



HAL
open science

Propagation et impacts des feux de végétation: enjeux et modélisation

Jean-Luc Dupuy

► **To cite this version:**

Jean-Luc Dupuy. Propagation et impacts des feux de végétation: enjeux et modélisation. Conférence de l'Institut Coriolis pour l'Environnement, Ecole Polytechnique. FRA., Mar 2014, Paris, France. 60p. hal-02792132

HAL Id: hal-02792132

<https://hal.inrae.fr/hal-02792132>

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.

A dramatic landscape featuring a large, intense fire in the sky, with thick, dark smoke billowing upwards. The fire is bright orange and yellow, contrasting sharply with the dark, overcast sky. In the foreground, a red truck is driving away on a dirt road, kicking up a large cloud of dust. The road is flanked by dry, golden-brown grass and a simple wooden fence. The overall scene is one of a wildfire in progress, with the truck likely being a fire-fighting vehicle.

Propagation et impacts des feux de végétation : enjeux et modélisations

Jean-Luc Dupuy

Institut National de la Recherche Agronomique
Unité d'Ecologie des Forêts Méditerranéennes
Equipe Physique et Ecologie du Feu

Les feux

- Incendie
- Feu agricole ou forestier
- Feu pastoral
- Brûlage dirigé

Feu de surface



Feu de cimes



La végétation

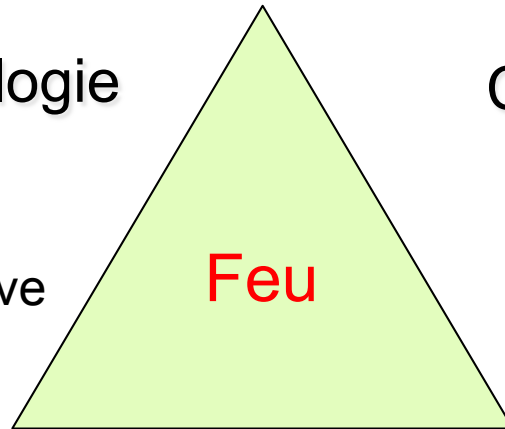
- Forêts
- Landes, maquis
- Savane, prairies
- Tourbières
- Surfaces cultivées

Un phénomène biophysique et anthropique

Facteurs biophysiques

Climat / Météorologie

- Vent
- Température
- Humidité relative
- Précipitations
- Foudre



Combustible

- Quantité (charge)
- Qualité (composition)
- Etat hydrique (teneur en eau)
- Arrangement spatial (distribution de densités de matière)

Topographie

- Exposition
- Pente

Facteurs anthropiques

- Départs de feu (> 95 % des causes en Europe)
- Occupation des sols et gestion des milieux naturels
- Aménagement du territoire, urbanisation

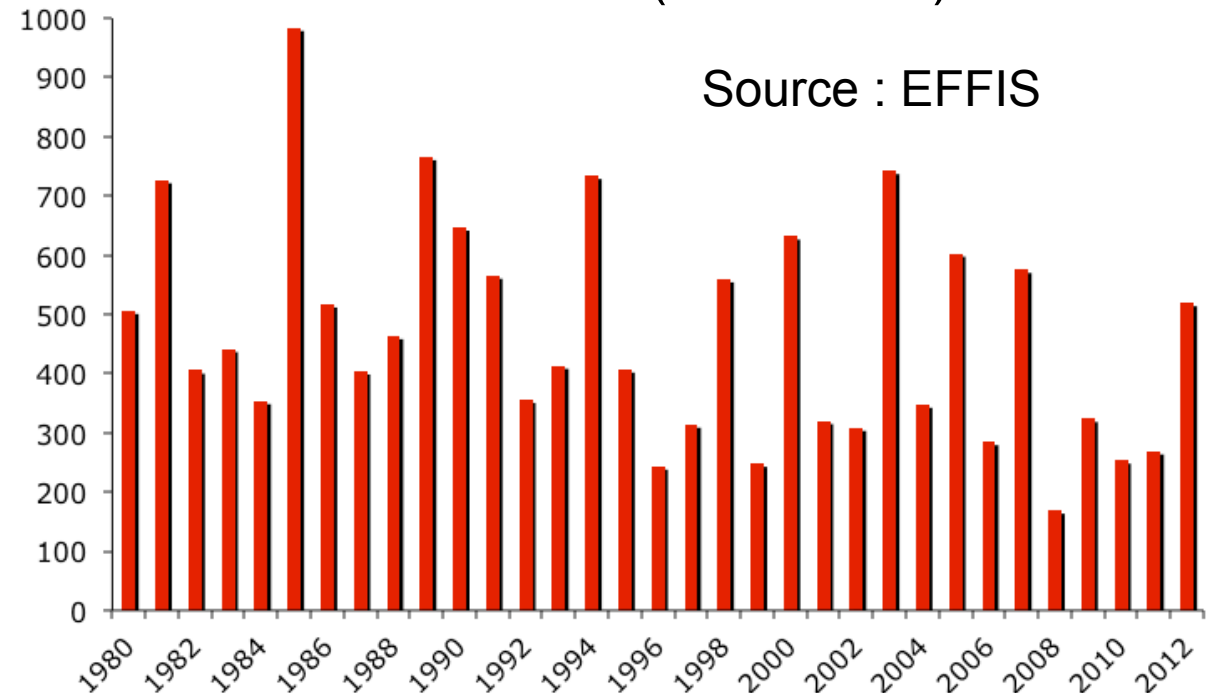
Quelques chiffres

Surfaces brûlées annuelles
estimées par images satellitaires,
millions d'ha (2001-2004)

Afrique	256
Amérique Nord	3,7
Amérique sud	25,2
Asie	31,6
Australie, NZ	54
Europe	0,8
<i>Global</i>	371

(Giglio et al., 2010)

Surfaces brûlées annuelles
en Europe méditerranéenne,
milliers d'ha (1980-2012)



Émissions de GES (tous feux de végétation)

~2,5 PgC/an (1997-2004) soit 7% émissions totales actuelles

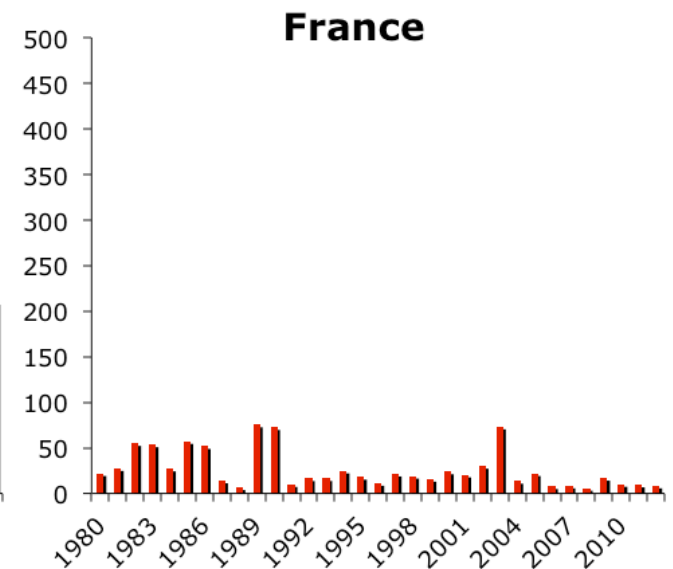
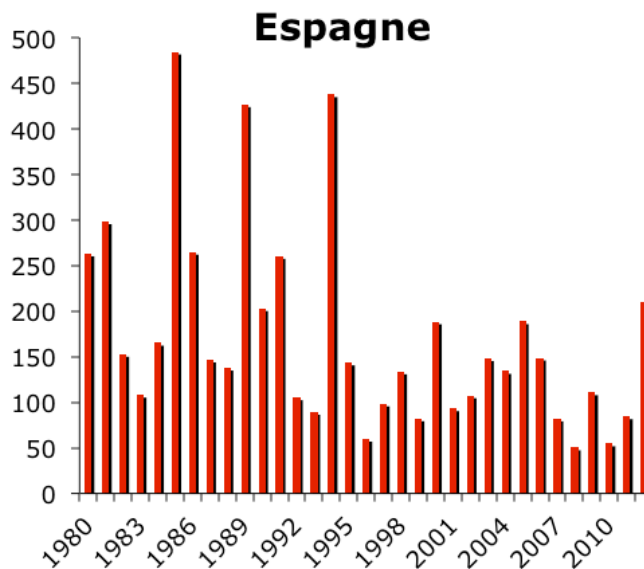
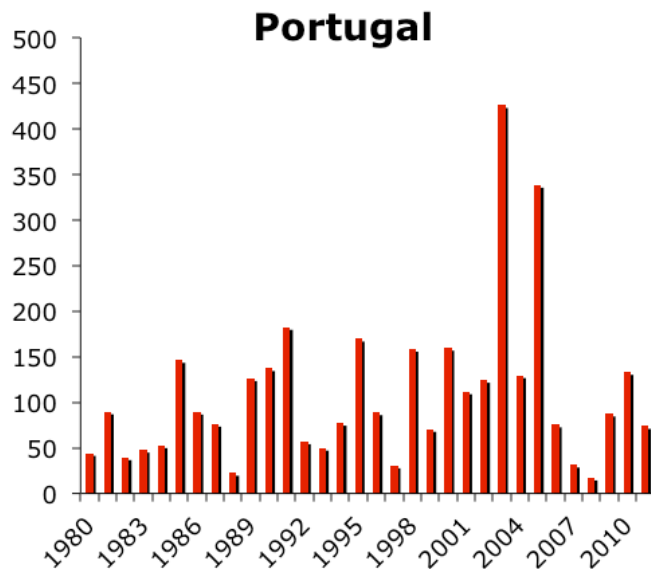
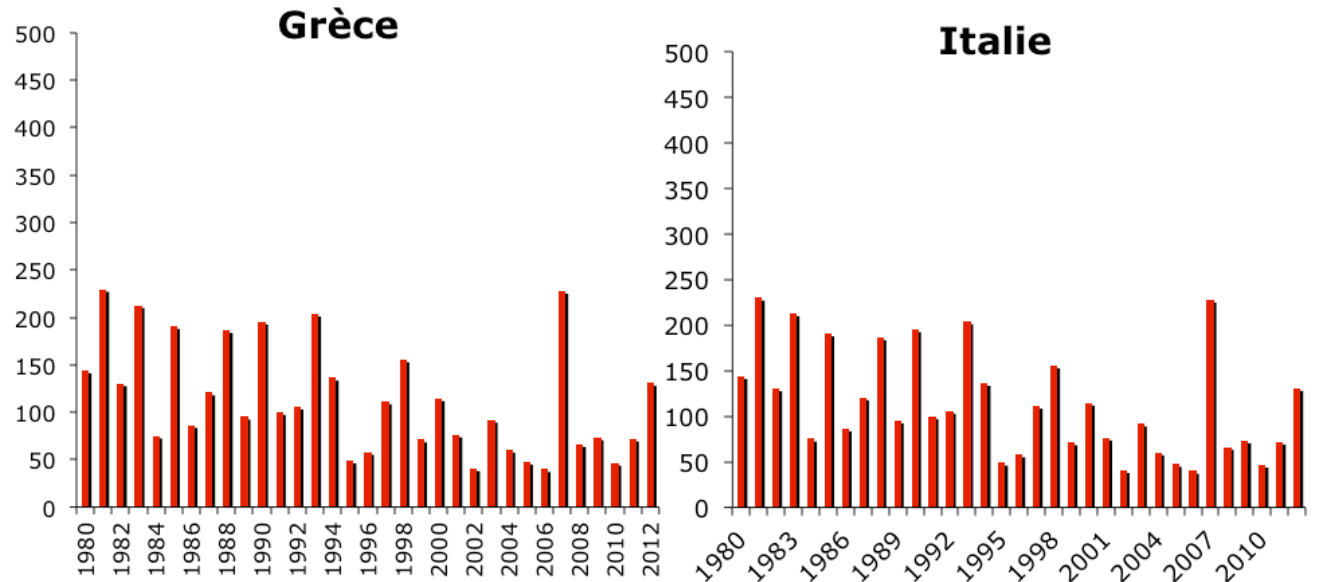
savanes 44%, déforestation et feux de forêts tropicales 36 %, autres feux de forêts 15%

(Van der Werf et al. 2010)

Quelques chiffres

Surfaces brûlées annuelles (milliers d'ha, 1980-2012)

Source : EFFIS



Enjeux et impacts

Enjeux : qu'est-ce qui est menacé ?

Les incendies peuvent être une menace, un danger pour :

- La vie et la santé humaine
- Les biens matériels (habitat, infrastructures)
- La production forestière
- Le patrimoine naturel, le paysage
- La pérennité des écosystèmes terrestres
- L'équilibre des cycles biogéochimiques

Ce qui amène à vouloir en contrôler les impacts

NB : Les statistiques sur les impacts socio-économiques sont très incomplètes.

Nombre de décès directs

Quelques centaines par an

Données fiables pour les pays « riches »

Europe (1980-2007) : ~ 20 / an

- Portugal : 110
- Espagne : 186
- France : 20
- Grèce : 177 (78 en 2007).

Amérique du Nord : ~ 25 / an (firefighters)

Australie : ~ 5 / an (1955-2008)



Sources :

Joint Research Center (EU),
Haynes et al. 2010 (AU),
USFS, Canadian FS

Nombre de personnes affectées

Sinistrée ou évacuées ou fortement affectées par les fumées

1980 -2008 : ~ 200 000 /an (3 millions en 1997 en Indonésie soit 55%)

Source : OFDA/CRED International Disaster Database

Décès indirects dûs à l'exposition aux fumées

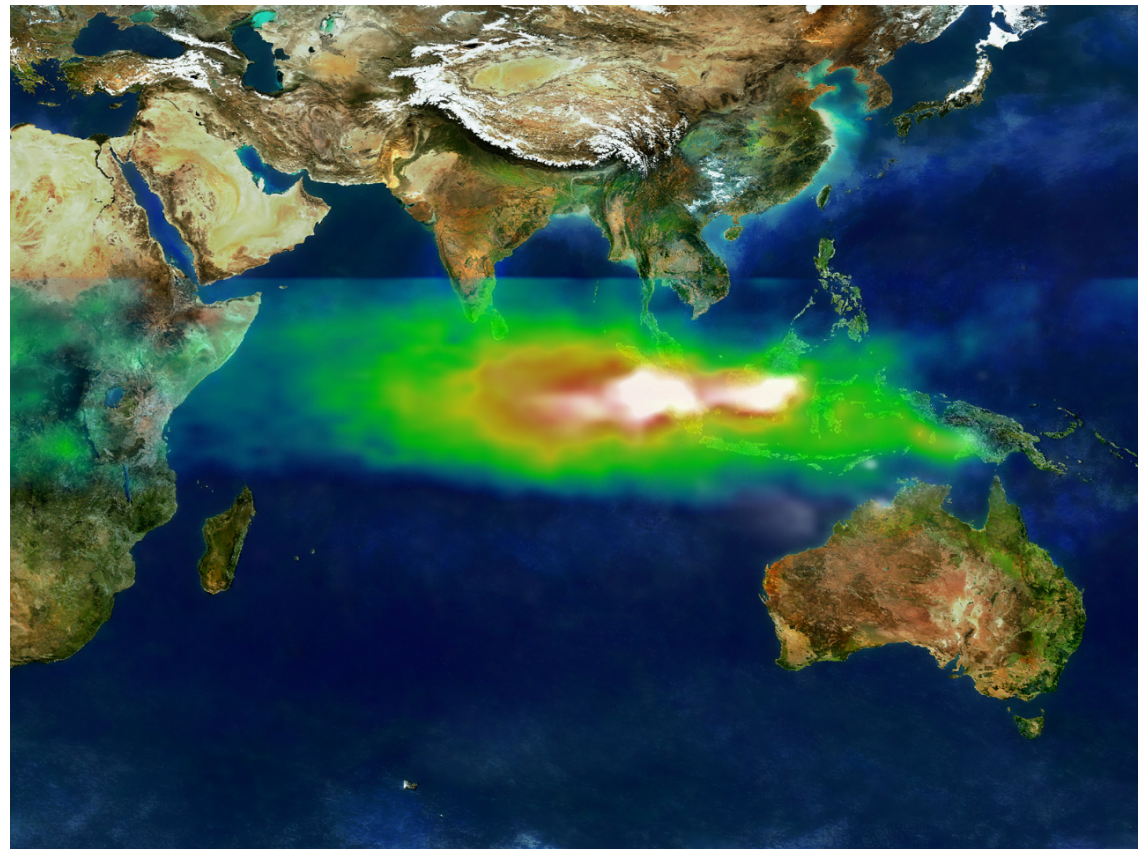
Johnston et al. (2012) : 340 000 décès annuels liés à l'émission de particules fines par les feux de végétation (feux de savanes et de forêts tropicales humides), soit ~ 15% décès liés aux particules fines

Pollution liée aux incendies d'Indonésie de 1997

Origine : défrichage par le feu

Feux de forêt et de tourbières (« peat fires »), 8 millions d'hectares brûlés

Coût de 5 milliards de \$ (GFMC, 2013)



Blanc: fumée. Couleurs: ozone troposhérique. NASA

Dommmages matériels et coûts

Dommmages matériels

L'essentiel des dommages concernent l'habitat et a lieu lors des grands feux

Constructions détruites (ex.):

France : < 10 / an (110 en 2003)

Australie, Black Saturday (2009): 2200 en 12 h

Californie (2003) : 3700

Grèce (2007) : 2000



Coût économiques

Evènements : Russie, 15 milliards \$ (2009) - Californie 10 milliards \$ (2008)
 – Australie, Ash Saturday, 1 milliard \$ (2009) - Portugal 1 milliard € (2003)

Prévention et lutte:

France – prévention (1/3), lutte (2/3) : 500 millions €/an (Chatry et al . 2010) - Moyens de lutte mobilisés sur la protection des maisons

Australie (Ashe et al. 2009) - 5,6 milliards \$US/an.

Contre pertes économiques estimées à 1 milliard \$US/an

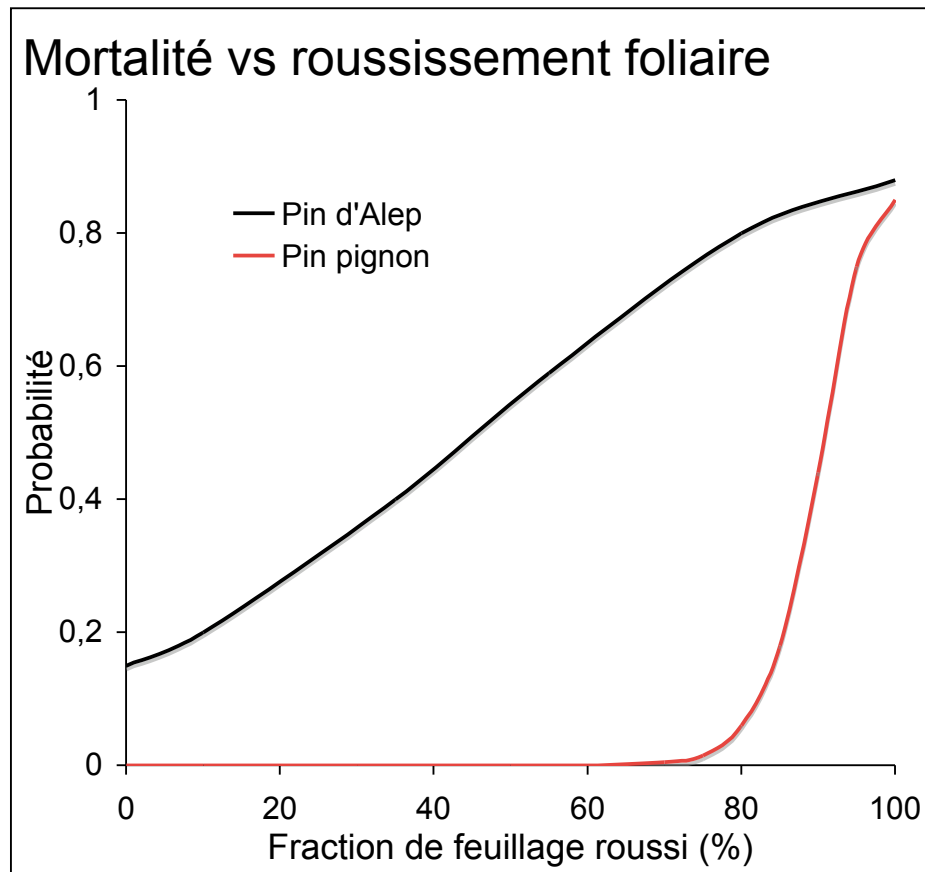
Pérennité des écosystèmes

Les stratégies d'adaptation des espèces permettent une bonne résilience dans les écosystèmes soumis au feu.

Exemple

Le pin d'Alep a une forte capacité de régénération après feu (sérotinie)

Le pin pignon « résiste » au feu



Pérennité des écosystèmes

Le feu ne menace pas tous les écosystèmes, il a des effets bénéfiques dans les milieux adaptés (ouverture et biodiversité).

Contre – exemple : incendie du mont Parnitha, Grèce, 2007

2000 ha de sapins de Céphalonie brûlés

Lutte contre l'érosion et reboisement nécessaire



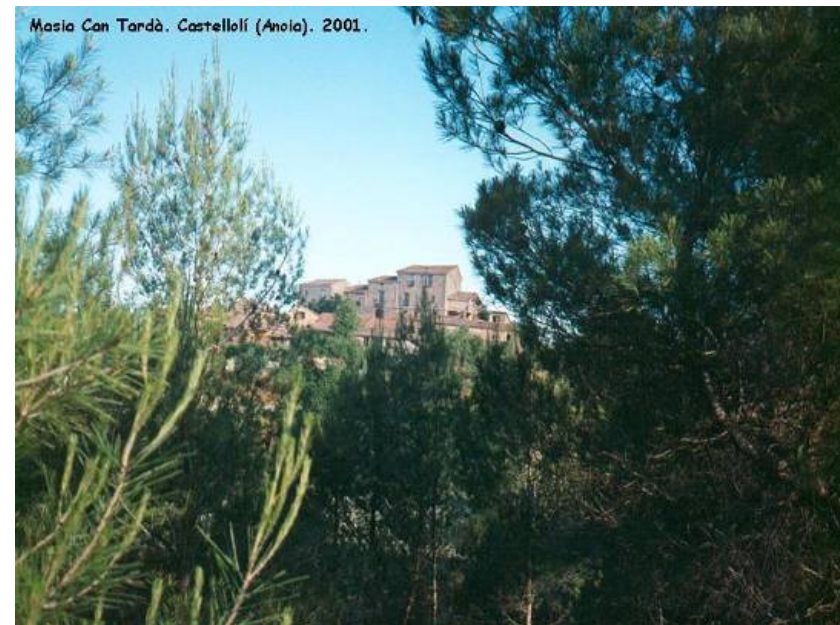
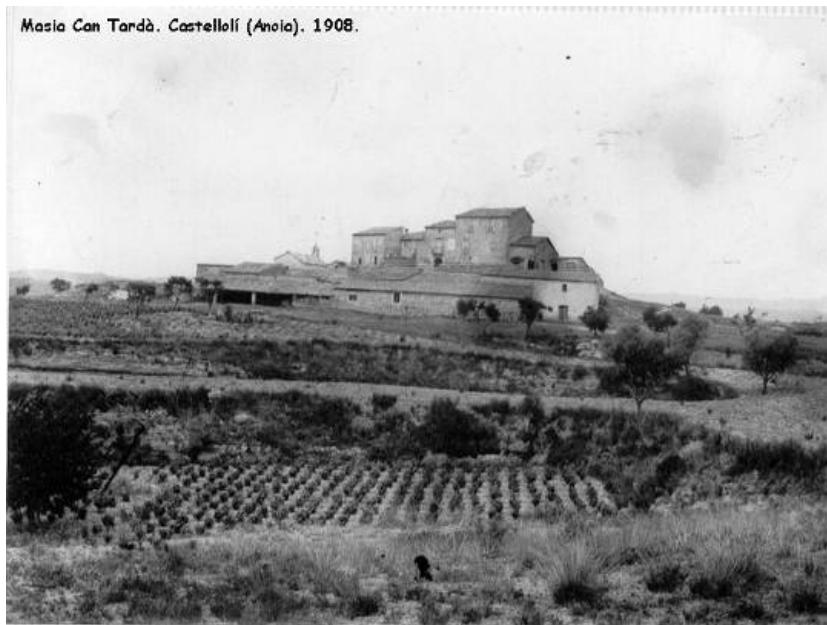
Source : Arianutsu et Kasanis, projet PHOENIX

Pérennité des écosystèmes

La condition de pérennité est la stabilité du **régime des feux**, i.e. : temps de retour, surface par évènement, saisonnalité, intensité.

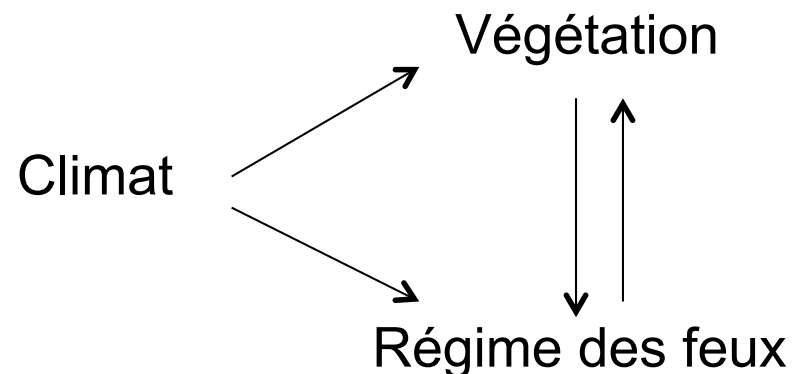
Les changements globaux affectent et vont affecter ces régimes.

Déprise rurale, enrichissement



Changement climatique

- Les projections prévoient des feux plus fréquents, plus sévères et des surfaces brûlées en hausse
Ex. Surface brûlée en Europe Méditerranéenne (Amatulli et al. 2013):
+66% (B2), +140 % de surface brûlées (A2) , (2070-2100)
- Les projections sont souvent réalisées sur la seule base d'indices climatiques
- Keane et al. (2013) : projections incluant les dynamiques de végétation et le régime des feux (5 modèles dans 5 écosystèmes soumis au feu)
⇒ le feu devient l'agent principal des changements de paysage en climat plus chaud dans les décennies à venir



Enjeux et impacts : conclusions

Aujourd'hui et à l'échelle globale, les incendies de végétation ont un faible impact sur les sociétés au regard d'autres risques naturels.

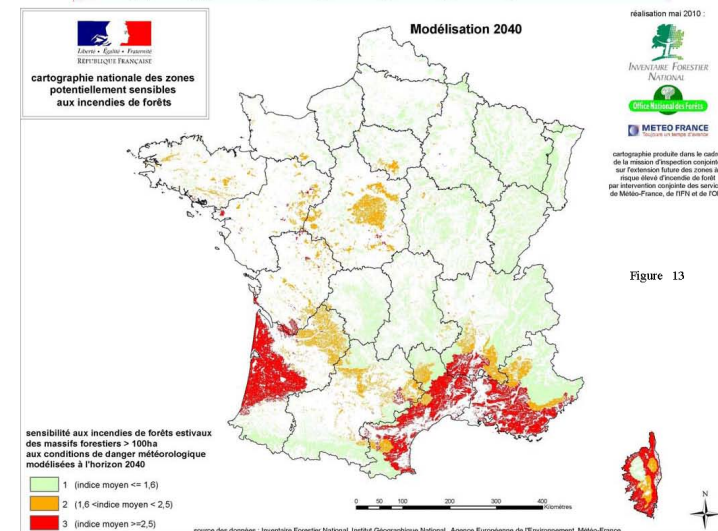
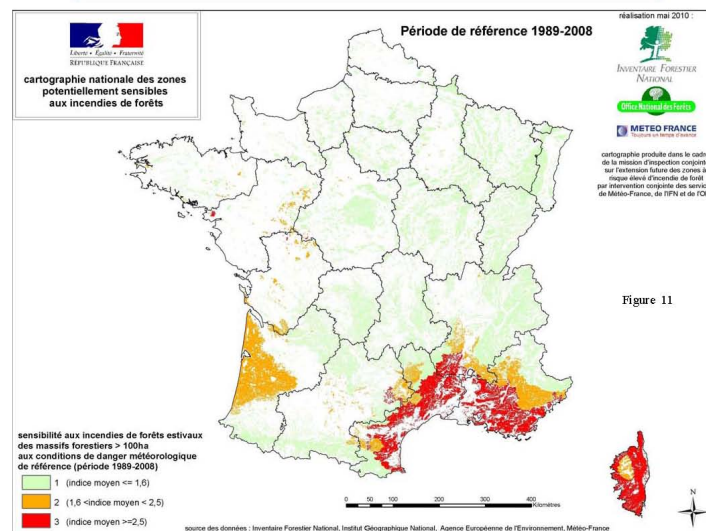
Parler de catastrophe est néanmoins légitime (perception) et justifié (observations) aux échelles locales ou régionales.

Les enjeux et les impacts changent et vont changer

- Enfrichement et urbanisation « en forêt » croissantes (ex EU-Méd.)
- Déplacement et extension probable des zones soumises aux incendies

Cartes de sensibilité au feu des forêts : actuelle → 2040

Chatry et al.
2010



De la gestion du risque à la modélisation des feux

Produire des connaissances et des méthodes pour évaluer et réduire le risque

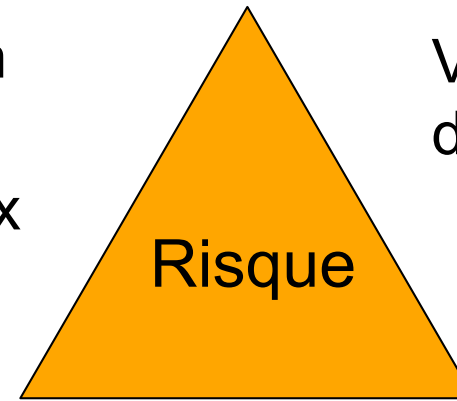
Les questions s'adressent aux sciences humaines autant qu'aux sciences de la nature.

Leviers d'action :

- Politique d'aménagement du territoire
- Education, sensibilisation des populations
- Changements de pratiques agricoles ou forestières
- Gestion des forêts et milieux naturels
- Mesures de prévention spécifiques (ouvrages de protection, débroussaillage, matériaux et modes de construction de l'habitat)

Exposition
et valeur
des enjeux

Vulnérabilité
des enjeux



Aléa

Probabilité d'occurrence X Intensité

Intensité : puissance, flux thermiques, émissions

Quelques questions concrètes

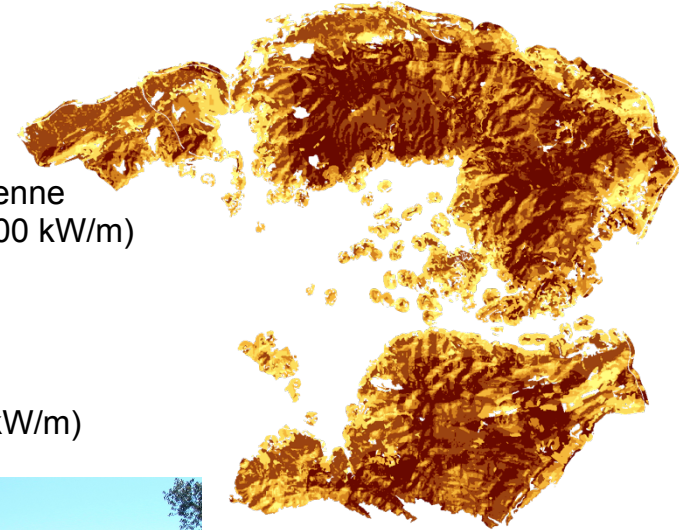
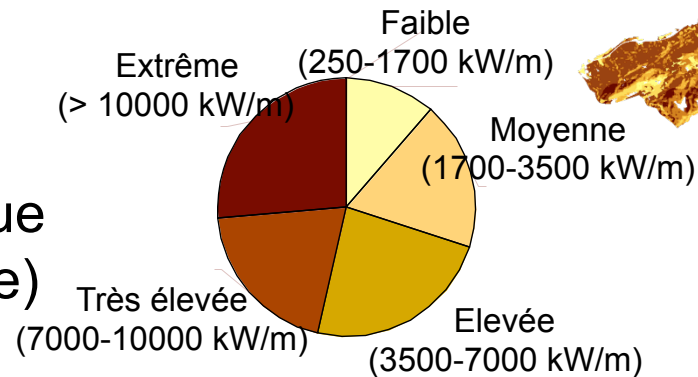
Cartes d'aléa : les méthodes existantes
sont-elles pertinentes ?

Ces cartes sont une base
essentielle de gestion du risque
(PPRIF, porter à connaissance)

Ouvrages de prévention :
Dimensionnement ?
Structure de végétation ?



PPRIF de Marseille (Agence MTDA)



Interface forêt habitat :

Impacts sur les maisons et les personnes ?
Efficacité de l'obligation légale de
débroussaillage ?

Quelques questions concrètes

Gestion forestière

Faut-il favoriser la fermeture du couvert ? Ou fragmenter le paysage ?

Ou favoriser certaines espèces ?

Quelle proportion de la surface traiter préventivement ?

Quels peuplements faut-il protéger en priorité (vulnérabilité) ?



Questions adressées à la recherche

Les savoirs accumulés apportent des réponses souvent fondées sur l'expérience (e.g. créer des végétations discontinues).



Mais ils ne permettent pas de « dimensionner » les actions en fonction d'un objectif de réduction du risque.

Les réglementations, *pour être mieux acceptées*, doivent être appuyées par une méthode de *mesure* des impacts attendus.

(constructibilité, débroussaillage, mesures de construction)

Exemple de questions nouvelles

Risque dans les peuplements forestiers déperissants ?

Les savoirs empiriques sont insuffisants.

Attaques d'insectes (E-U)



Sécheresse, ozone

Sapin (Vésubie)



Pin sylvestre (Haut-Var)



Modélisation du feu de la parcelle au paysage

Pourquoi la modélisation est-elle nécessaire ?

- L'expérimentation sur le terrain est limitée en nombre, surface et sévérité des conditions.
- Les situations à tester sont multiples.
- Les mesures et les observations sont difficiles

Quelles prédictions ?

- Type de feu (surface, cimes)
- Vitesse du feu, biomasse consommée, puissance du feu
- Températures, flux de chaleur

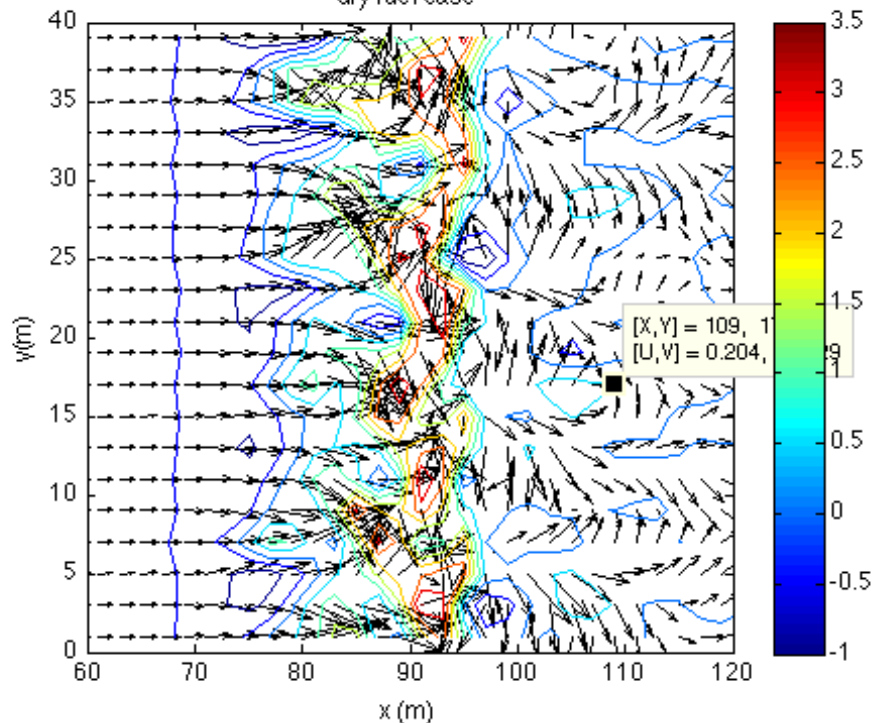
Approches

- Empiriques : développées par les services de recherche forestière essentiellement, depuis les années 60 (Etats-Unis, Canada, Australie).
- Physiques : limitées par les capacités de calcul jusqu'aux années 90 ... et par la complexité du phénomène

Les processus physiques en bref

Modèles physiques avant ~1995 :
Calcul de transfert thermique avec
source de chaleur donnée.

Ecoulements simulés autour d'un feu
vue de dessus
dry fuel case



Mécanisme de propagation



Combustion et transfert thermique
couplés à la dynamique atmosphérique,
qui résulte de l'interaction du vent
ambient, de la topographie, du couvert
végétal et du feu

Modèles empiriques et simulateurs opérationnels

Modèles de propagation empiriques

Vitesse locale du feu = F(Vent, Pente, Combustible)

Relation statistique établie sur un jeu de données expérimentales ou d'incendies – Problèmes de confusions d'effets (combustible)

Exemples

Modèle australien (Grassland)

Paramètres d'entrée :

- Vitesse du vent **U**
- Teneur en eau **M**
- Pourcentage Sec/Vert **C**

Formulation :

$$V = (a+b \cdot (U - 5)^d) \cdot f(M) \cdot g(C)$$

(Cheney et al 1998, 480 observations)

Modèle portugais (Shrubland)

Paramètres d'entrée :

- Vitesse du vent **U**
- Hauteur de végétation **H**
- Teneur en eau M_v

Formulation :

$$V = a \cdot U^b \cdot H^c \cdot \exp(-d \cdot M_v)$$

(Fernandes 2001, 29 observations)

Puissance du feu (kW/m) = Chaleur de combustion

X Biomasse consommée

X Vitesse du feu

Biomasse consommée ? au moins les éléments fins (< 6 mm)

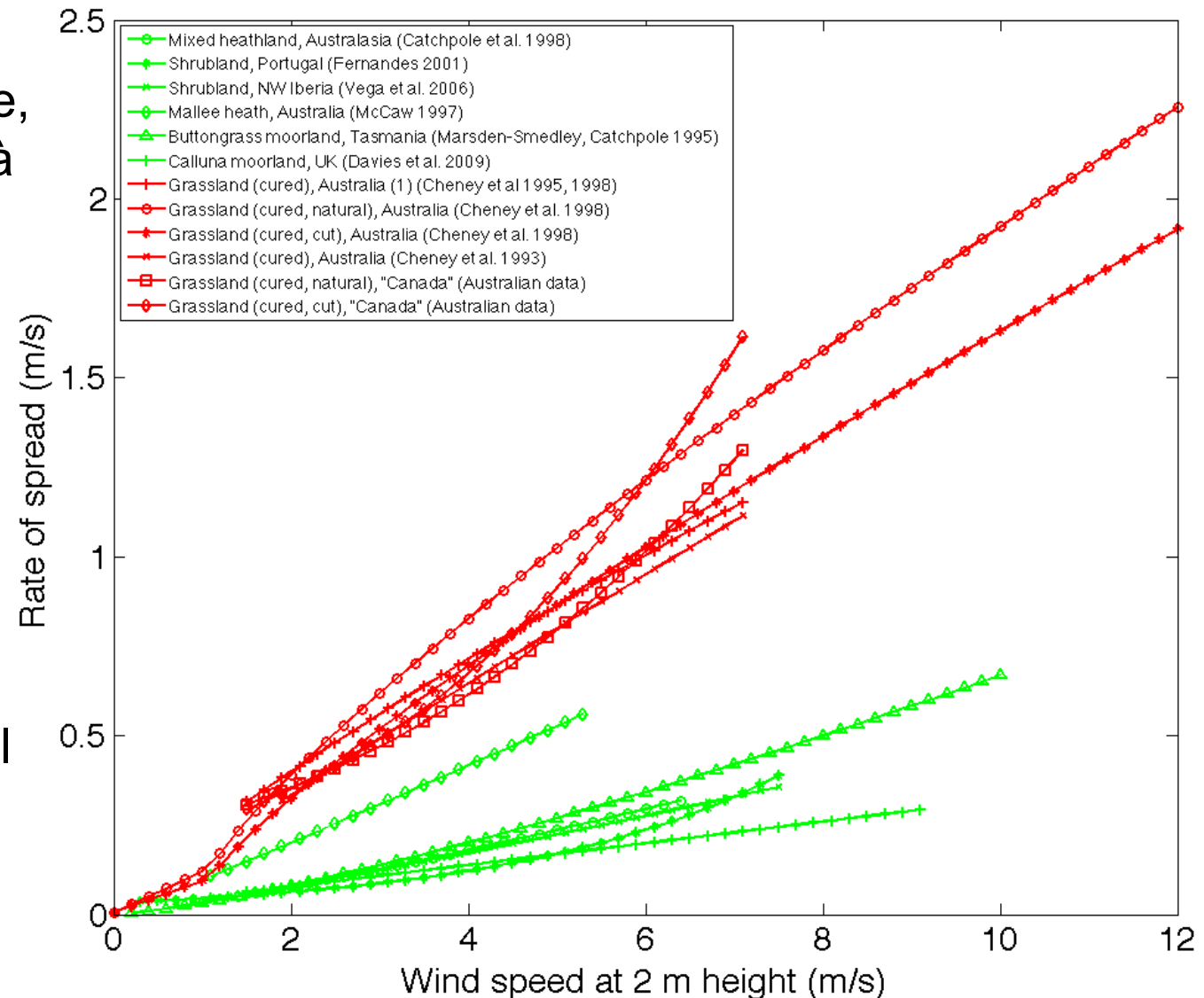
Modèles de propagation empiriques

Vitesse du feu (m/s) en fonction du vent (m/s) en milieux ouverts (« **Grassland** » et « **Shrubland** »)

Pour chaque modèle, le vent explique 50 à 80 % de la variance observée (hors topographie)

Le teneur en eau du combustible mort : De 10 à 25%

Lois ~linéaires au-dessus d'un seuil de vent



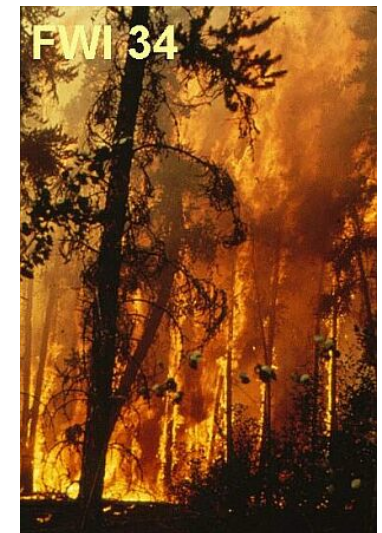
Modèles de propagation empiriques

Cas des milieux arborés

Le feu de surface embrase-il les arbres ? Dans quelles proportions ?

Forme-t-il un front continu ?

Des critères empiriques existent (ex. modèle des services forestiers canadiens)



Exemple : critère d'inflammation des cimes (Van Wagner 1977)

Puissance du feu de surface permettant l'inflammation du feuillage à la base des arbres

$$P_0 = \left(C h_b q_{ig} \right)^{3/2}$$

h_b hauteur de base du feuillage, q_{ig} chaleur d'inflammation

C estimé sur la base de trois feux dans un type de peuplement

L'exposant vient de la théorie des panaches.

Les modèles de Rothermel (« semi-empiriques »)

USDA Forest Service

Vitesse du feu de surface : modèle de Rothermel (1972)

- Etabli sur une série d'expériences de laboratoire dans des litières et couches de combustibles artificiels de propriétés uniformes:
 - 1- sans vent ni pente : $V = V_0$ (combustible)
 - 2- avec vent et pente : $V = V_0 (1 + \text{effet vent} + \text{effet pente})$
- Prédit aussi la **puissance du feu P**
- La couche de combustible est décrite par ses propriétés physiques importantes (hauteur, densité, teneur en eau, surface spécifique,...).
- Le modèle permet *toujours* de réaliser une prédiction si le combustible est physiquement décrit et assimilé à une couche uniforme.

Vitesse du feu de cime : modèle de Rothermel (1991)

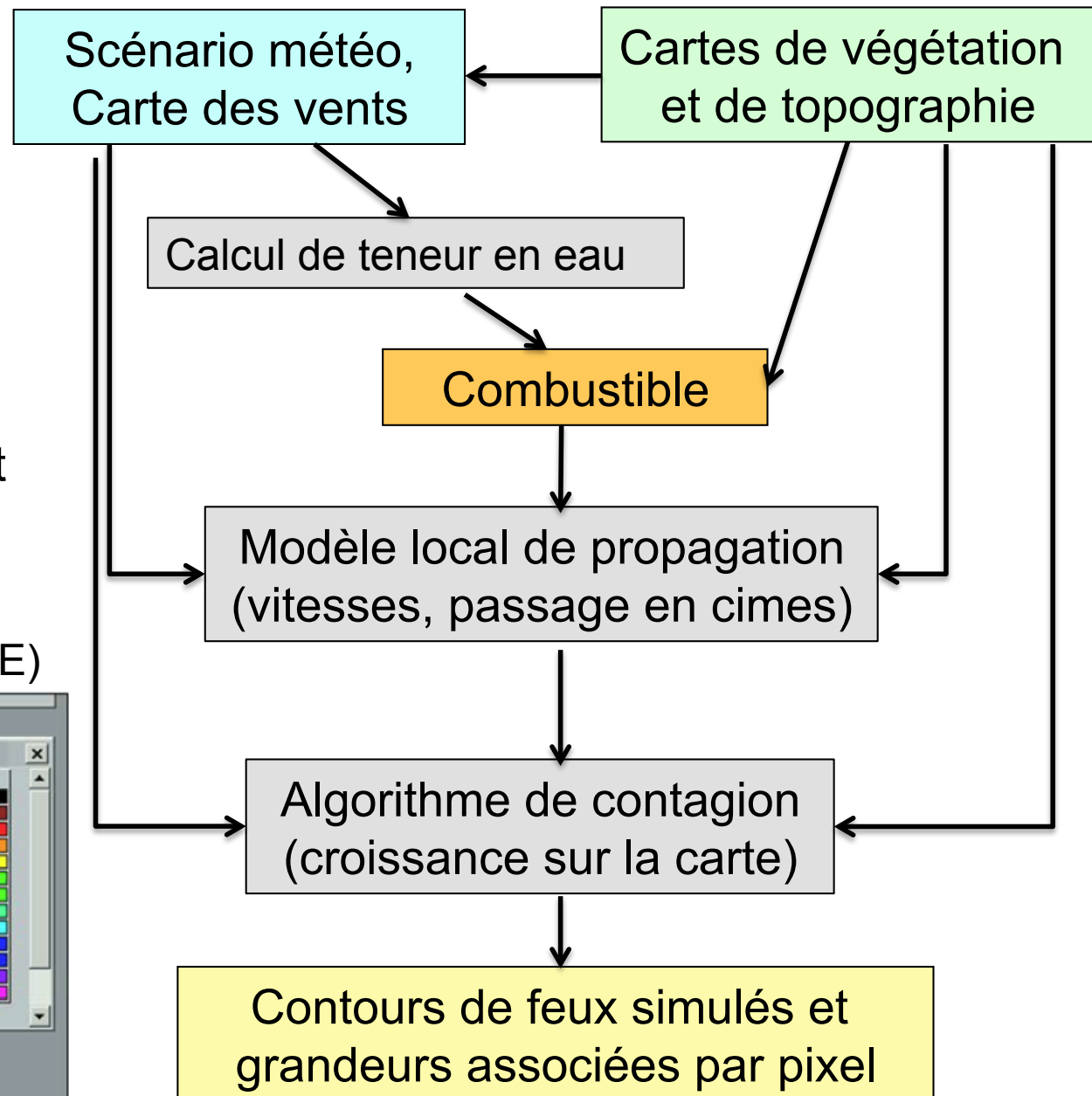
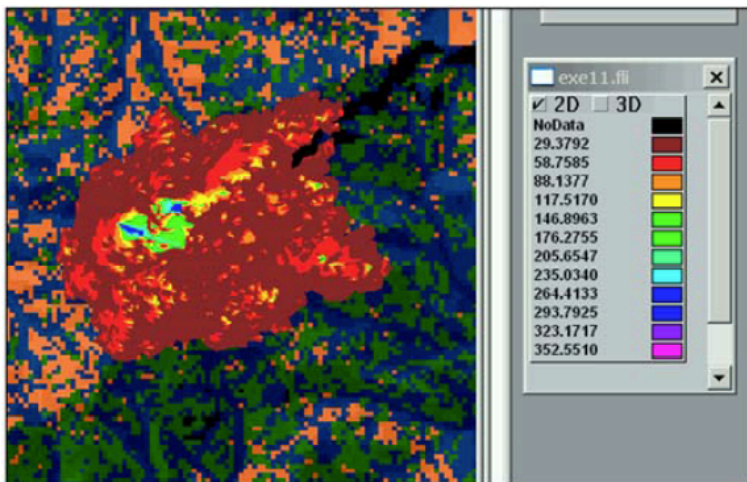
Rothermel observe une corrélation entre la vitesse de 7 feux de cimes (incendies) et la vitesse prédite par le modèle de 1972 dans un type de combustible particulier (litières et rémanents d'exploitation)

Principe des simulateurs de feu opérationnels

La carte des vents est pré-calculée sans feu (le feu n'influence pas le vent à l'échelle du pixel)

Modèles locaux les plus utilisés :
Rothermel (1972, 1991) et critère d'inflammation de Van Wagner (1977).

Carte de puissances (FARSITE)

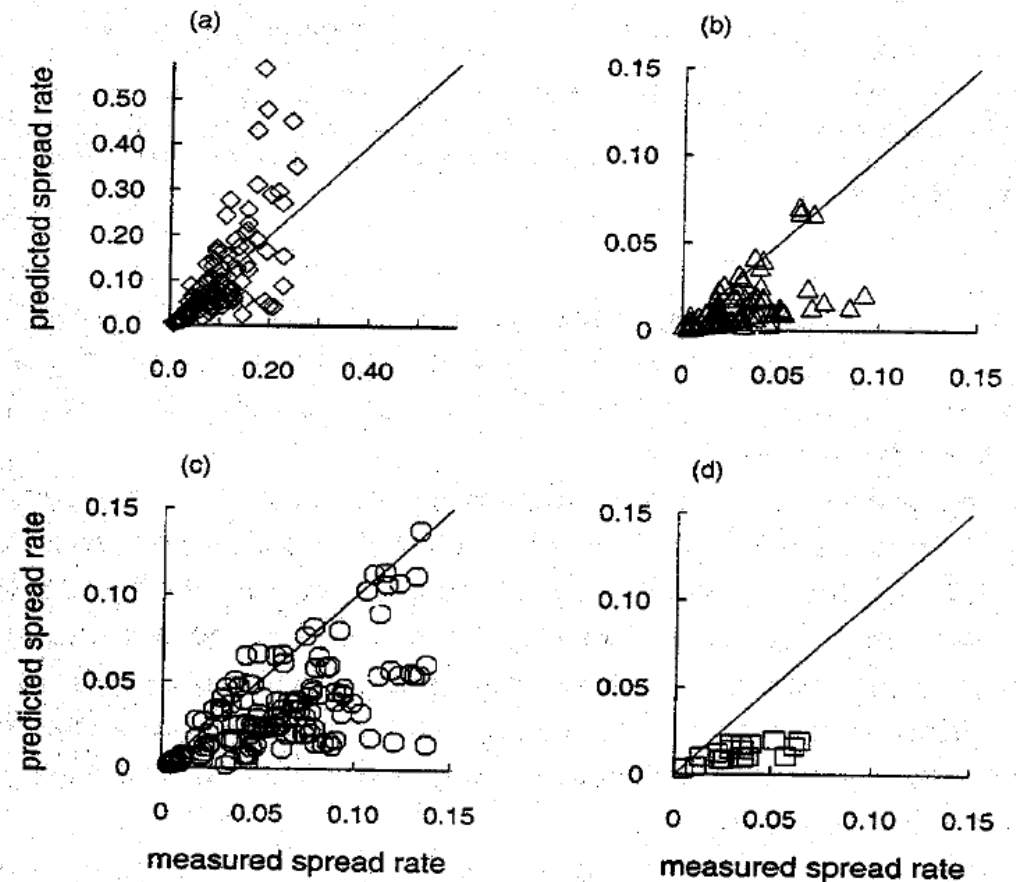


Pertinence du modèle de Rothermel 1972

Modèle incorporé à de très nombreux systèmes de prédiction, incluant les simulateurs opérationnels tel FARSITE

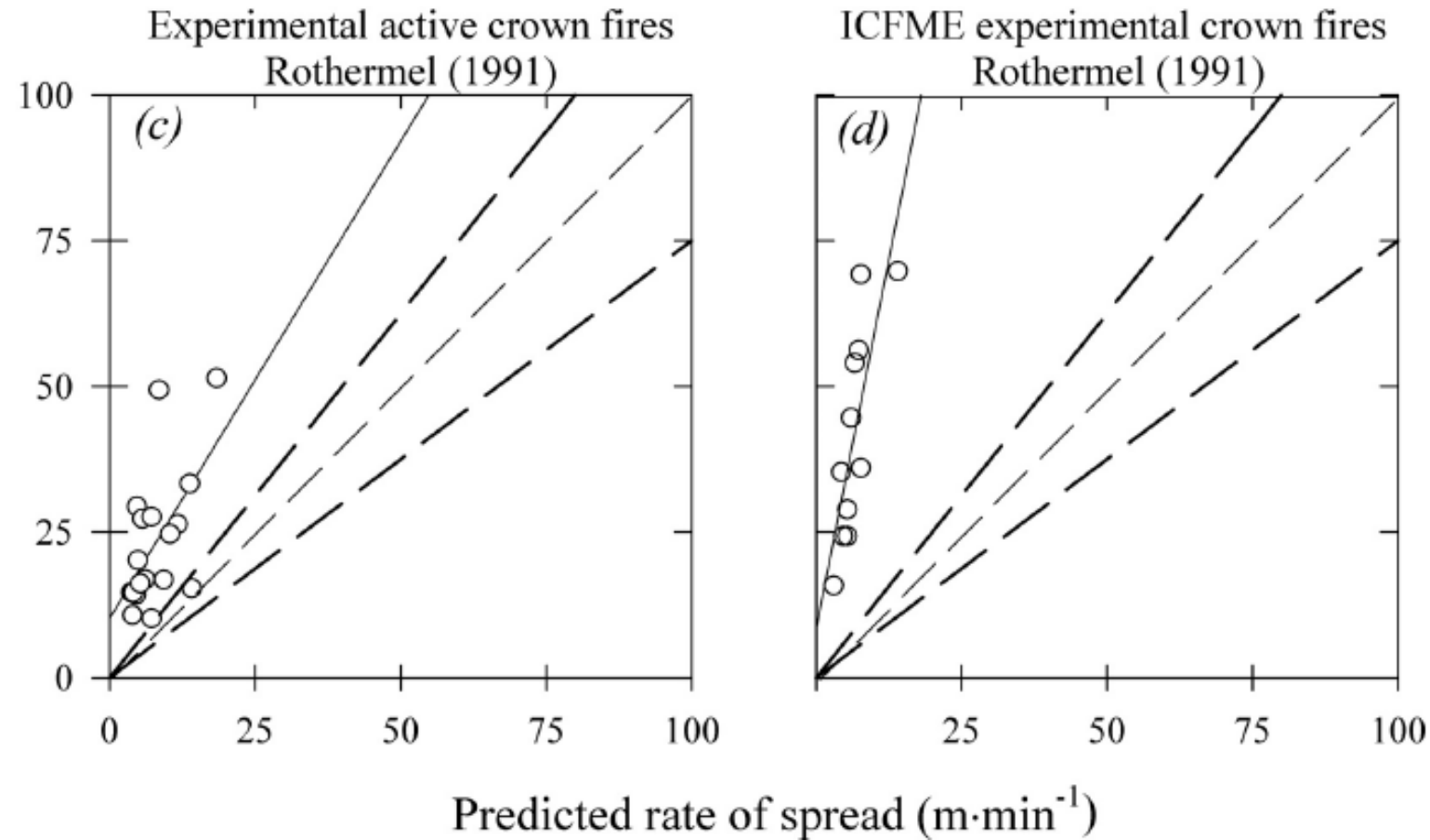
Des centaines d'études scientifiques l'ont utilisé, souvent hors de ses limites de validité *a priori*, malgré de nombreuses preuves de performance médiocre face aux observations.

Catchpole et al. (1998) montrent la mauvaise qualité des prédictions du modèle pour des feux conduits dans les mêmes conditions de laboratoire qu'en 1972 (347 feux)



Pertinence du modèle de Rothermel 1991

Vitesses de feux de cimes observées vs prédites (Rothermel 1991)
(d'après Cruz et al. 2005)

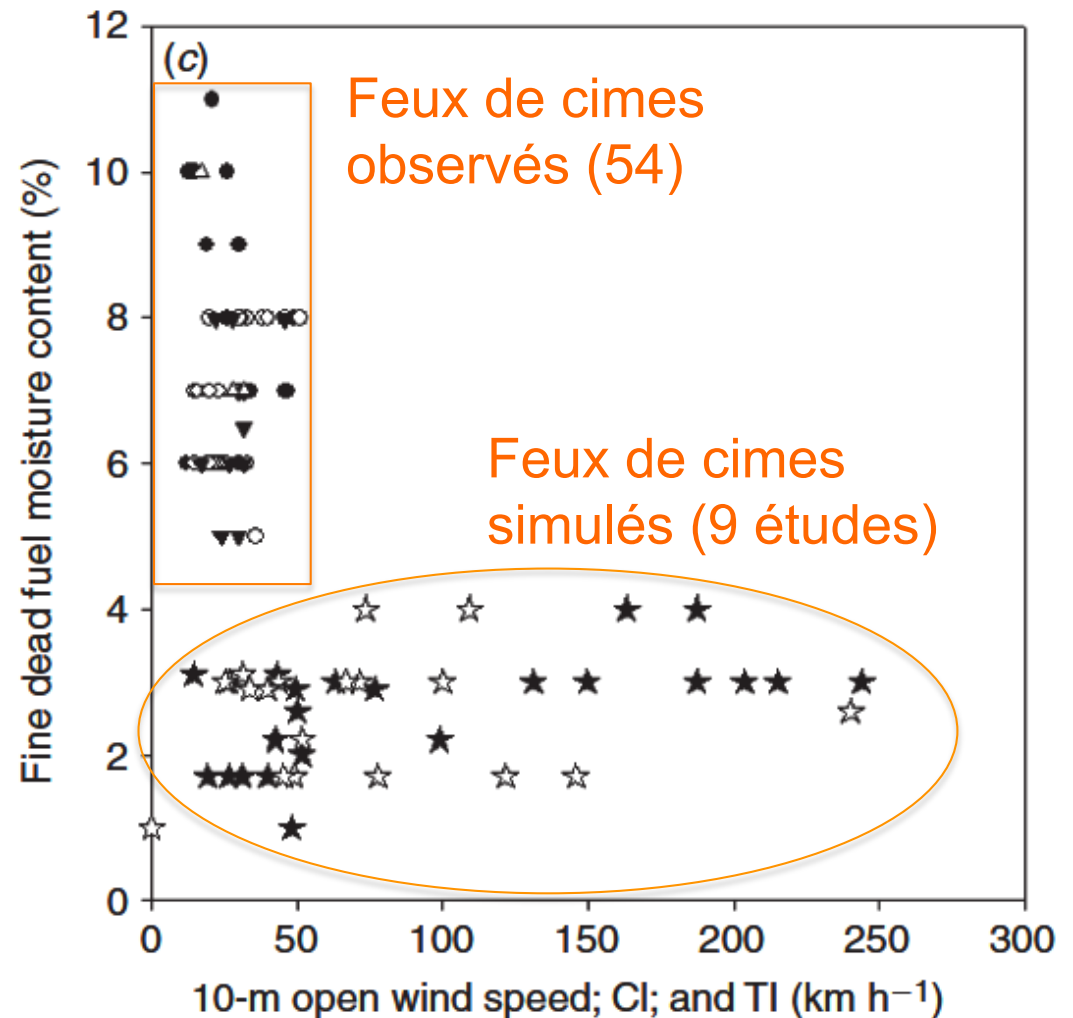


Prédiction du potentiel de feu de cimes

Les modèles de Rothermel (1972, 1991) et le critère de Van Wagner (1977) sont combinés pour évaluer par simulation des modes de gestion forestière visant à atténuer le risque de feux de cimes

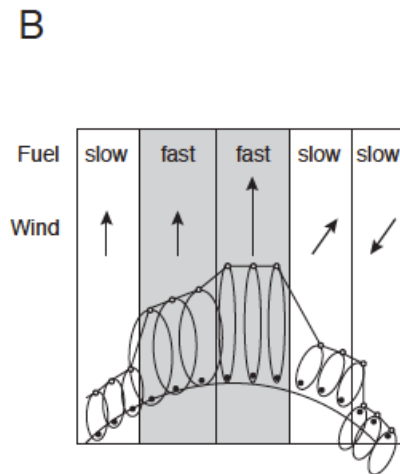
Niveaux de teneur en eau du matériel mort (%) et de vent (km/h) permettant le développement de feux de cimes

Les modèles sont en cause, mais aussi leur incompatibilité

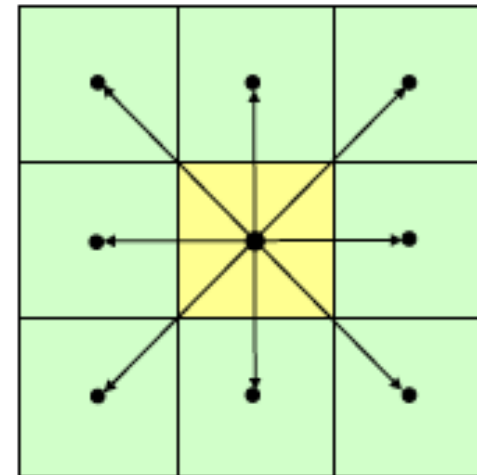


Principes des algorithmes de contagion

Mode vectoriel
(principe de Huygens, FARSITE)



Mode raster
(temps de passage)



Combinaison des effets du vent et de la pente sur la vitesse du feu

En module, ces effets sont supposés :

- additifs (modèle de Rothermel)
- ou multiplicatifs (modèles empiriques)

En direction, ces effets sont soit :

- combinés pour déterminer le grand axe de l'ellipse
- projetés sur les directions de propagation scrutées

Principes des algorithmes de contagion

Seules les conditions *locales* déterminent la propagation du contour
i.e. la puissance et les dimensions du feu n'influencent pas sa propagation
(des corrections empiriques existent cependant)

Les effets de pente donnent des formes de feu similaires
aux effets du vent (forme « arrondie » de la tête du feu)

Observations

Effet de dimension initiale



Photograph from "Grassfires" by P. Cheney and A. Sullivan

Formes de feu
en pente



Photograph from Gestosa experiments, Portugal

INRA / CNRS



Couplage d'un modèle atmosphérique avec un modèle local de vitesse du feu

Modèles couplés feu - atmosphère

Principe

Le vent est calculé par un modèle atmosphérique sur un maillage 3D

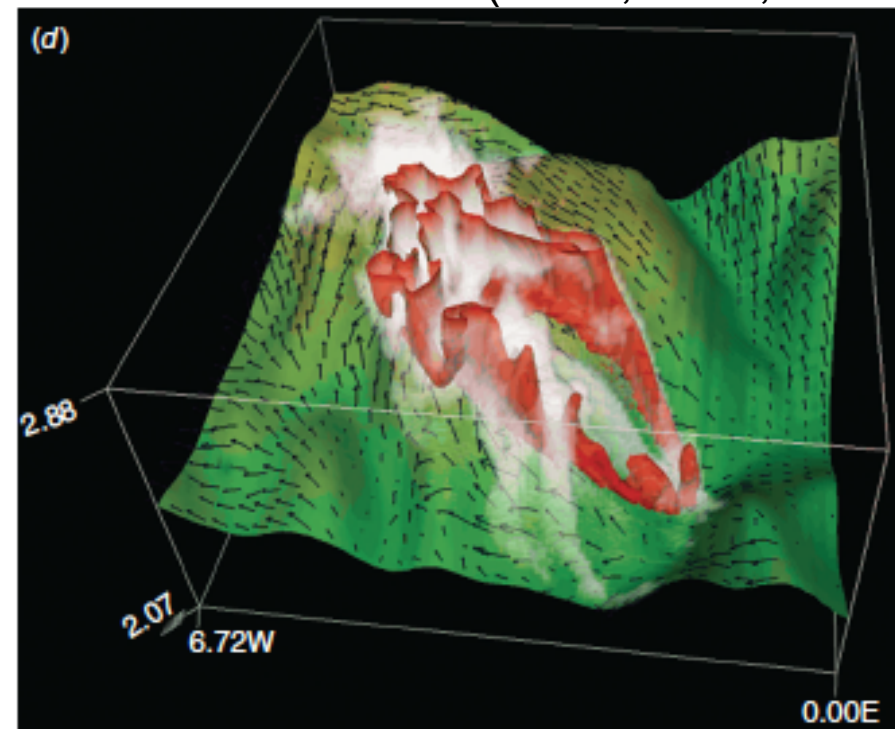
Le vent « au sol » est une entrée d'un modèle de vitesse locale du feu.

Un algorithme fait avancer la ligne de feu au cours du temps

Le feu injecte de la chaleur dans l'atmosphère, modifiant le vent

- Clark et al. (1996, NCAR, US)
premier modèle 3D
- Depuis :
 - WRF – Fire (NCAR, US)
 - UU LES-Fire (Utah-University)
 - MésoNH – ForeFire (CNRS
Toulouse, Université de Corse)
- Techniques d'emboîtement de domaines, maillages différents pour le feu (surface) et l'atmosphère

Simulation d'incendie (Coen, 2005, NCAR)



Rouge : isosurface $\Delta T=10^{\circ}\text{c}$


Modèles dits couplés feu - atmosphère

Illustration d'un effet de rétroaction du feu sur le vent
(UU LES-Fire, Sun et al. 2009)

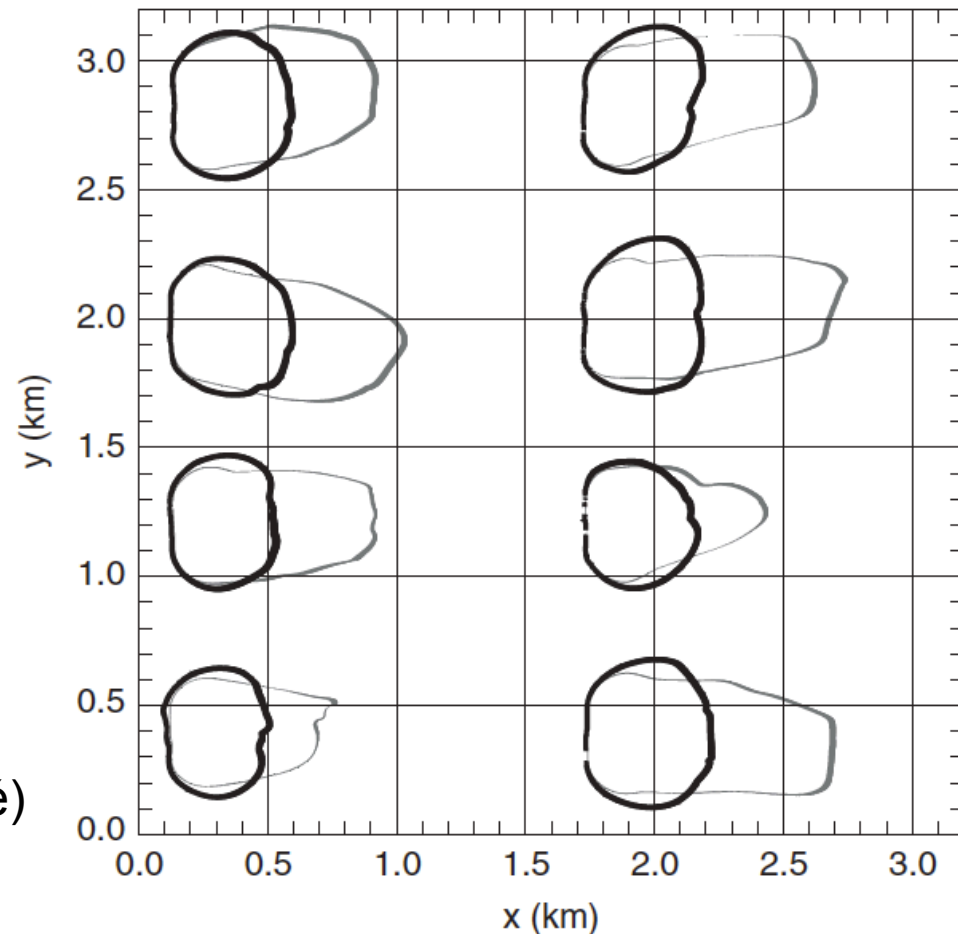
En gras: le feu ne rétroagit pas sur l'atmosphère

Avec rétroaction, les formes de feu sont plus réalistes

La croissance du feu change avec la position dans le domaine (forte turbulence du champ de vent en conditions convectives)

Vent (modéré)


Maillage : x,y: 10 x 10 m, z: 5 m au sol
 Domaine : 3,2 x 3,2 x 2 km



8 feux simulés dans une couche limite convective

Modèles dits couplés feu - atmosphère

Atout : simulation de grands feux en temps réel (prévisions) , ou multiples simulations de scénarios de feux (projections)

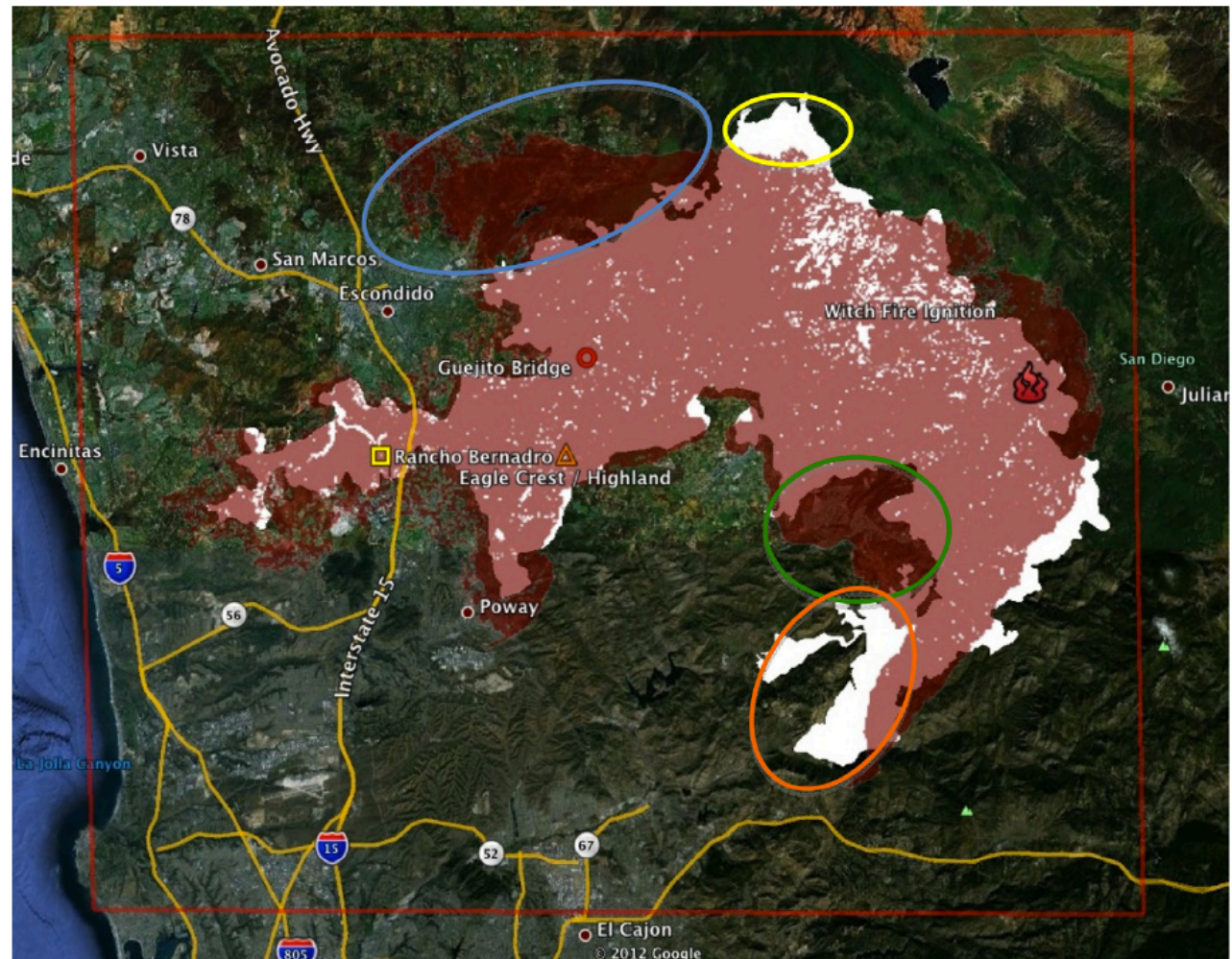
Simulation WRF – Fire des incendies de Santa-Ana (2007) :

- temps réel 72h,
- temps calcul 5 h sur 120 cœurs
- Domaine 32 X 32 km
- Résolution modèle atmosphérique : 500 m
- Résolution données et feu ~ 20-30 m
- Modèle feu : Rothermel

Forte sensibilité du périmètre à la prévision de vent (cumul d'erreur)

(Kochanski et al. 2013)

Aire parcourue par le feu - rouge observé, blanc simulé



Modèles dits couplés feu - atmosphère

Limites : les questions de fond sont-elles résolues ?

- Qualité du modèle local
- Profil d'injection
- Vent et maillage atmosphérique

Modèle local de feu :

Vitesse feu = $f(\text{Vent ambiant})$

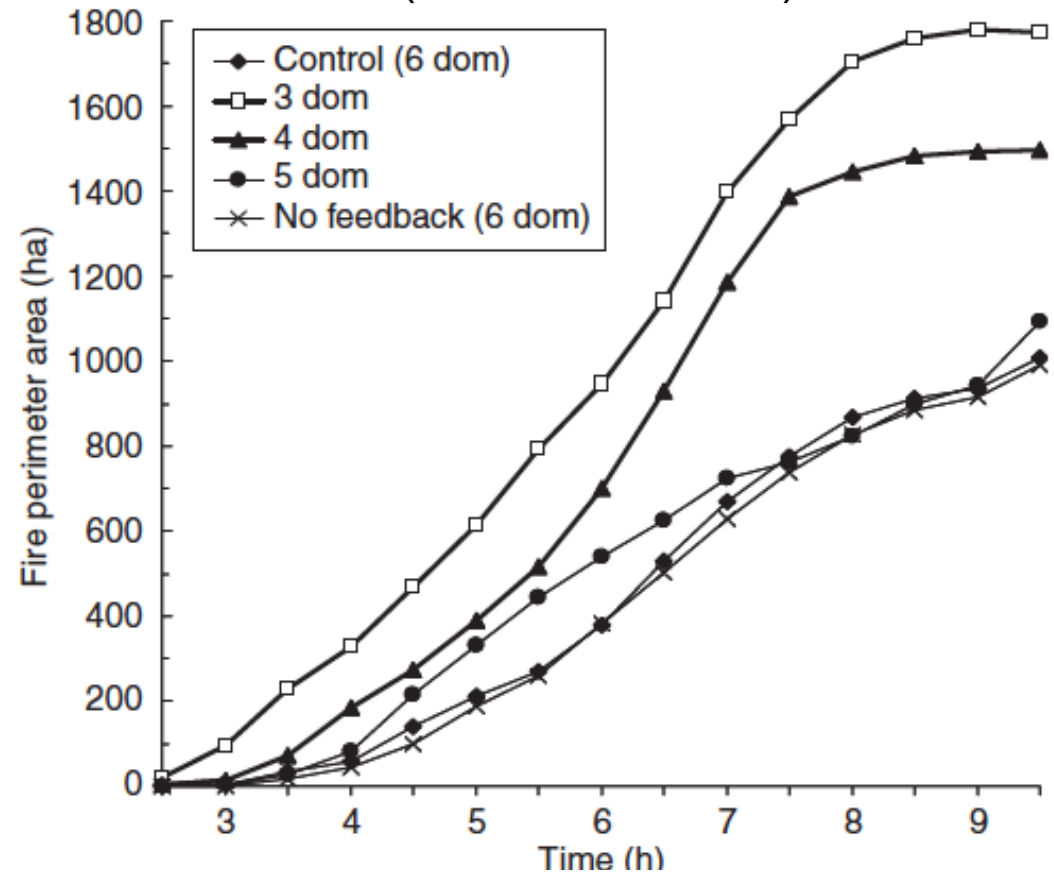
Couplage :

Vitesse feu = $f(\text{Vent modifié par le feu})$

Plus le feu est puissant ou la maille petite, plus le vent est modifié.

Plus la maille est grande, plus on perd en précision (effets de rugosité et de topographie sur le vent)

Surface brûlée vs temps : 4 maillages différents (Coen et al. 2005)



Experiment	N	Spacing (m)	Height (m)
Control	6	41	18
No feedback	6	41	18
3DOM	3	1111	83
4DOM	4	370	37
5DOM	5	123	18

Modélisation physique aux échelles de la parcelle au paysage

Modélisation physique du feu

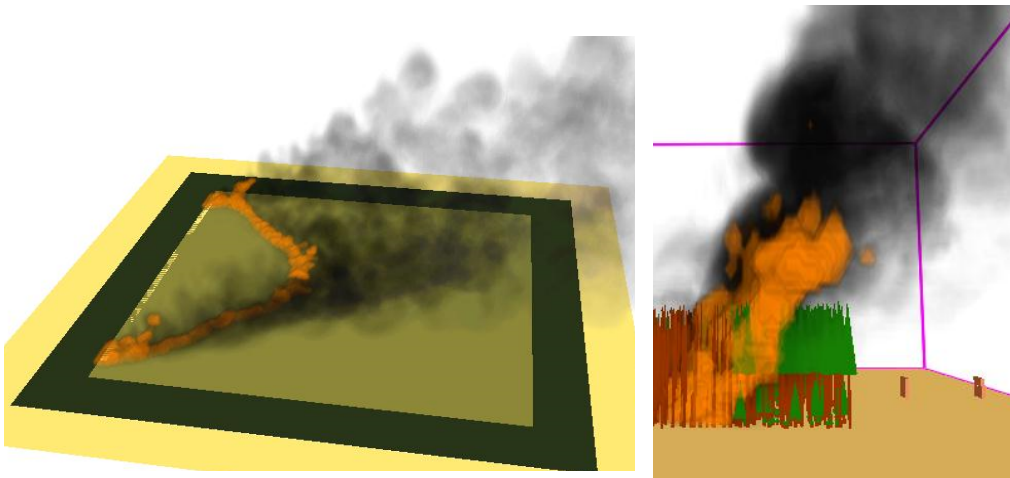
Principe

- Equations de bilan de matière, de quantité de mouvement et d'énergie pour le gaz et la végétation, couplant l'ensemble des processus physiques
- Résolution numérique au cours du temps dans un domaine spatial discrétisé

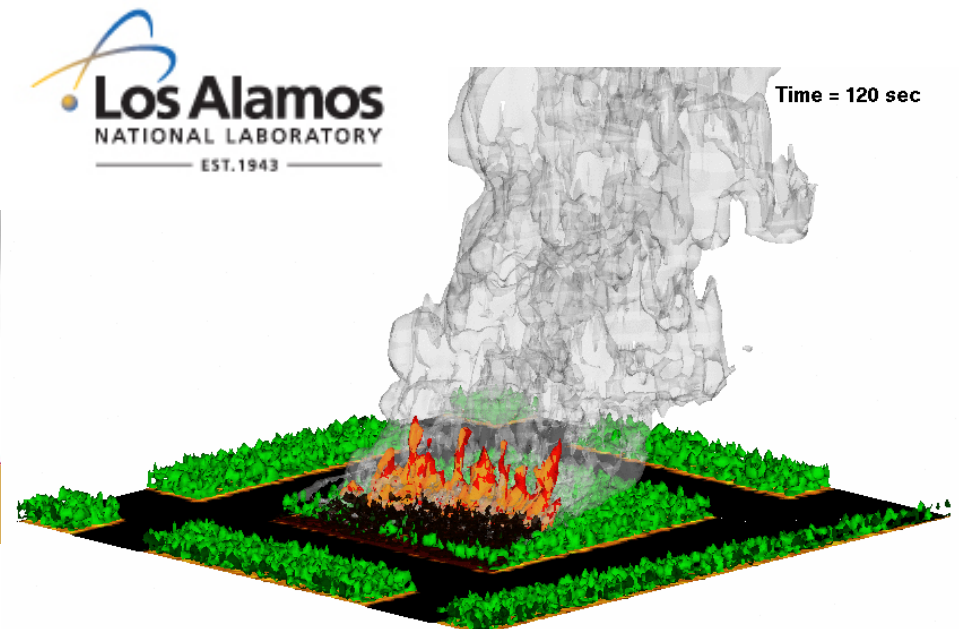
Deux modèles aux échelles de la parcelle au paysage

WFDS développé au NIST,
puis à l'USDA Forest Service

FIRETEC, développé au LANL,
et à l'INRA depuis 2005



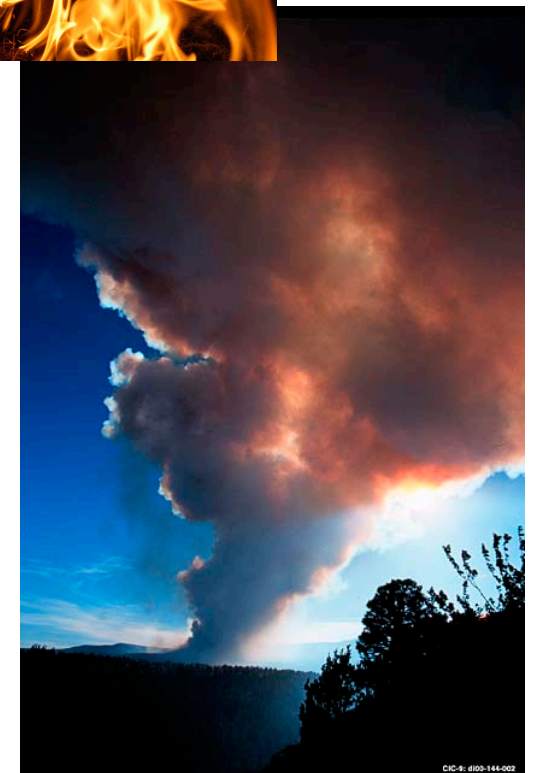
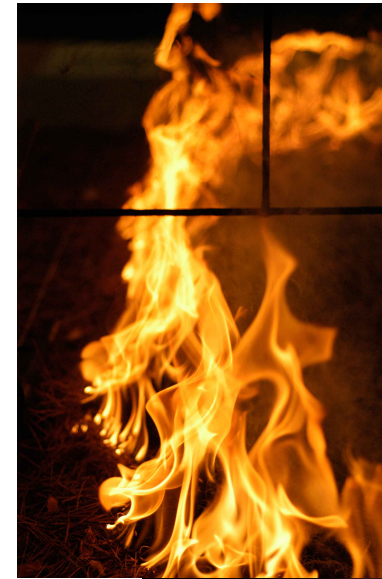
Images fournies par Rudy Mell



Modélisation physique du feu

Défis scientifiques

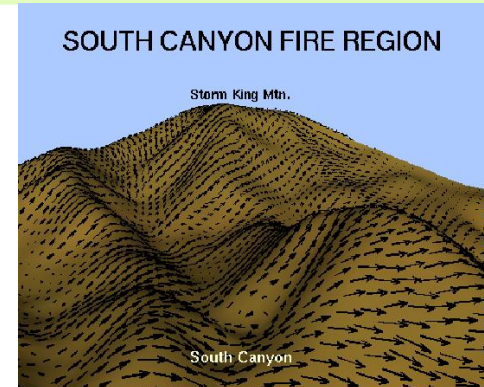
- Large gamme d'échelles spatiales
 - Flamme - Dynamique du panache
 - Combustible (feuilles au peuplement d'arbre)
 - Circulation atmosphérique
- Processus physiques complexes et couplés
 - Pyrolyse, Combustion
 - Transferts thermiques (rayonnement, convection)
 - Dynamique atmosphérique
- Conditions initiales et aux limites mal connues
 - Combustible (état initial)
 - Fluctuations de vent (conditions aux limites)
- Manque de données physiques sur le phénomène



Modélisation physique du feu : FIRETEC

Conditions de calcul typiques

- Domaines : x,y :300-1200 m, z: 600-1200 m
- Résolution spatiale au sol : 2 x 2 x 1.5 m
- Résolution temporelle : 0.01 s
- Temps calcul d'un feu : 250 – 32 000 h cpu



Processus résolus explicitement (échelle > maille):

- Advection par l'écoulement moyen des quantités (code atmosphérique compressible HIGRAD)
- Transfert radiatif

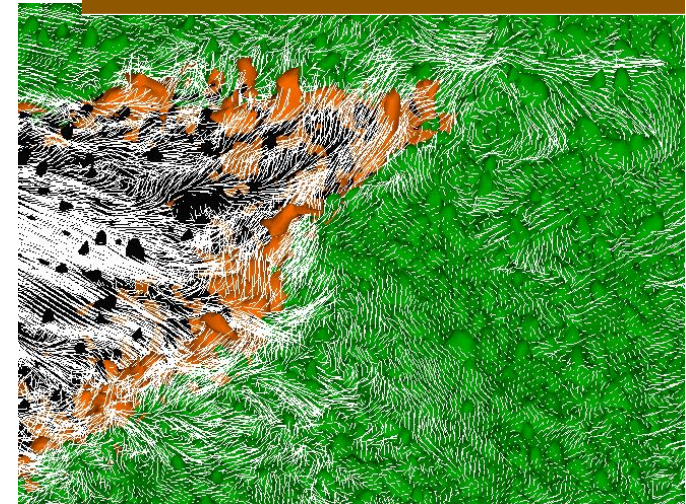
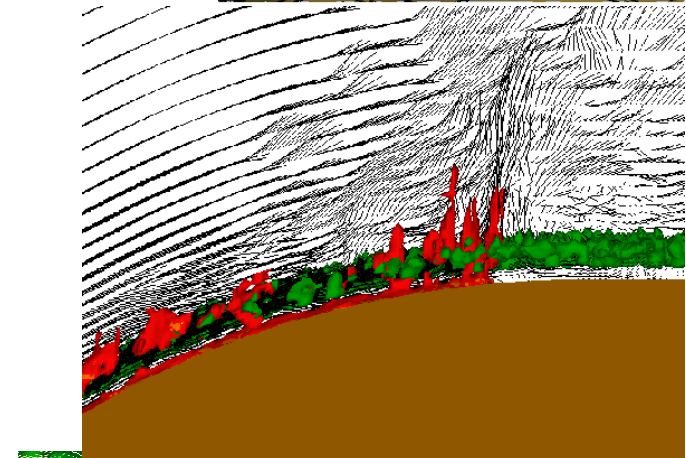
Processus modélisés ou de sous-maille :

- Mélange et combustion
- Echanges solide / gaz
- Turbulence de petite échelle (< maille)

Exemple de processus modélisé :

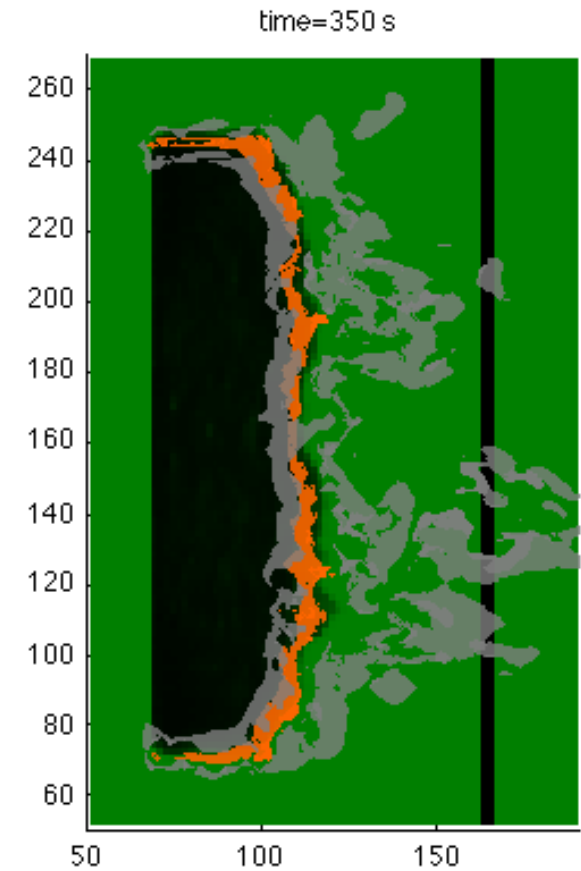
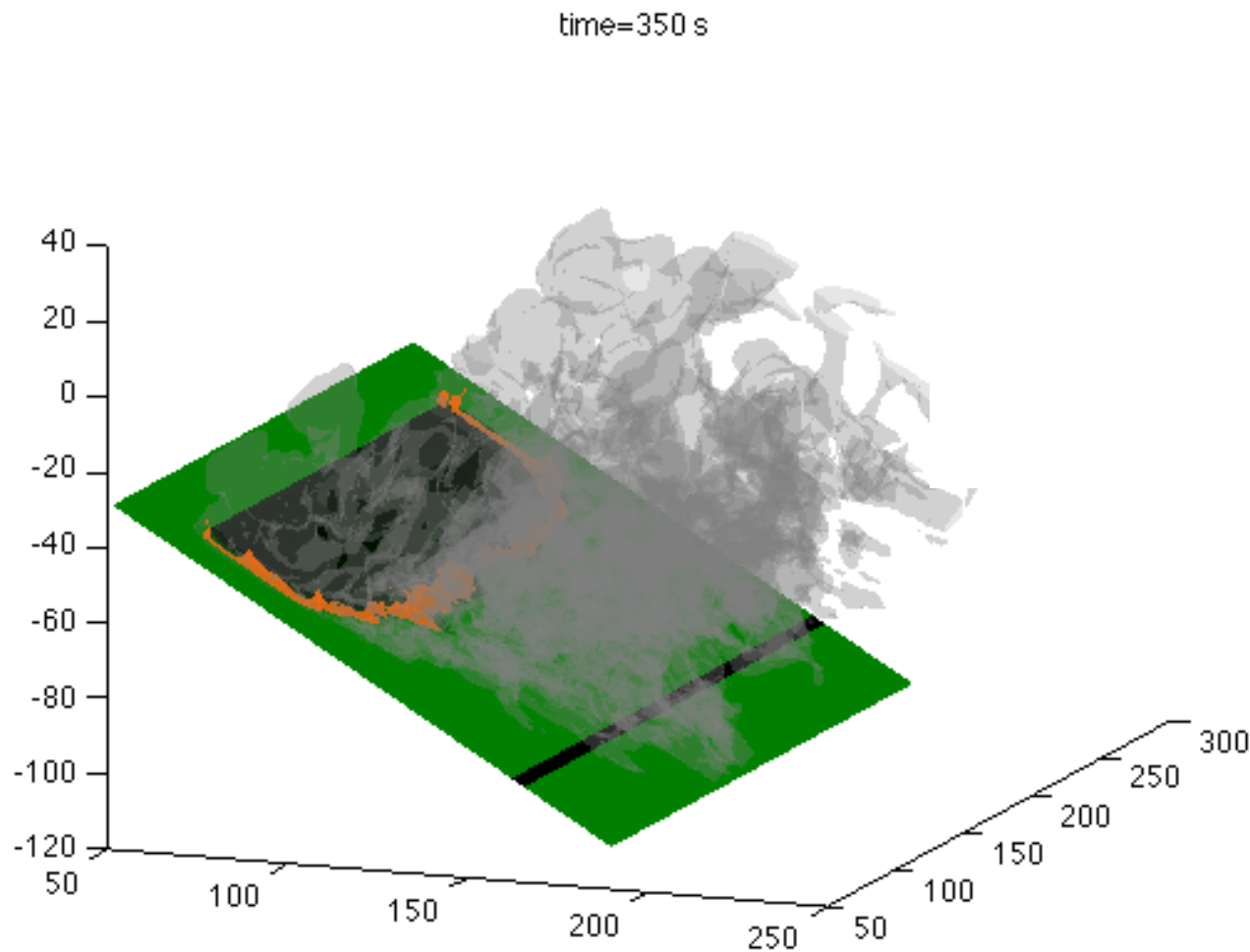
Combustible solide + Oxygène → Produits

$$\text{Taux de combustion: } \omega \propto \frac{\rho_f \rho_{O_2}}{\tau_c} F(T_s)$$



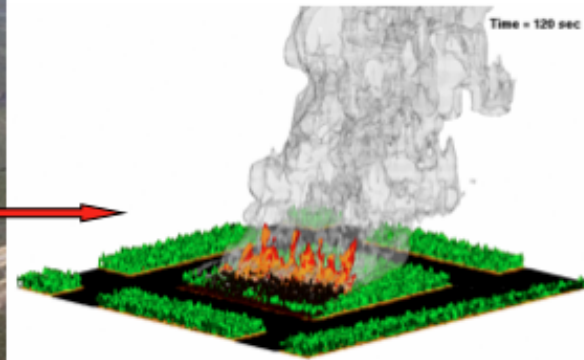
Vents induits par le feu

Simulation d'un contre feu par vent faible (Formation herbacée)



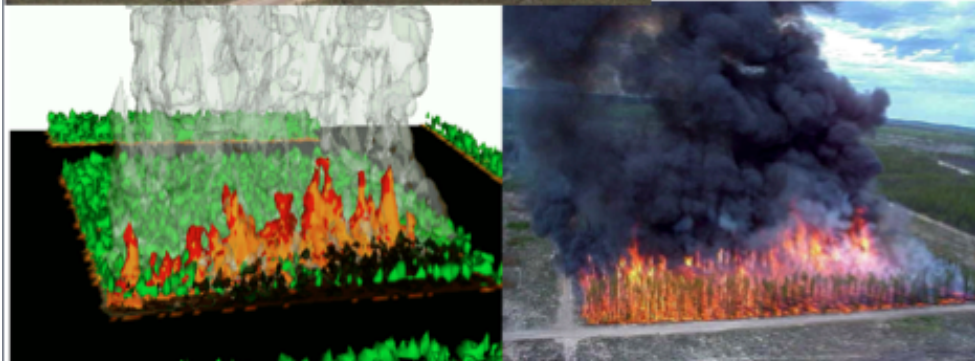
Dupuy, Pimont et al. (2011)

Simulations FIRETEC de l'ICFME



International Crown Fire Experiment

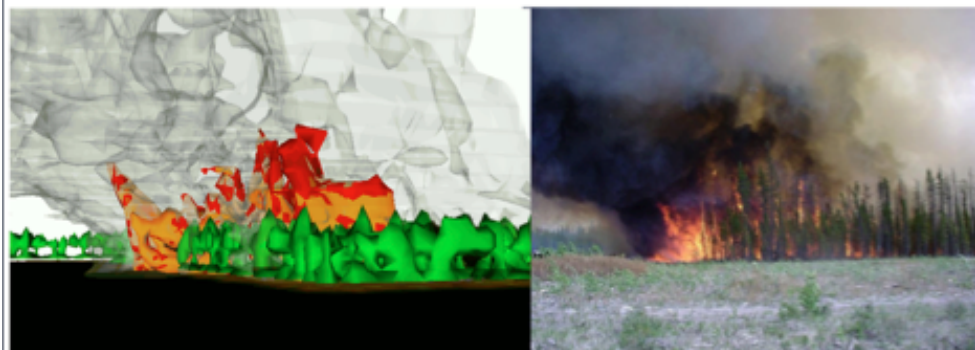
Linn *et al.* 2005, 2012



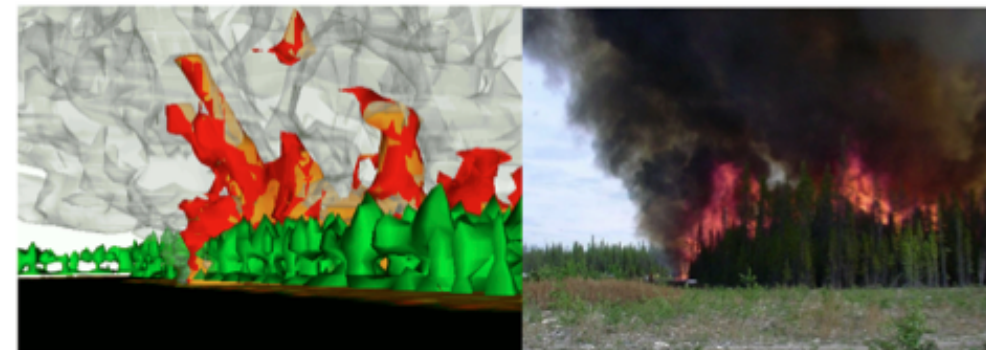
SIMULATION IMAGE AND PHOTOGRAPH FROM THE SOUTH



SIMULATION IMAGE AND PHOTOGRAPH FROM THE NORTHWEST



SIMULATION IMAGE AND PHOTOGRAPH FROM THE NORTHWEST
Photographs courtesy of Natural Resources Canada ICFME website



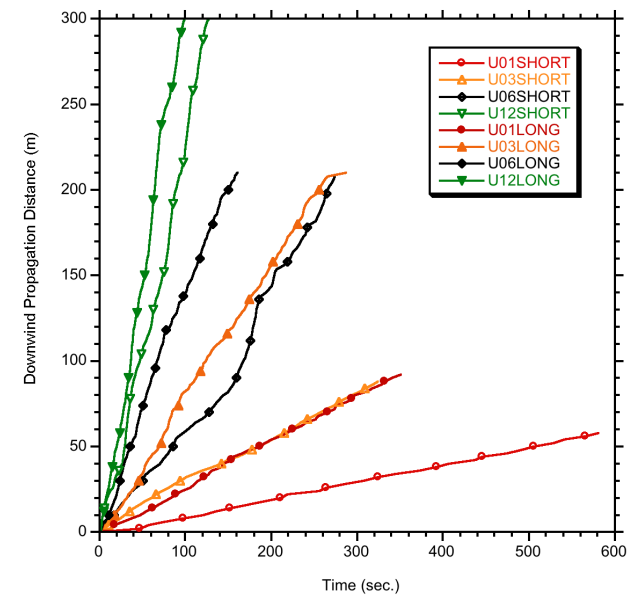
SIMULATION IMAGE AND PHOTOGRAPH OF THE NORTH
CORNER

Simulations de l'effet de la taille du feu



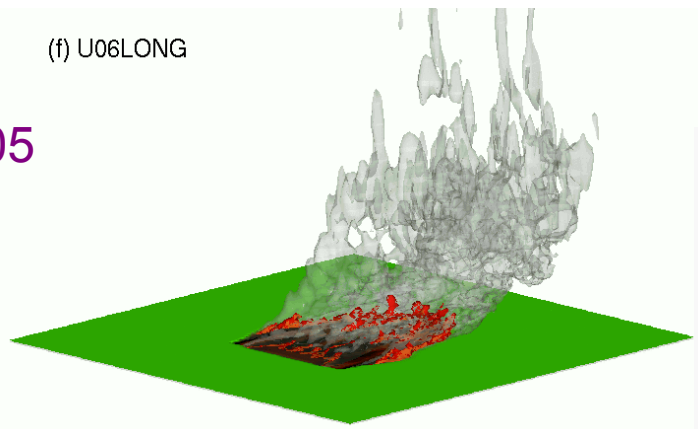
Photograph from "Grassfires" by P. Cheney and A. Sullivan

Simulated Distance vs Time

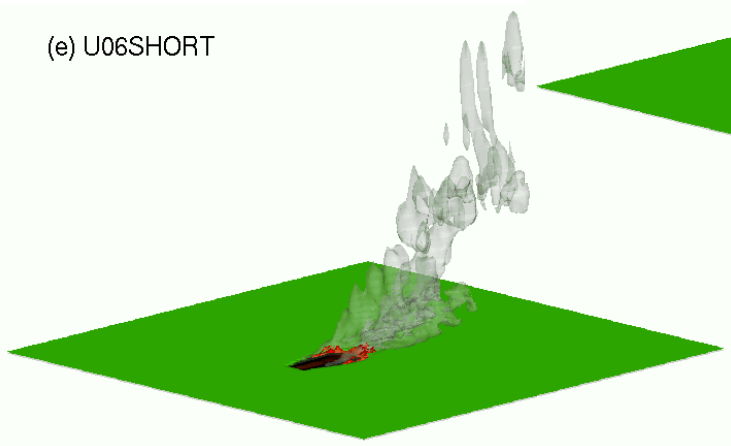


Linn *et al.* 2002
 Linn & Cunningham 2005

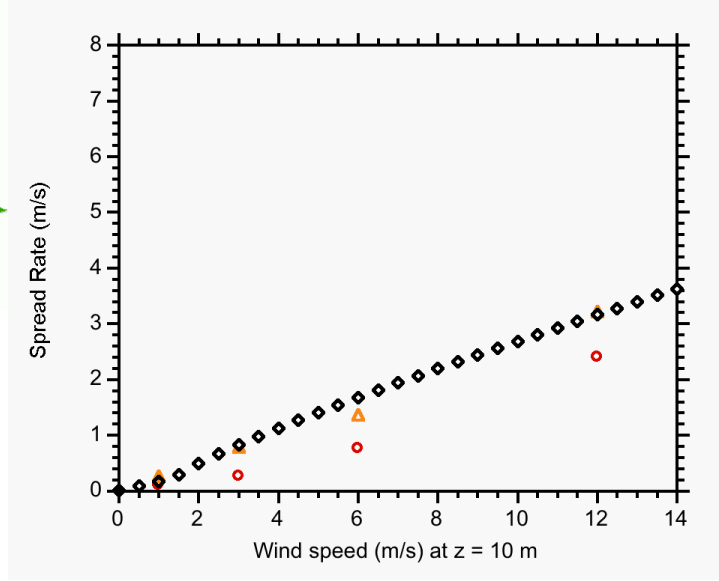
(f) U06LONG



(e) U06SHORT



FIRETEC ROS vs Cheney & al (1998)



Effets combinés du vent, de la pente et de la taille du feu sur la vitesse de propagation

1. Configuration simple

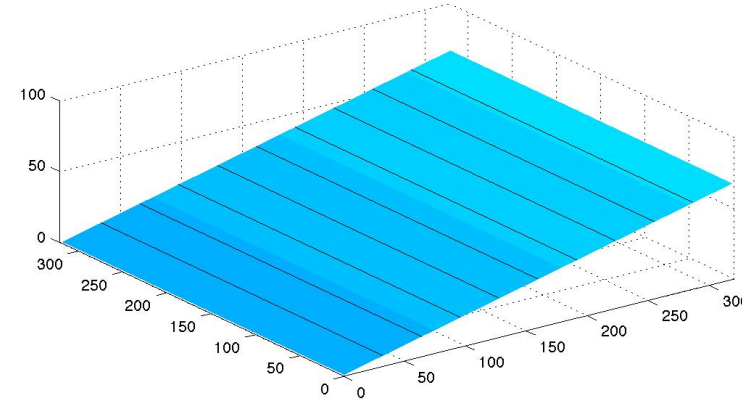
Simulations FIRETEC dans garrigue à Chêne kermès

Vent



Pimont, Dupuy et al. (2012)

Domaine: 320 x 320 x 600 m

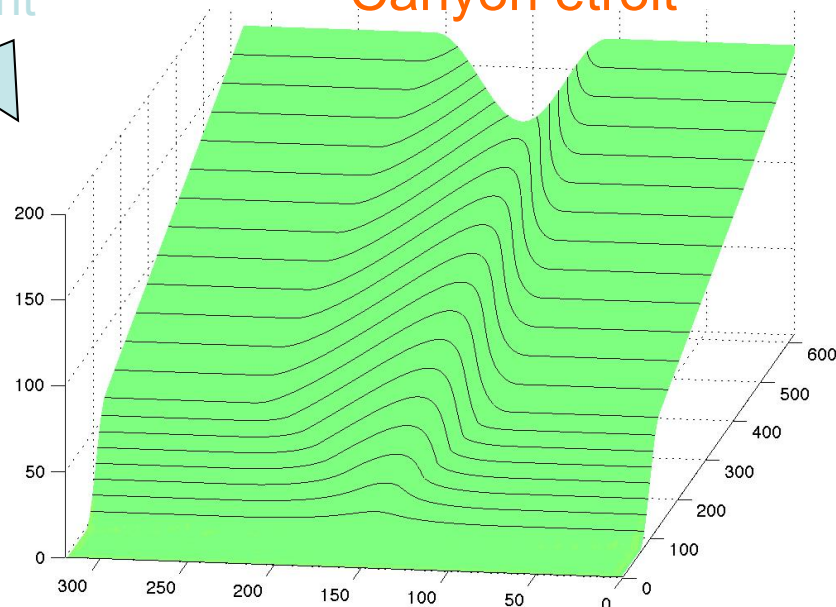


2. Topographie complexe

Vent



Canyon étroit

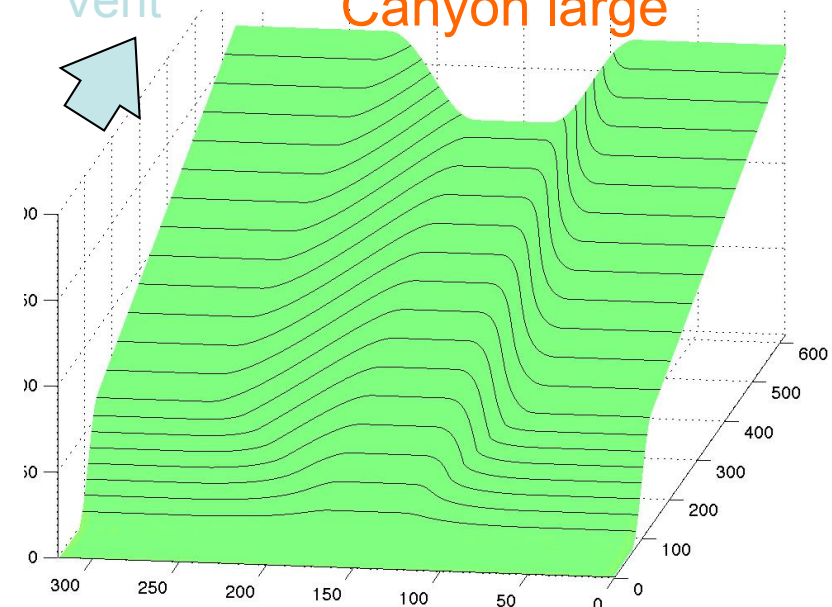


Domaine: 320 x 640 x 1000 m

Vent



Canyon large



Effets combinés du vent, de la pente et de la taille du feu sur la vitesse de propagation

Configuration simple

⇒ Effets du vent et de la pente ni multiplicatif, ni additif

⇒ Effet de pente quasi-linéaire par vent fort

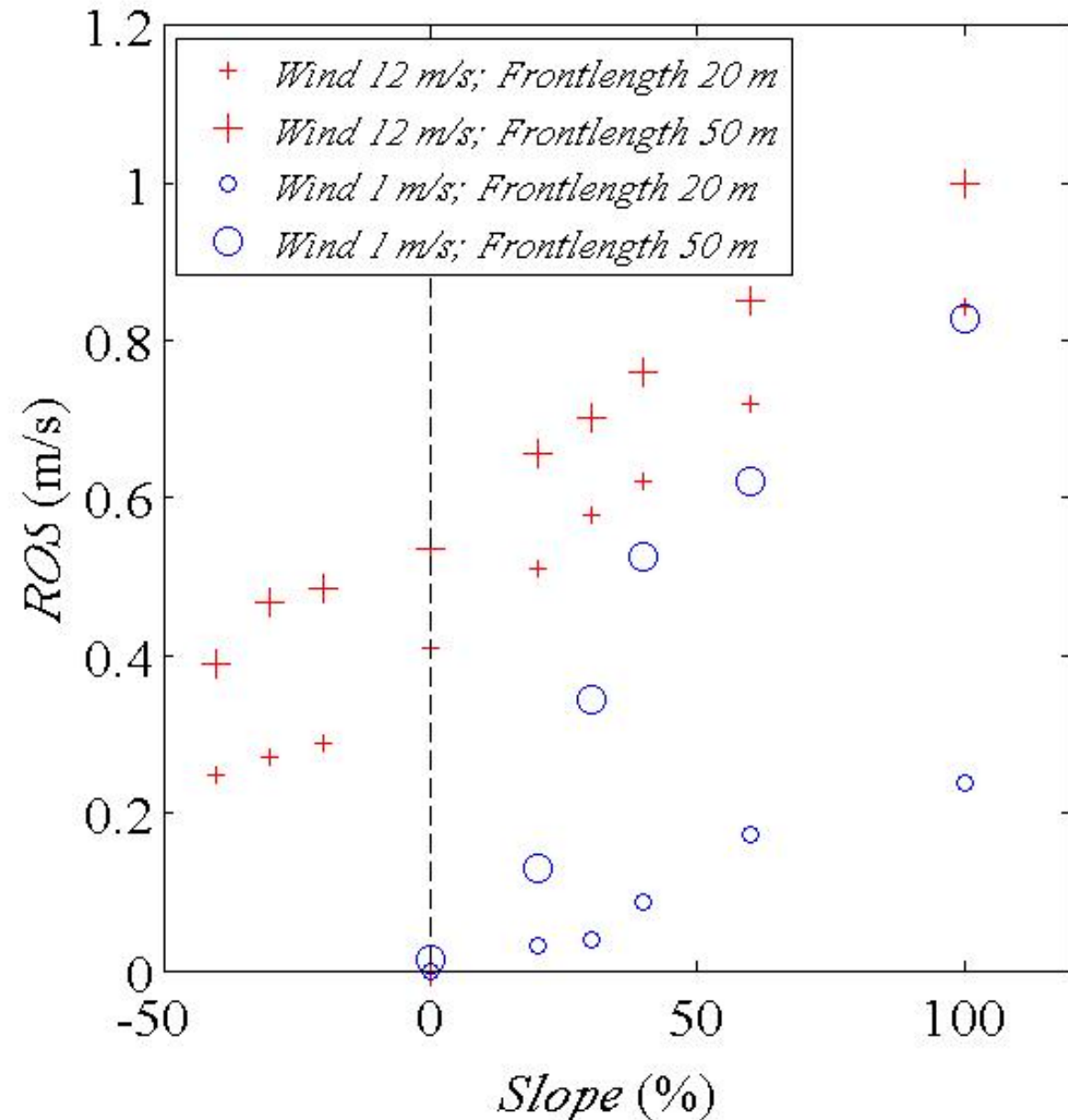
⇒ Fort effet de la largeur de front par vent faible

Domaine: 320 x 320 x 640 m

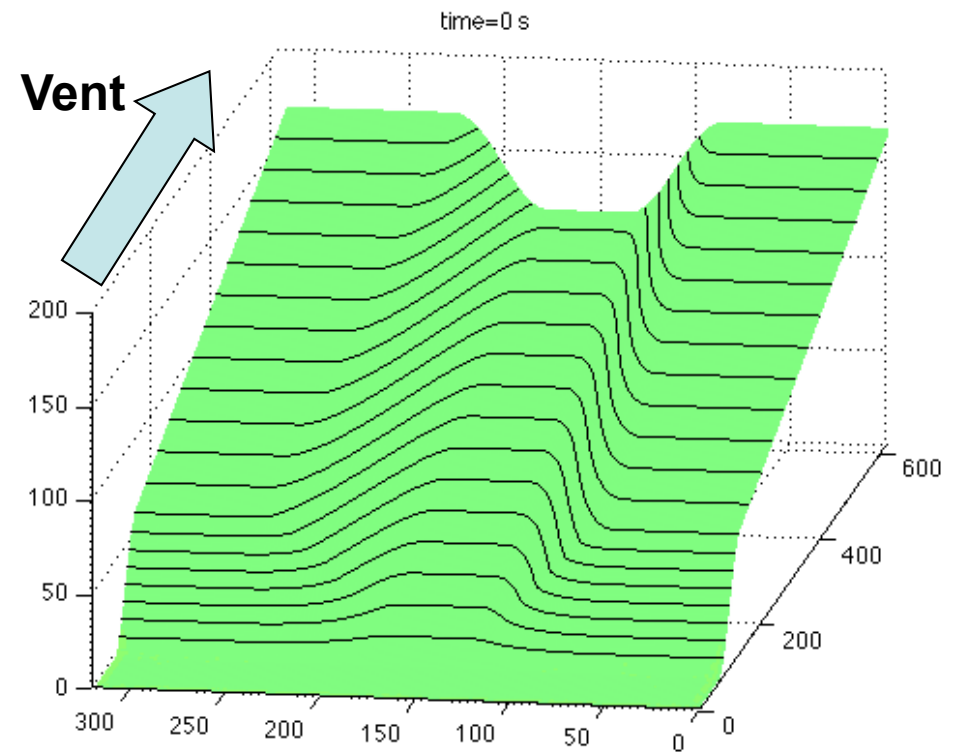
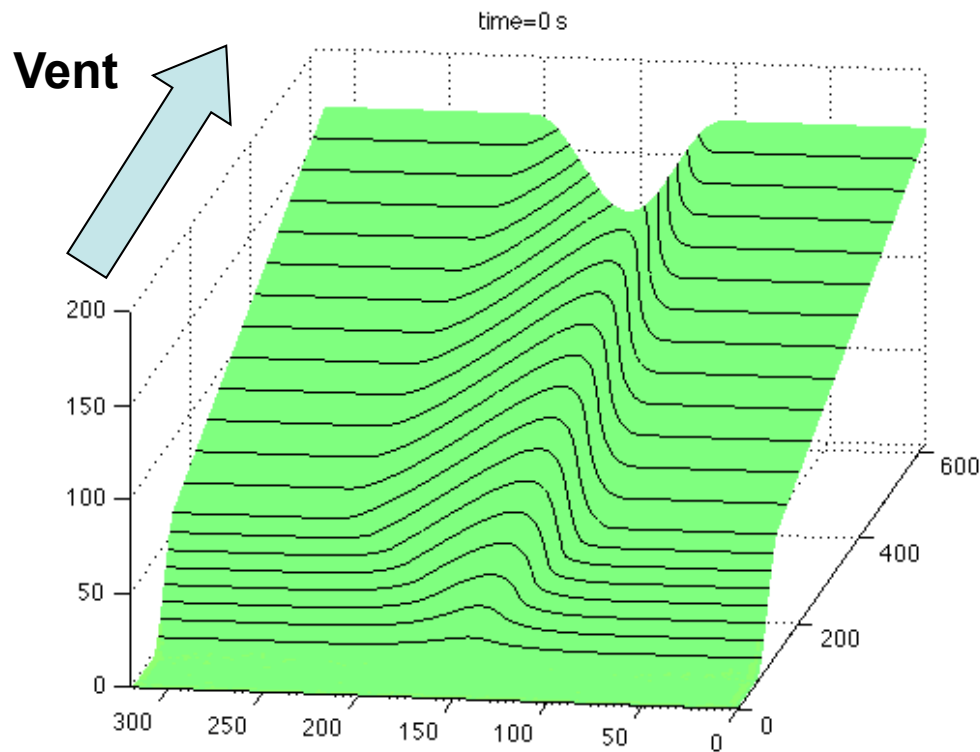
Vent: 1 et 12 m/s à 10 m

Pente: - 40% to 100%

Largeur feu: 20 and 50 m



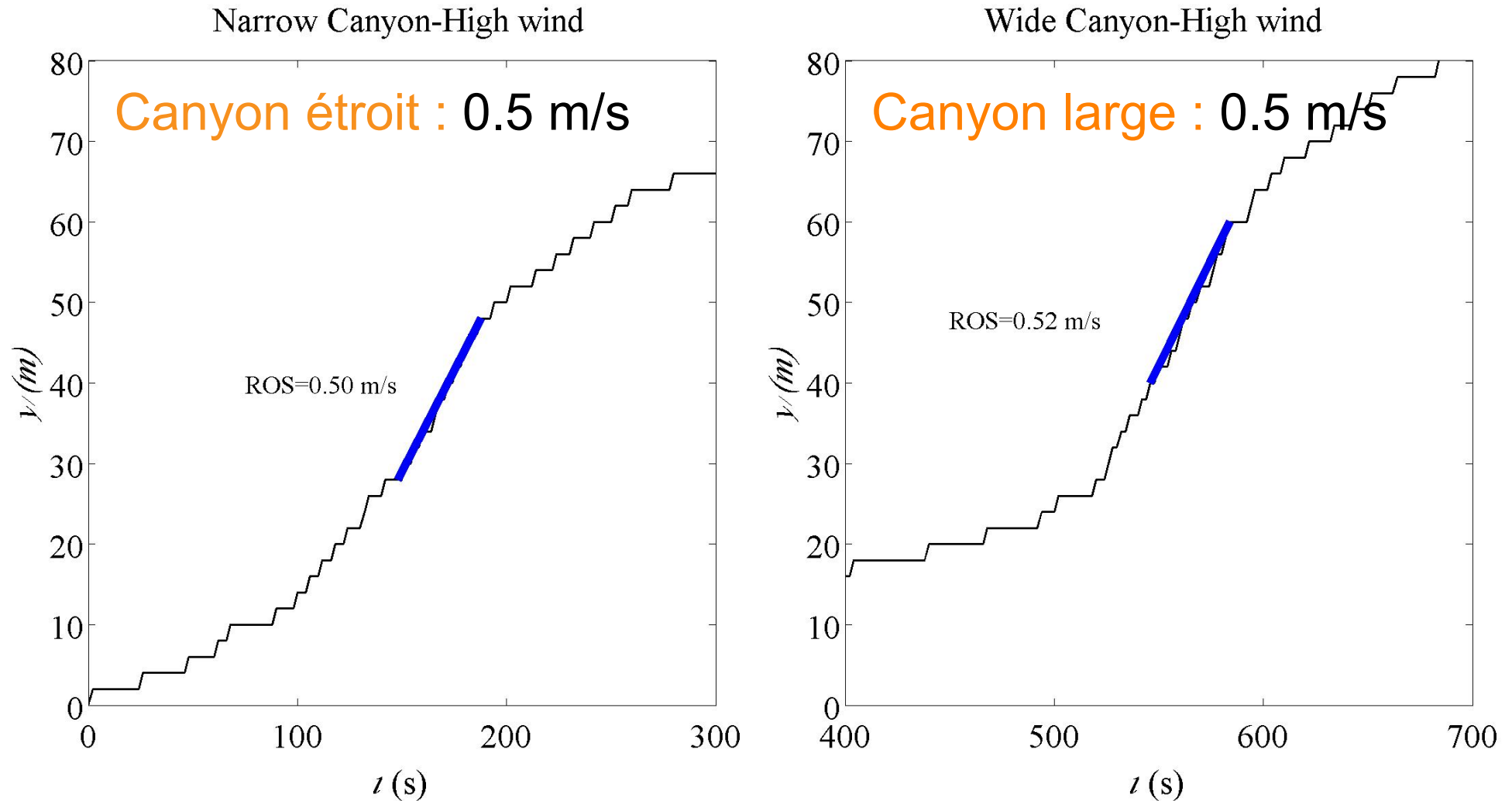
Simulation par vent fort



- **Canyon étroit** : le feu atteint rapidement les côtés du canyon et monte
- **Canyon large** : le feu reste plus longtemps dans le canyon, puis monte
=> dans cette configuration, le feu de flanc en fond de canyon devient feu de tête, avec **un front très large en bas de pente**

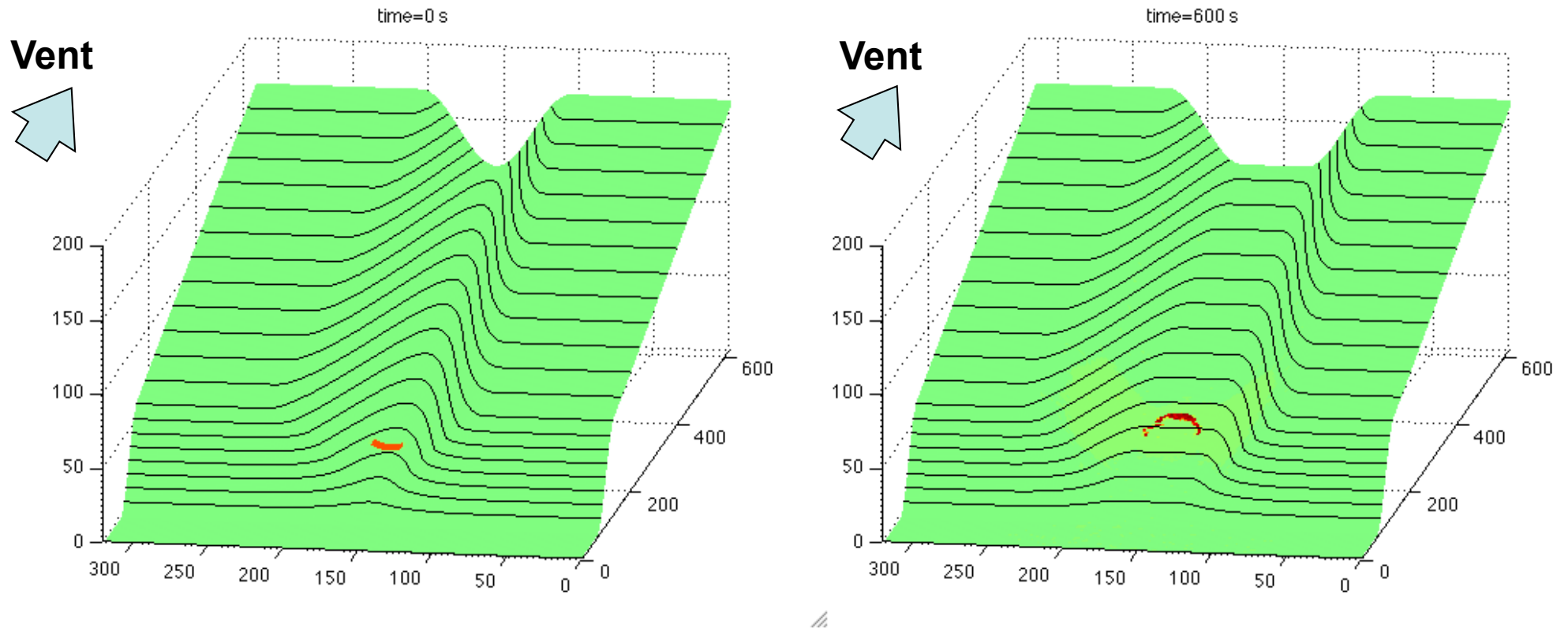
Simulation par vent fort

Propagation latérale (selon axe y) à partir du milieu du domaine



Par vent fort, les vitesses de montée sont similaires pour des largeurs de front différentes en bas de pente

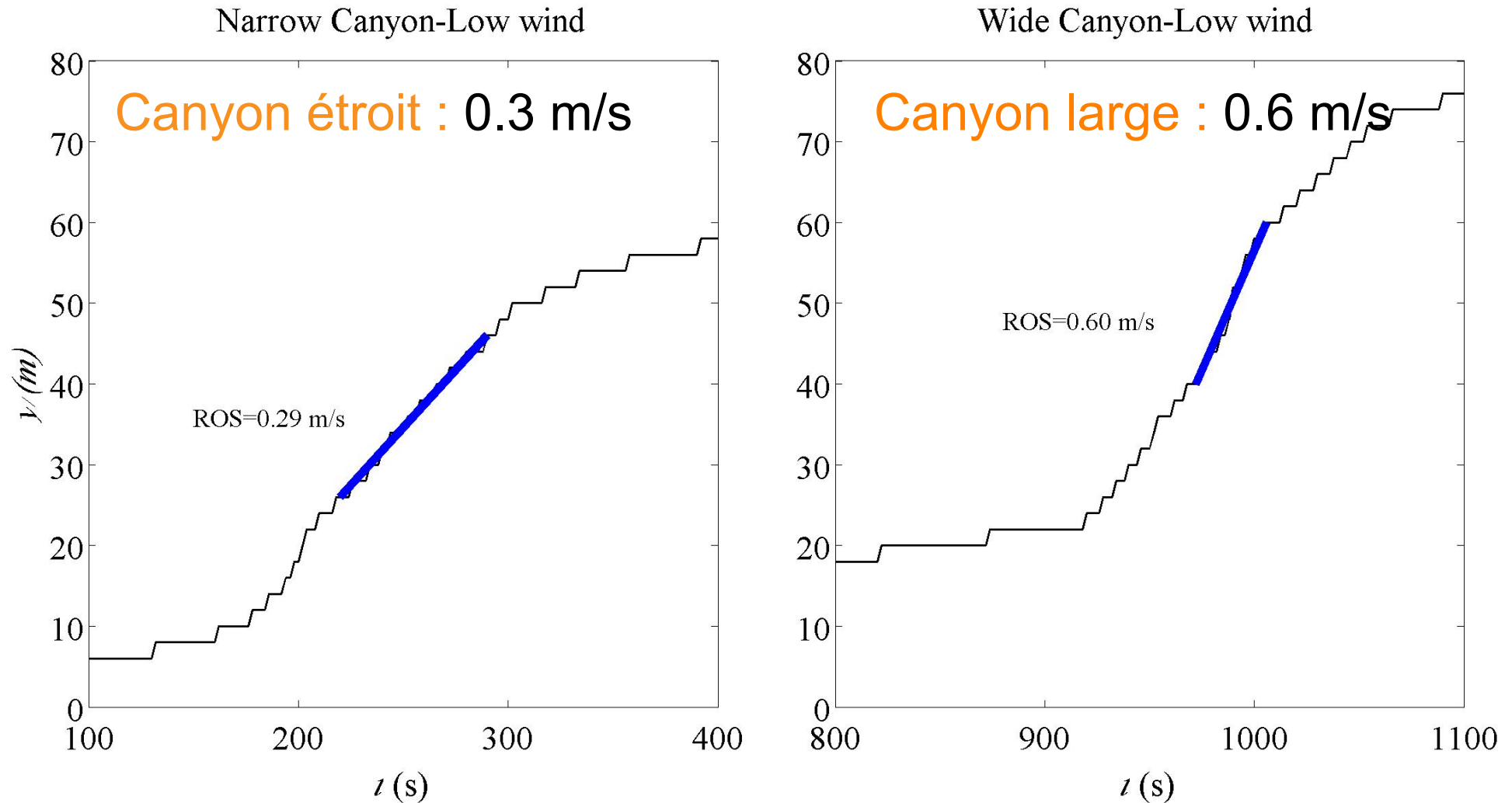
Simulation par vent faible



- Forme en V caractéristique des feux montant une pente sans vent
 - Comportement similaire au vent fort (montée retardée dans le canyon large)
- Mais ...

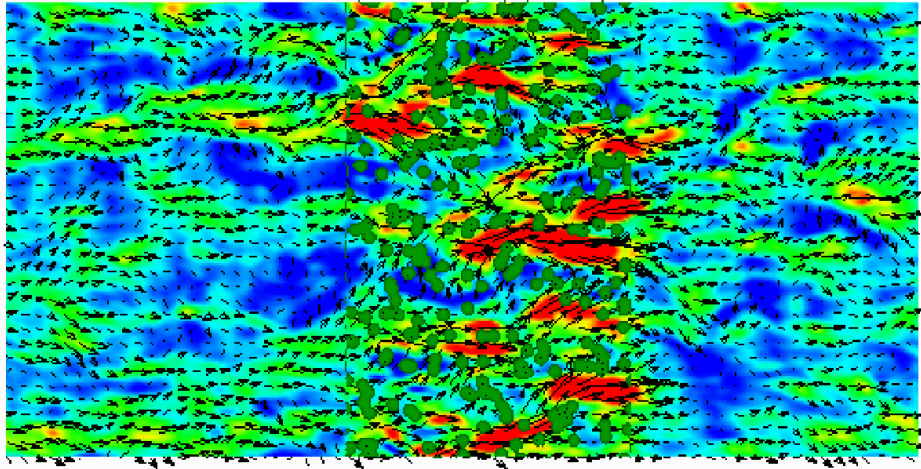
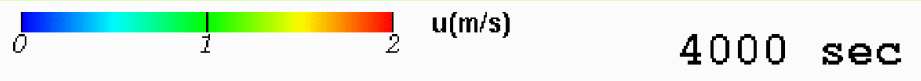
Simulation par vent faible

Propagation latérale (selon axe y) à partir du milieu du domaine

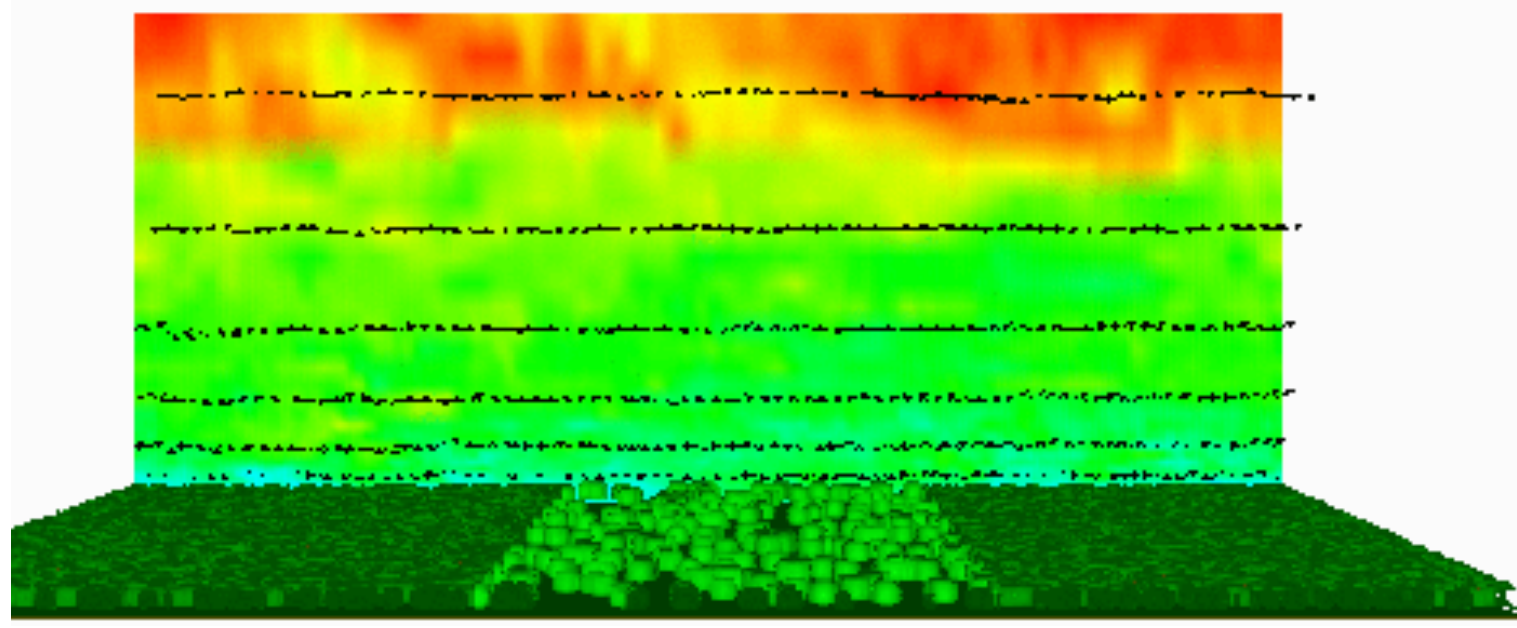
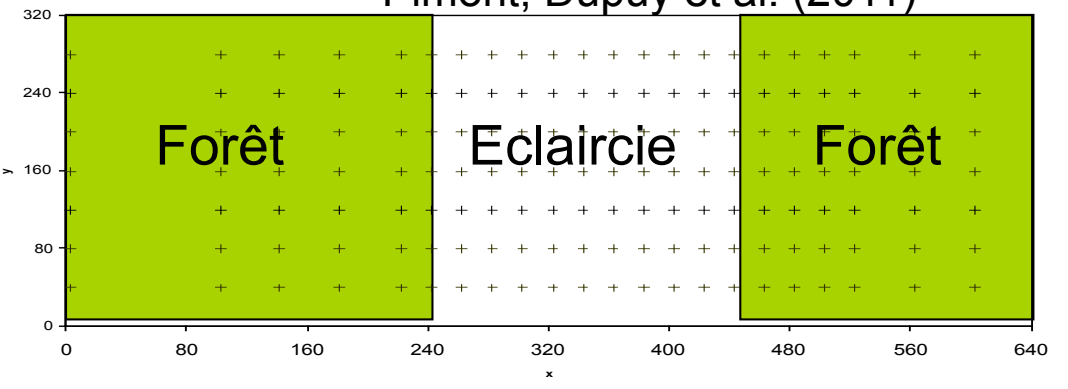


Par vent faible, les vitesses de montée sont très différentes pour des largeurs de front différentes en bas de pente

Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu



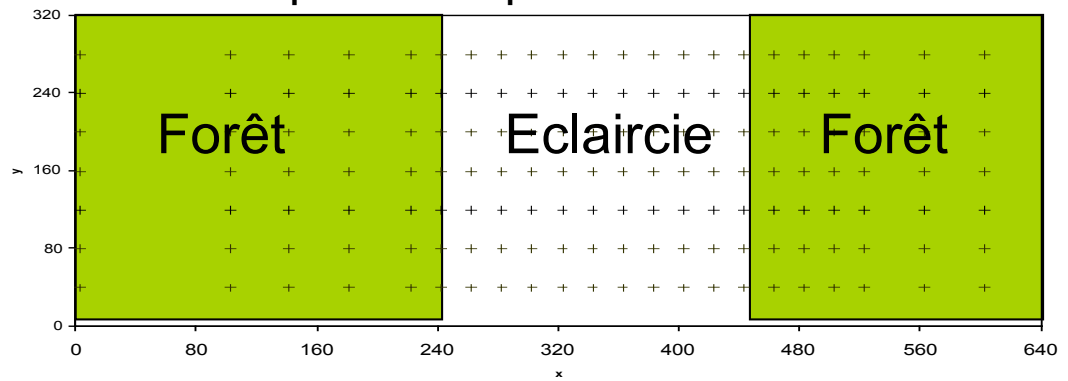
Pimont, Dupuy et al. (2011)



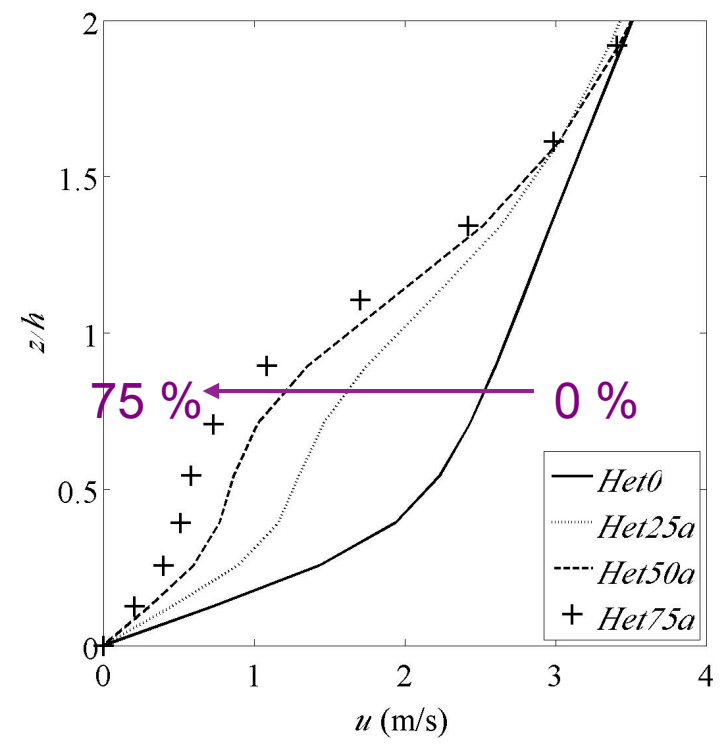
Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu

Effet du recouvrement
(0, 25, 50 et 75%)
Un couvert de 25 % réduit le vent au sol et la puissance du feu

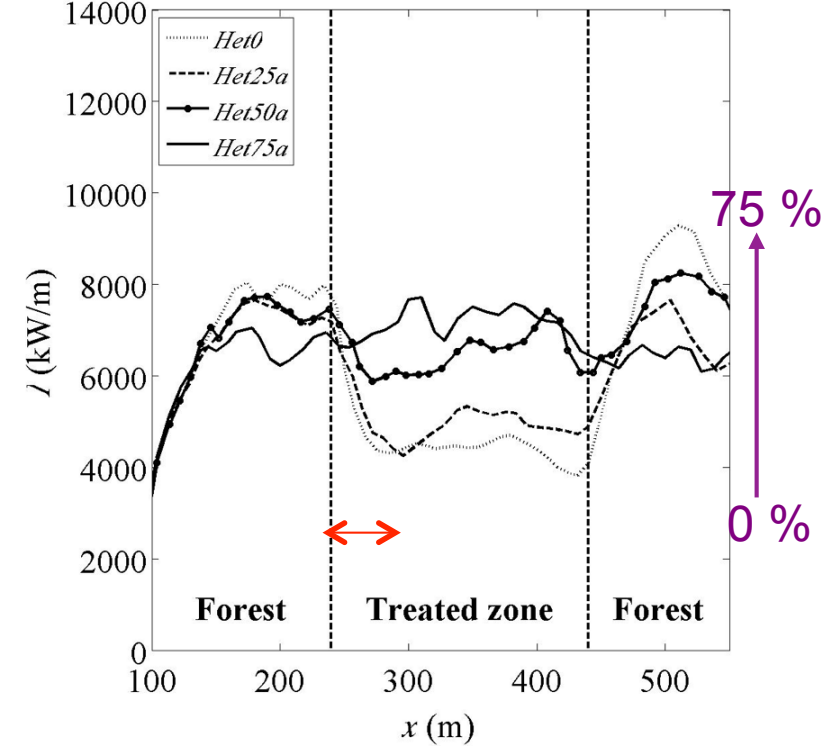
Forêt de pins d'Alep



Profils de vent



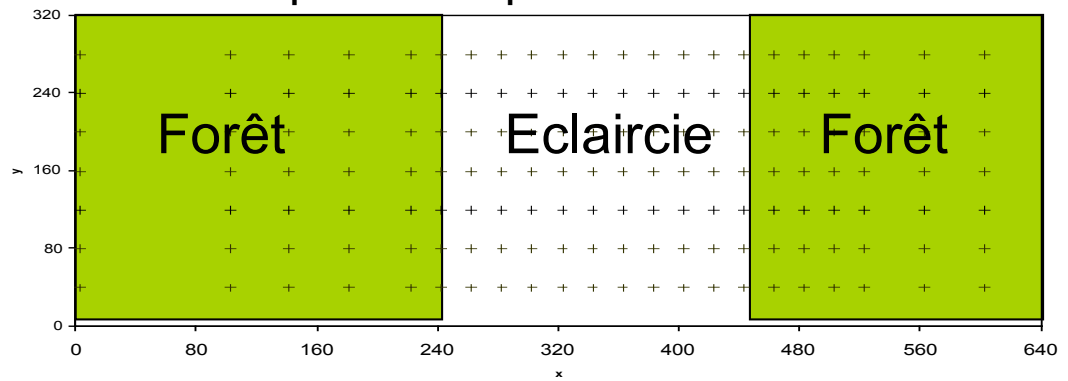
Puissance du feu



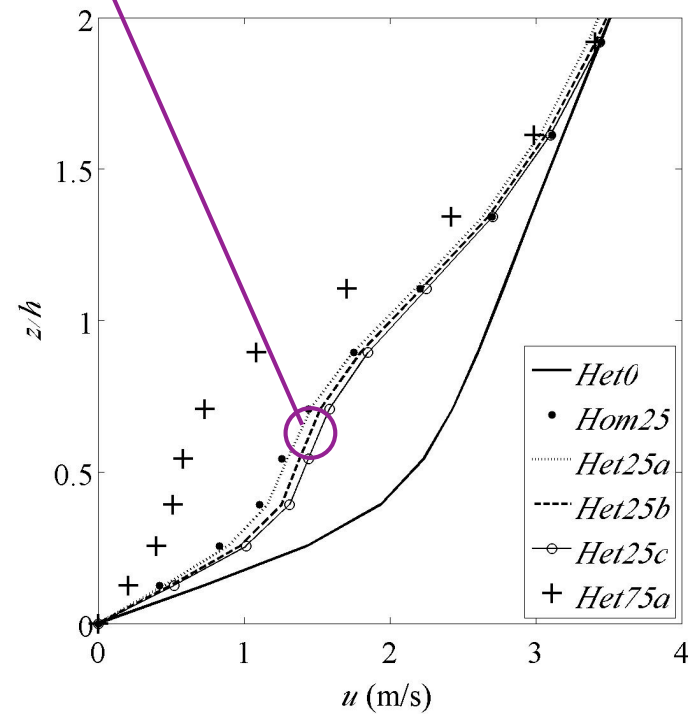
Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu

Effet de l'agrégation
(homogène, ou patches 4,10 ou 20 m
Pas d'effet significatif

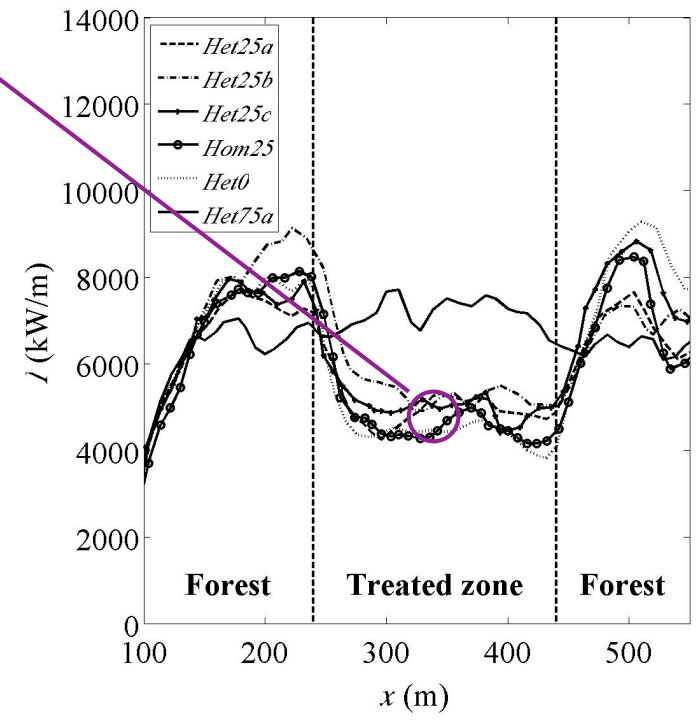
Forêt de pins d'Alep



Profils de vent



Puissance du feu



Hétérogénéité des dommages aux arbres

Rôle des structures turbulentes

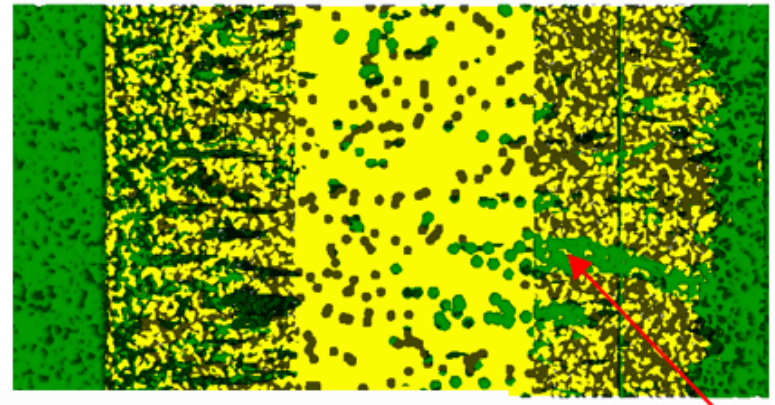
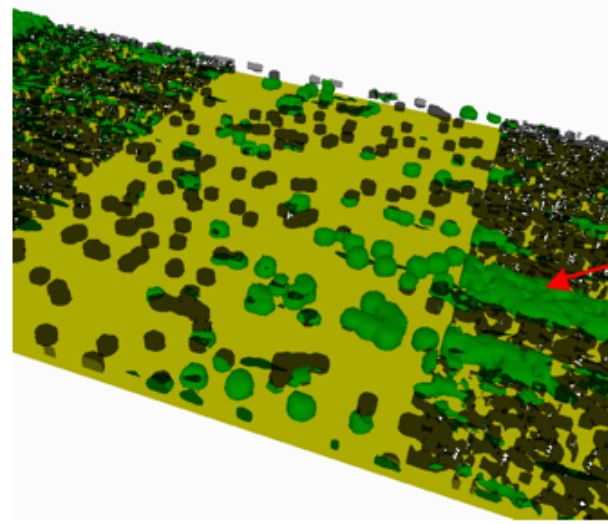
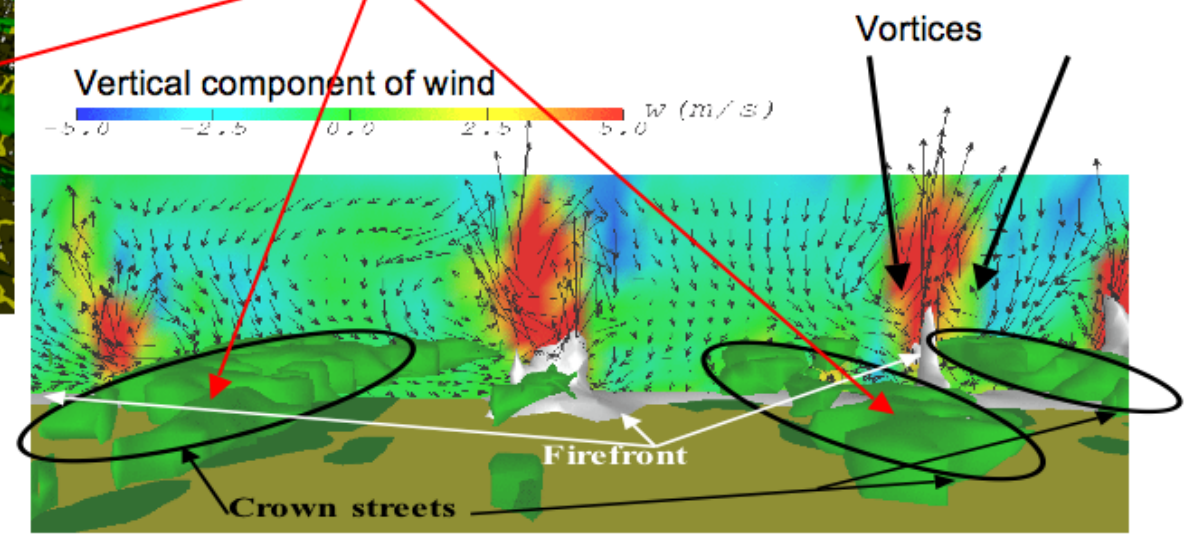
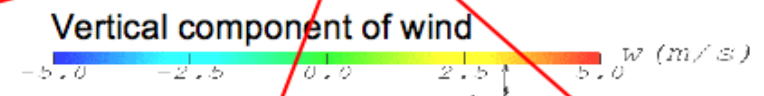


Photo Kevin Hyer, Jones Center for Ecology Georgia (US)



Crown Streets



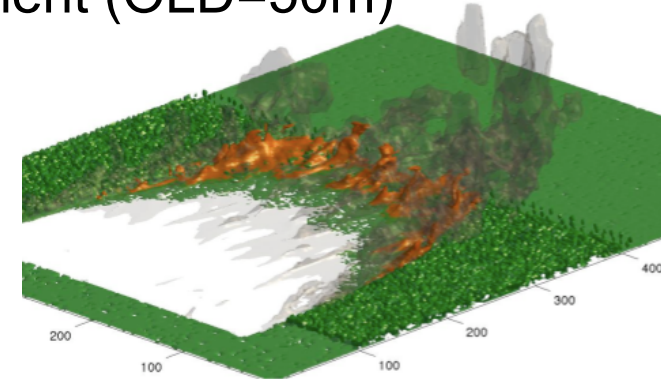
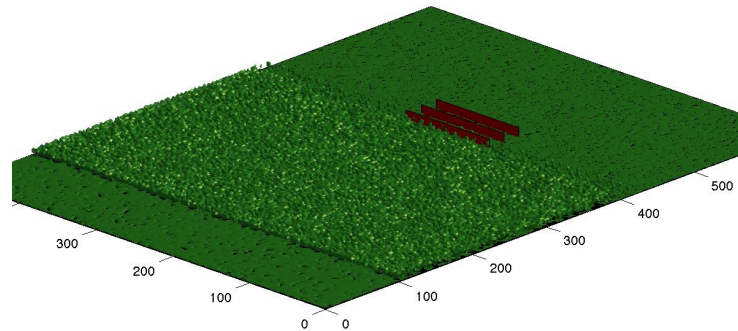
Impact thermique d'un feu à l'interface forêt-habitat

Scénario des simulations FIRETEC

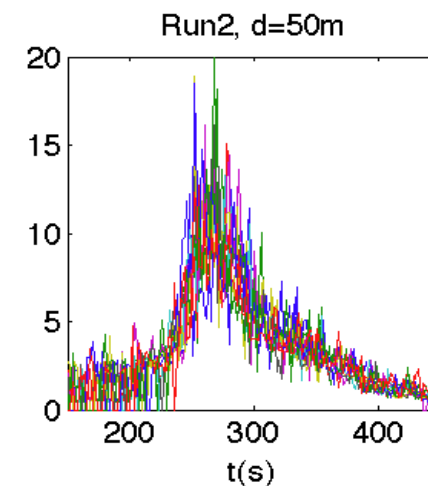
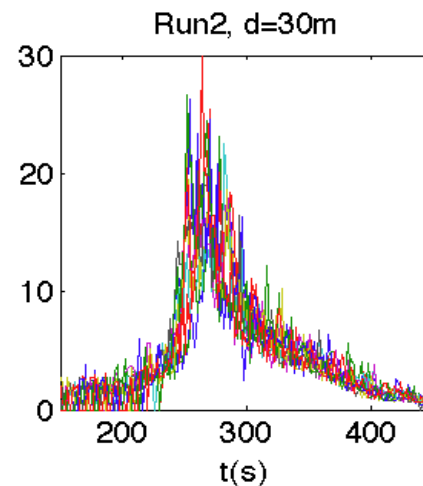
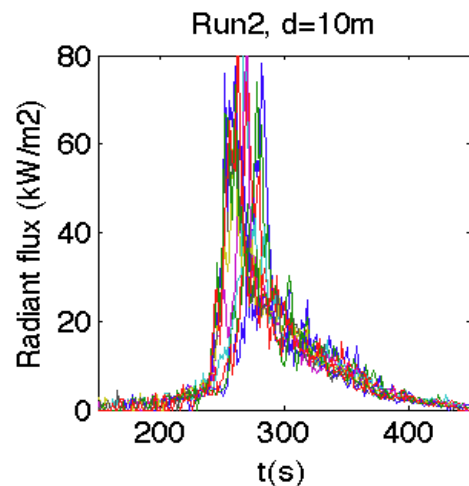
Peuplement de pins d'Alep dense en conditions météo sévères en amont d'une zone débroussaillée et éclaircie, pentes 0 et 30 %.

Cibles virtuelles à 10, 30, 50 m du peuplement (OLD=50m)

Expertise
INRA/ONF/CSTB
pour le MEDD



Flux radiatifs à 10, 20 et 30 m de la lisière (pente montante de 30%)



Impact thermique d'un feu à l'interface forêt-habitat

Exposition aux flux radiatifs

Durée d'exposition de une à deux minutes (<< standards tests feux de bâtiments)

Valeurs maximales du flux radiatif intégré sur une minute

kW/m²	d = 10 m	d = 30 m	d = 50 m
Sans pente	26	8,8	5,9
Pente de 30%	39	13	8,9

Seuils de flux typiques pour une exposition de 1 mn ou plus

Inflammation du bois 27 kW/m²

Approche de pompiers équipés 8 kW/m²

Létalité (p>1%, sans équipement) : 5 kW/m²

Les températures de l'air atteintes autour des cibles conditionnent aussi la tenabilité au feu des personnes. Elles sont prédites par le modèle

Modélisation du feu : conclusions

Approches empiriques

- Source d'observations indispensables
- Lois de comportement utiles aux opérationnels
- Complexité des interactions des processus non restituée
- Souvent utilisées hors limites de validité et sans estimation d'erreur

Approches physiques

- Compréhension des processus et de leurs interactions
- Contributions utiles sur un plan opérationnel
- Limitées par le coût des calculs
- Validation difficile (données, mesures)



Apprendre à vivre avec le feu