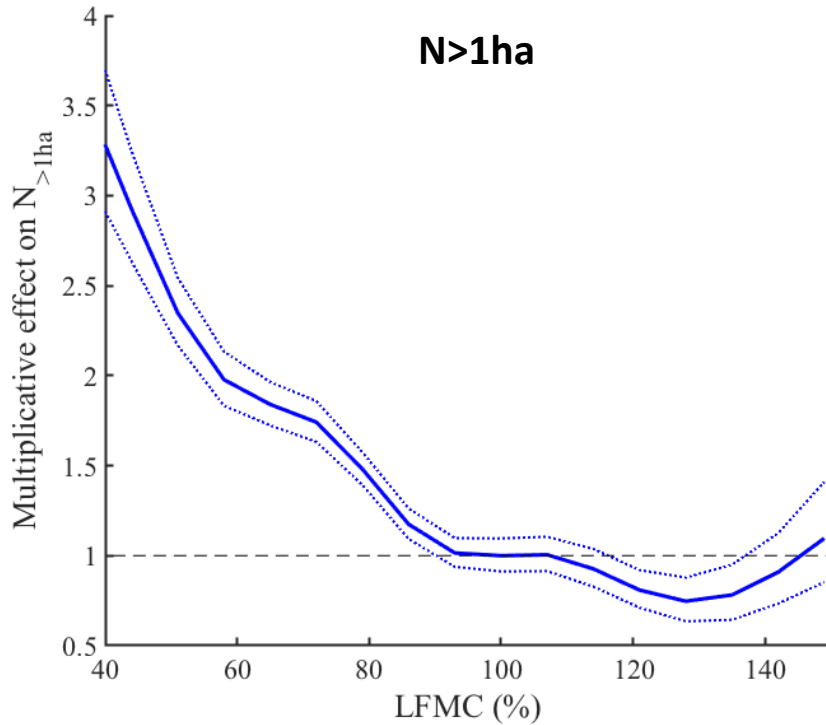


(Pimont et al. 2019, IJWF)



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

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



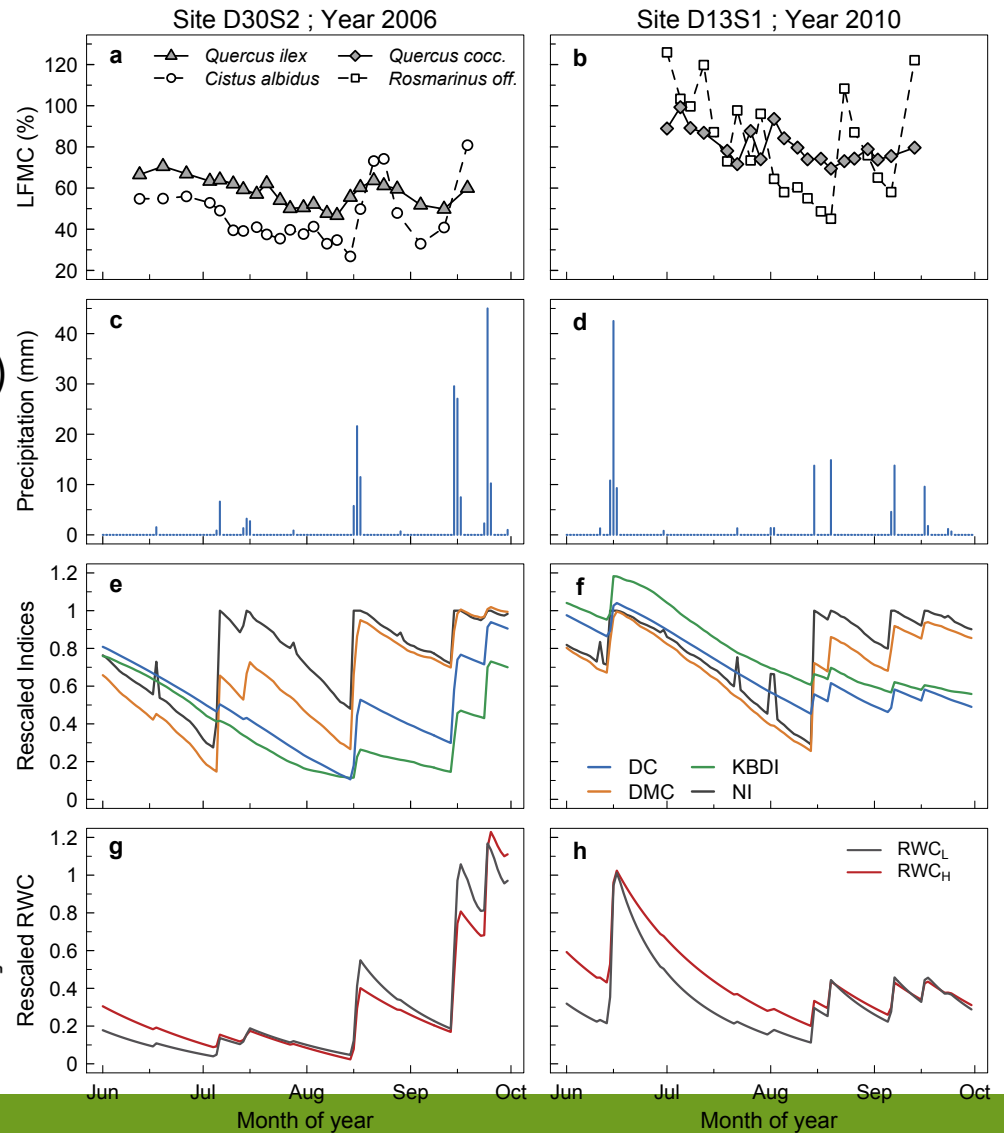
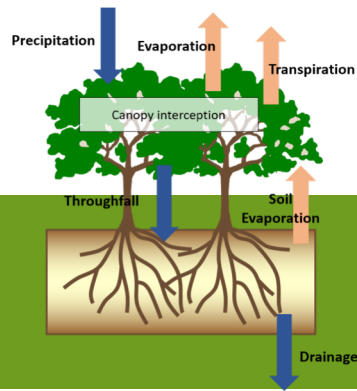
=> Fort effet surtout pour TE < 90%

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

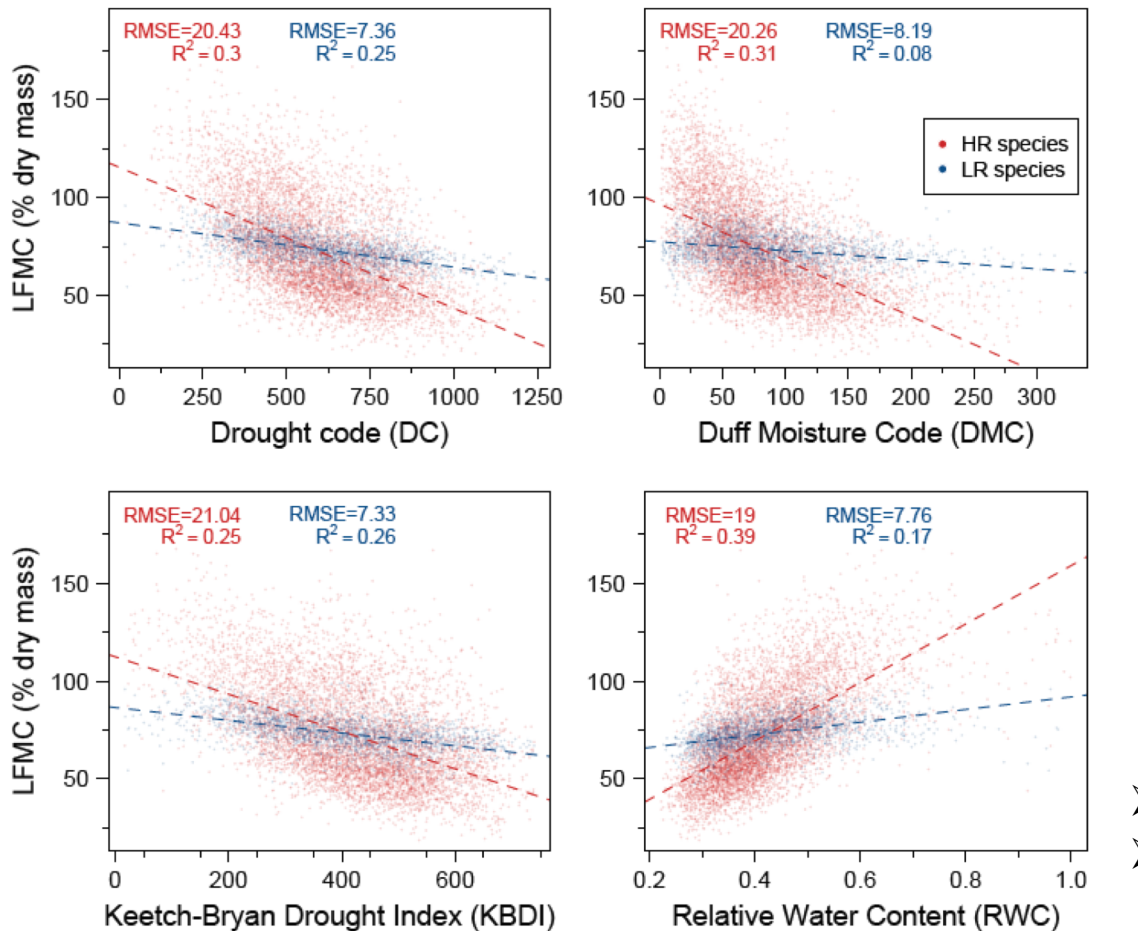
- Données climatiques journalières  
*Réanalyse SAFRAN 8x8 km (rain, T°, WS, G)*

- Indices de sécheresse empiriques  
*KBDI, NI, DC, DMC*

- Contenu en eau relatif du sol (RWC)  
*Bilan hydrique*



# Prédictibilité de la teneur en eau



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*

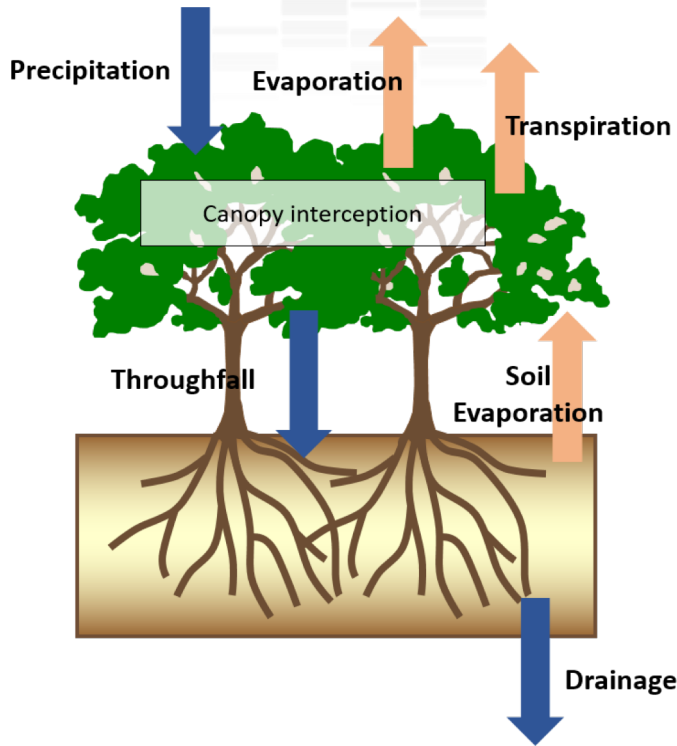
## RWC

- 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)



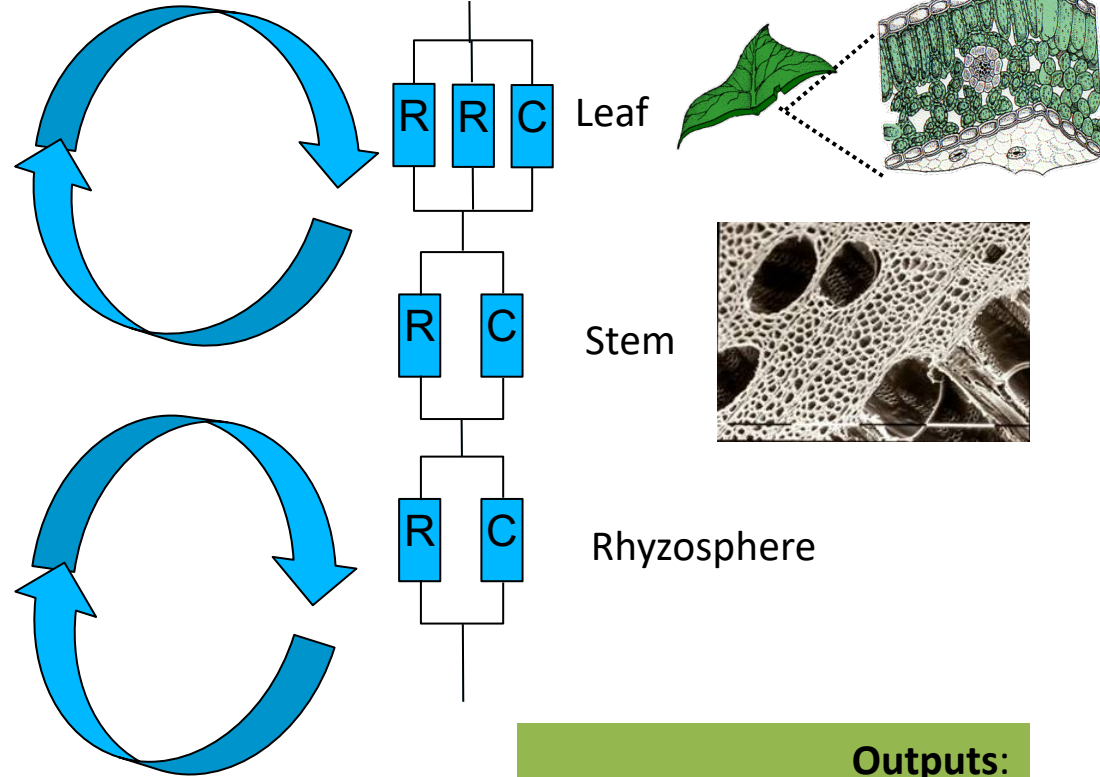
### Outputs:

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  
Plant water content

# Perspectives



# Perspectives

- Valoriser le développement de FIRETEC par l'évaluation :
  - du risque aux interfaces forêt-habitat,
  - de la combustibilité des peuplements (typologie)
- Poursuivre le couplage :
  - fonctionnement – combustible (biomasse, teneur en eau) – feu,
  - ie développer les interactions écophysiologie – sciences du feu
- Développer les collaborations pour l'évaluation intégrée du risque (i.e. toutes les composantes)

**Merci de votre attention !**





# Comment intégrer les effets de la structure du combustible ?

*Expected fires = f(Climature, location, season, forest area, fuel type)*

- Utiliser les inventaires et les données de télédétection
- Construire des types de structure
- Les données des points forêts de l'IGN sont insuffisantes pour caractériser le combustible (eg litière, HBH), ie paramétrer les types et évaluer leur combustibilité
- L'IGN procède à des scans LiDAR systématiques des points « Forêts »
- Scans INRA de 30 placettes du Réseau hydrique (strates arbustives)  
⇒ Extraction du phytovolume, comparaison approches inventaires

8 types de structure forestière

