

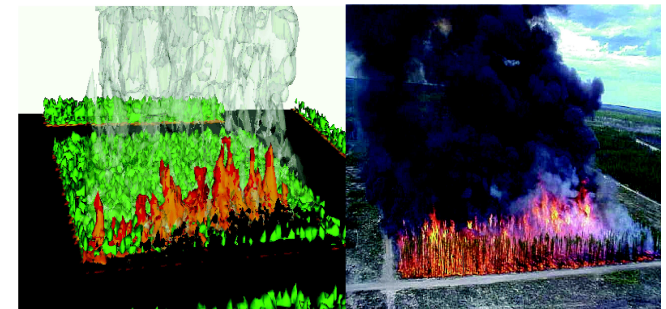
Séminaire du réseau PAYOTE, 3 novembre 2016

FIRETEC, un modèle physique de propagation des feux de forêt

Jean-Luc Dupuy ⁽¹⁾ , François Pimont ⁽¹⁾ , Rodman Linn ⁽²⁾

¹INRA, Ecologie des Forêts Méditerranéennes, Avignon

²LANL, Earth and Environmental Science Division, Los Alamos



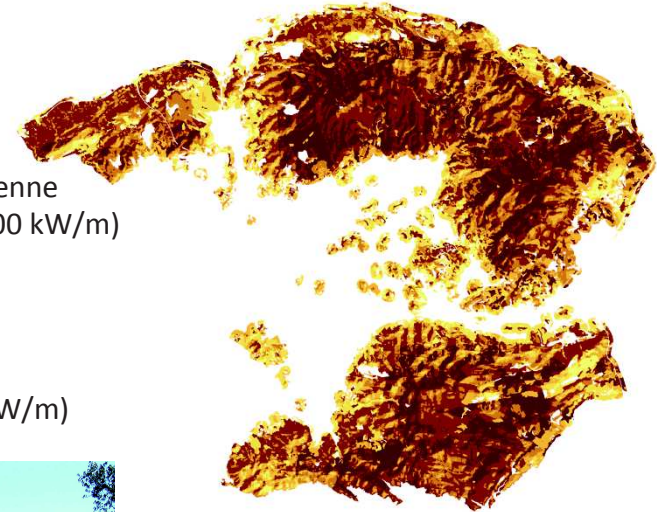
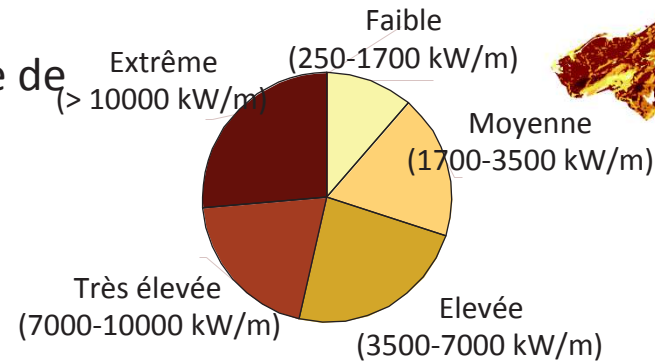
Contexte : gestion et prévention du risque incendie

Cartes d'aléa ("risque structurel") :

Intensité du feu ?

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

PPRIF de Marseille (Agence MTDA)



Ouvrages de prévention :

Dimensionnement ?

Structure de végétation ?



Interface forêt habitat :

Impacts sur les maisons et les personnes ?

Efficacité de l'obligation légale de débroussaillage ?

Contexte : gestion et prévention du risque incendie

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) ?



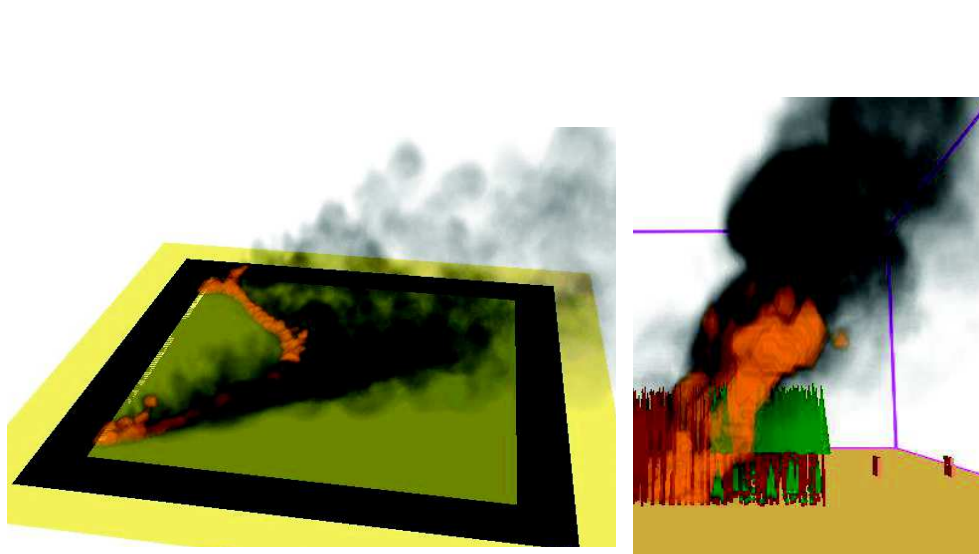
Modélisation physique du feu

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

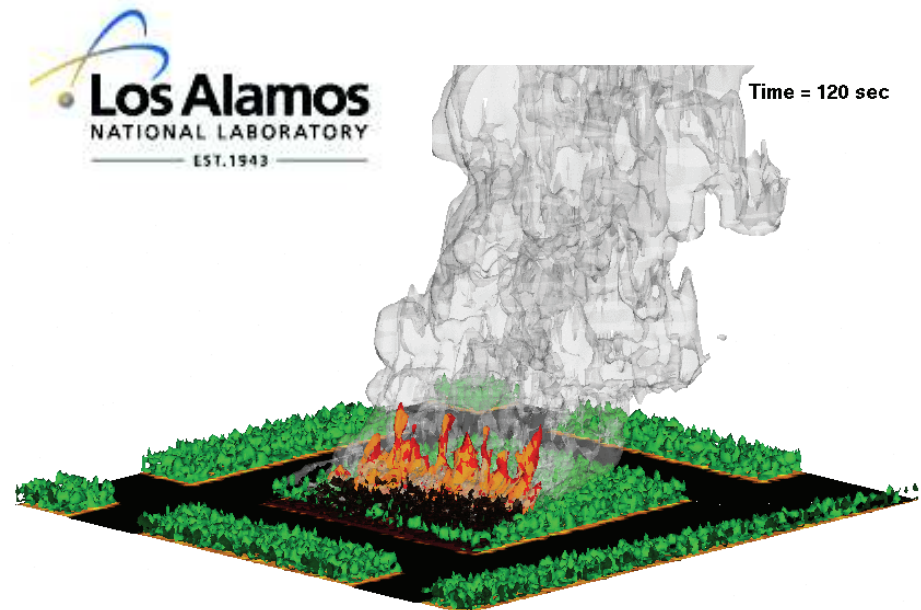
Deux modèles aux échelles de la parcelle au petit paysage

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



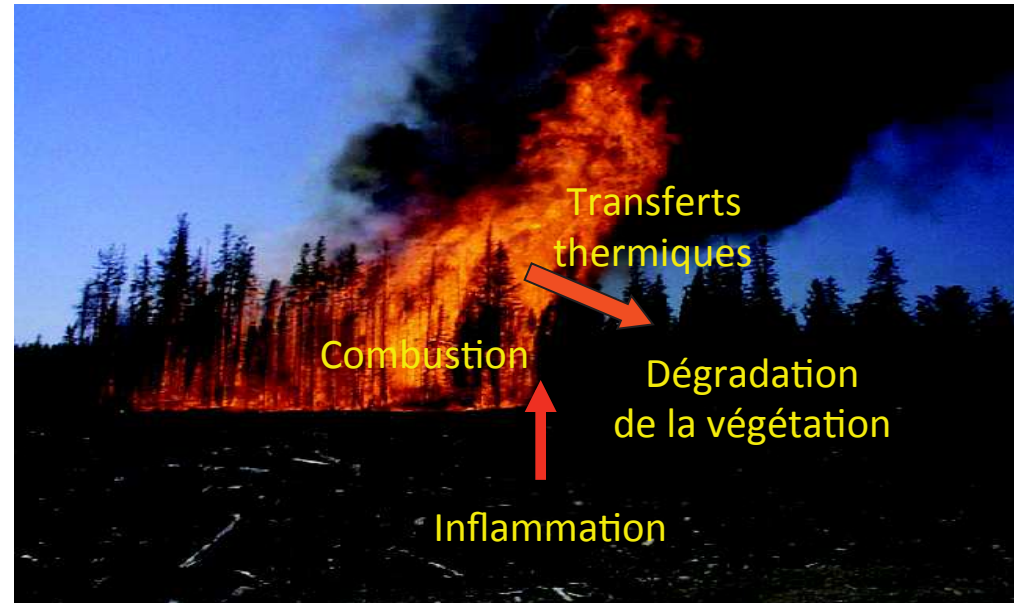
Images fournies par Rudy Mell

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



Les processus physiques de propagation

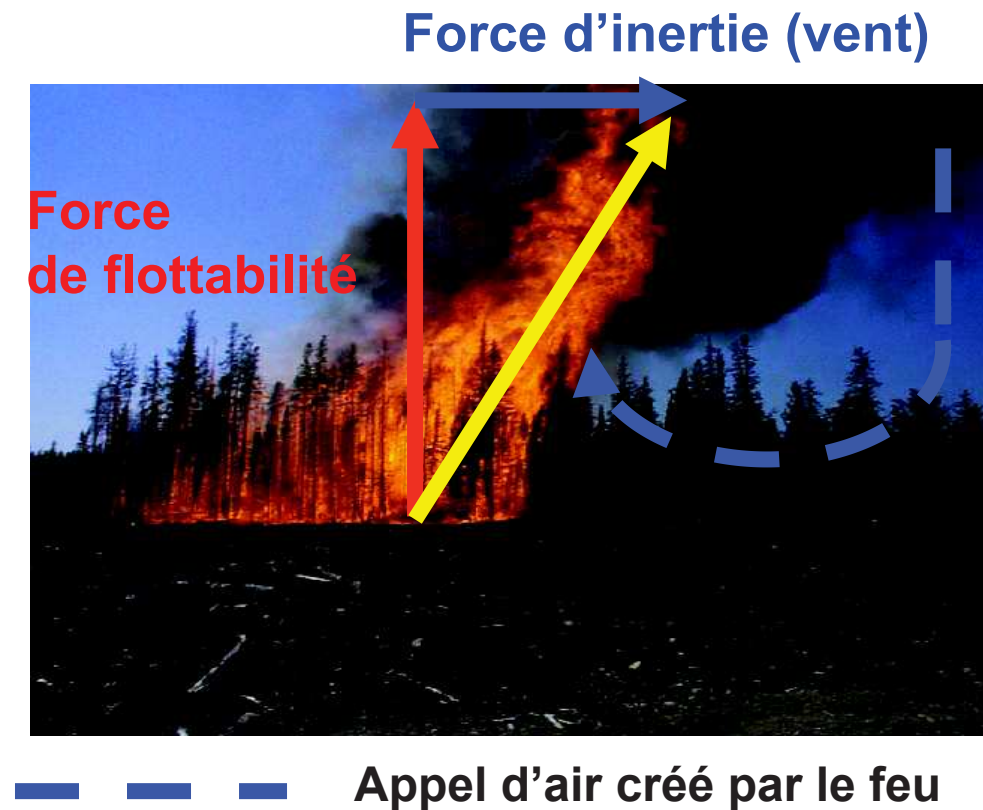
- **Dégradation thermique de la végétation**
 - vaporisation de l'eau
 - pyrolyse
 - pilotée par la température
- **Inflammation**
 - contact de la flamme
- **Combustion**
 - conditionnée par le mélange des produits de pyrolyse et de l'oxygène
 - le mélange résulte de phénomènes de transport (notamment turbulence)
- **Transferts thermiques**
 - rayonnement, convection
 - conditionnés par la source de chaleur (combustion)
 - convection couplée au transport



Les processus physiques de propagation

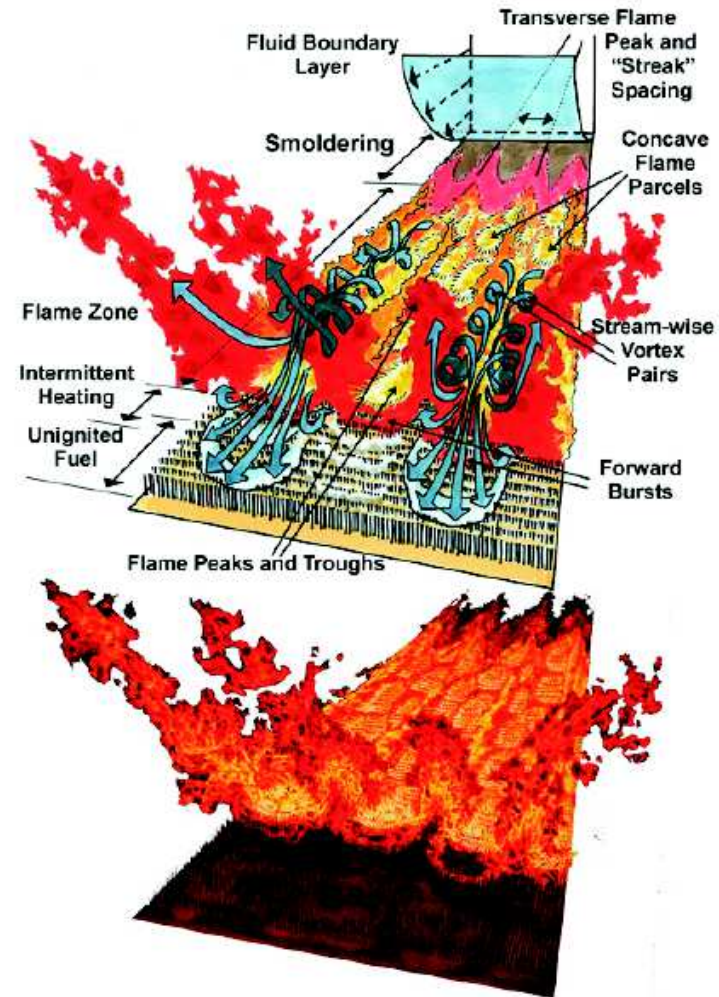
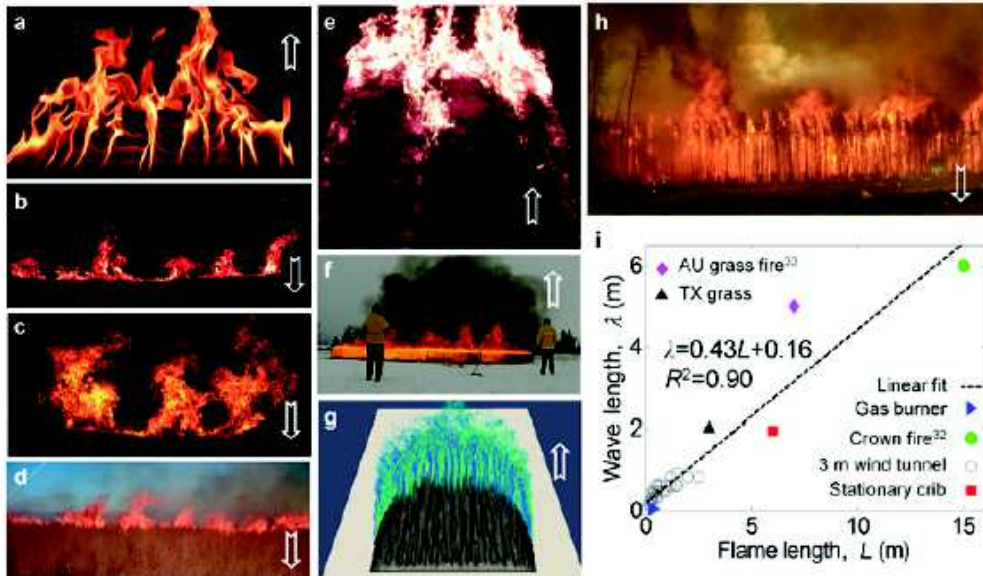
- Transport et effets aérodynamiques

- le feu crée ou influence les mouvements d'air, en interaction avec le vent, la végétation et la topographie
- l'écoulement transporte de la matière et de la chaleur (advection, turbulence)



Les processus physiques de propagation

- Transport et transferts thermiques
 - Les mouvements d'air influencent l'échauffement convectif du combustible
 - Des instabilités convectives causent un échauffement intermittent
 - Ce mécanisme serait le principal mode de transfert thermique



Finney et al. 2015, PNAS

Modélisation physique du feu : défis

Ensemble couplé de processus physiques complexes

- Combustion
- Dynamique atmosphérique
- Transferts convectifs et radiatifs

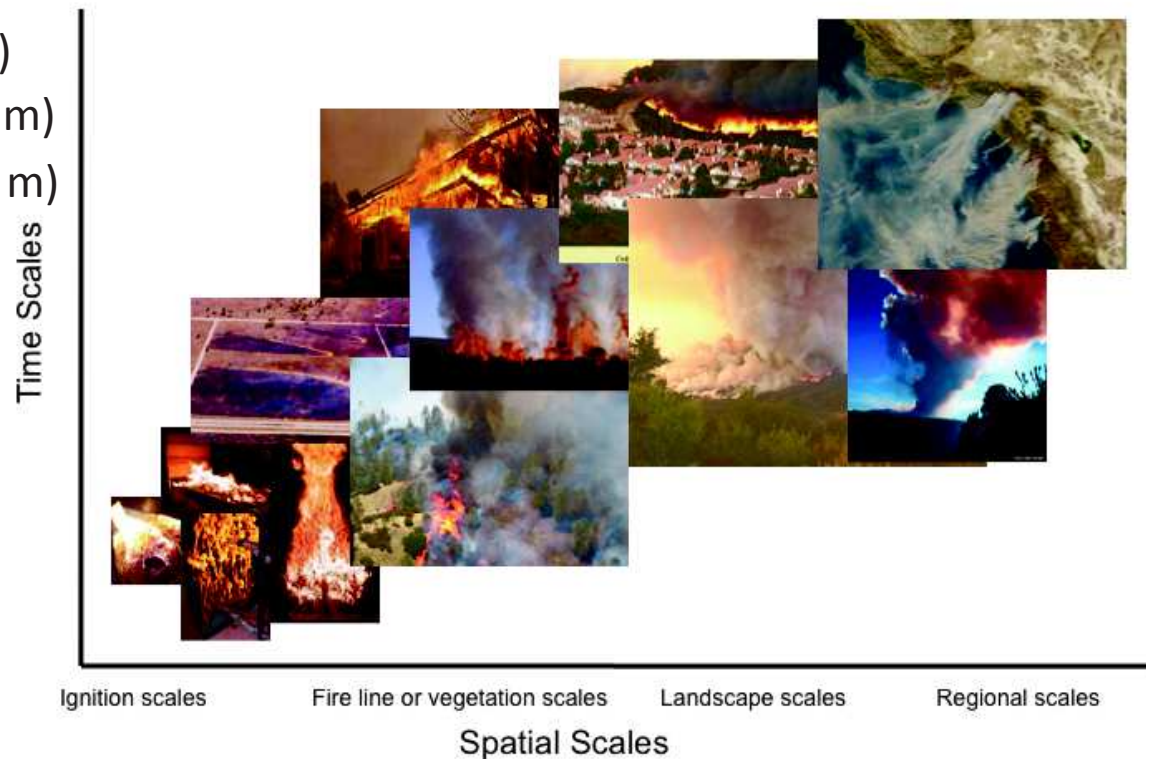
Large gamme d'échelles

- flamme (10^{-3} m) au panache (10^3 m)
- feuille (10^{-3} m) au peuplement (10^2 m)
- structures turbulentes (10^{-3} m - 10^3 m)

Conditions initiales et aux limites

- données sur le combustible
- fluctuations du vent

Validation difficile



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 (Monte-Carlo)

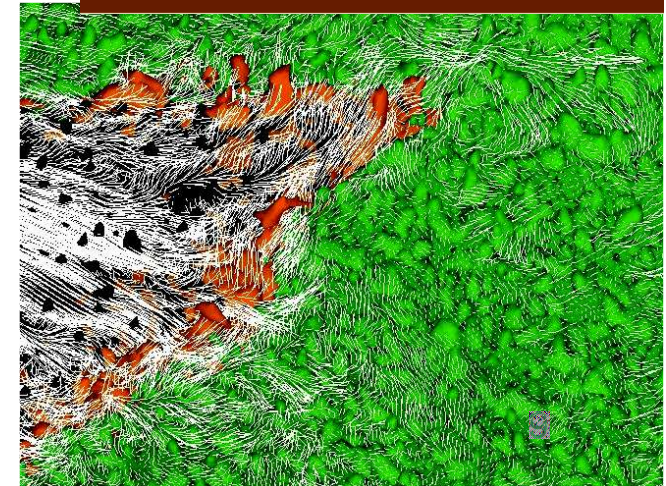
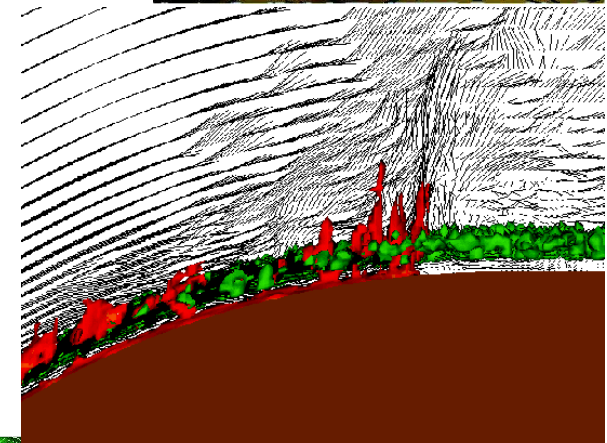
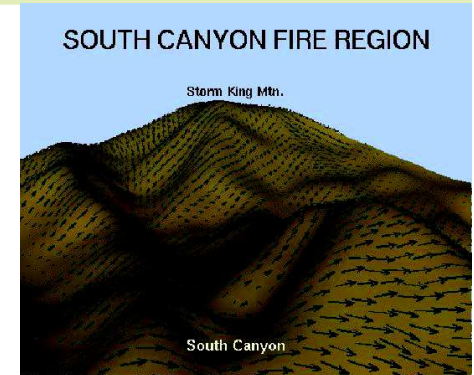
Processus modélisés ou de sous-maille :

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

Exemple de processus modélisé :

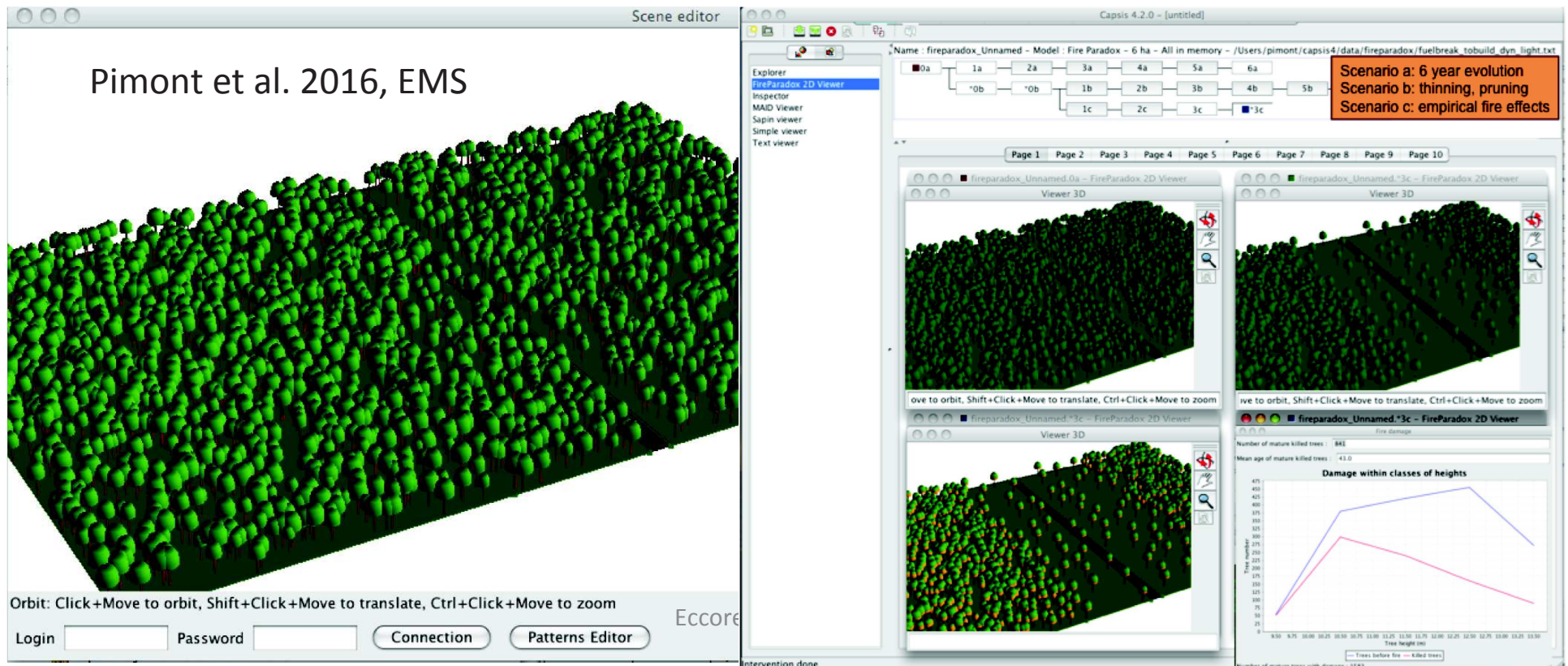
Combustible solide + Oxygène → Produits

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



Données d'entrée de FIRETEC

- **Vent** : profil empirique ou champ 3D par pré-calcul en conditions cycliques
 - **Topographie** : carte d'altitudes
 - **Combustible** : biomasse fine, surface exposée et teneur en eau, dans chaque maille
- Le Fuel Manager** permet de générer les scènes 3D de combustible
- Approche à 3 échelles : peuplement, individus, particules.
- Modèles de combustibles individuels, générateurs de peuplements



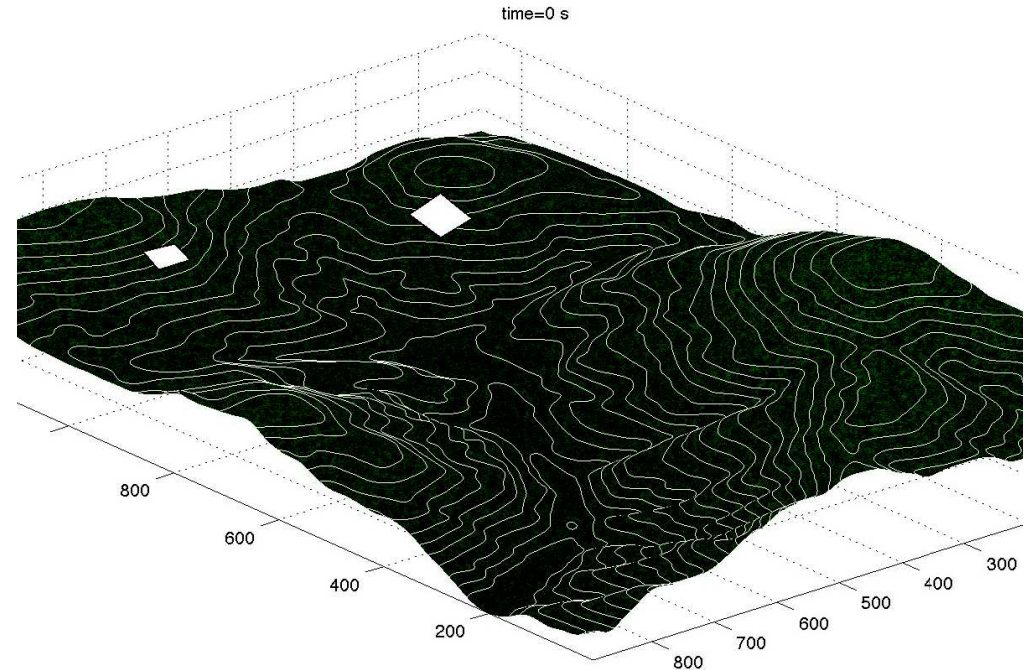
Modélisation physique du feu : FIRETEC

Le modèle fournit une description 3D de l'évolution dans le temps :

- De l'écoulement du mélange gazeux (vitesse, pression, densité)
- Du combustible (quantité, teneur en eau locales)
- Des températures du combustible (solide) et du mélange gazeux
- De la composition du mélange gazeux (combustible, oxygène)

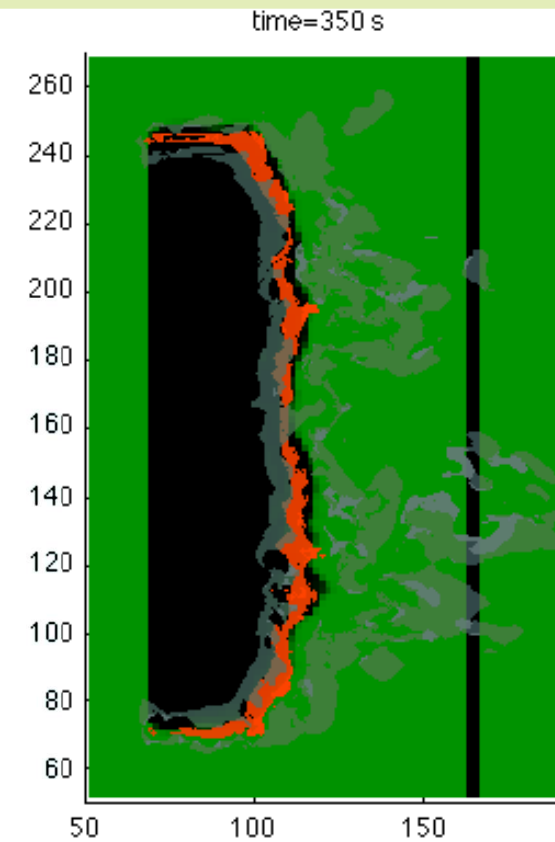
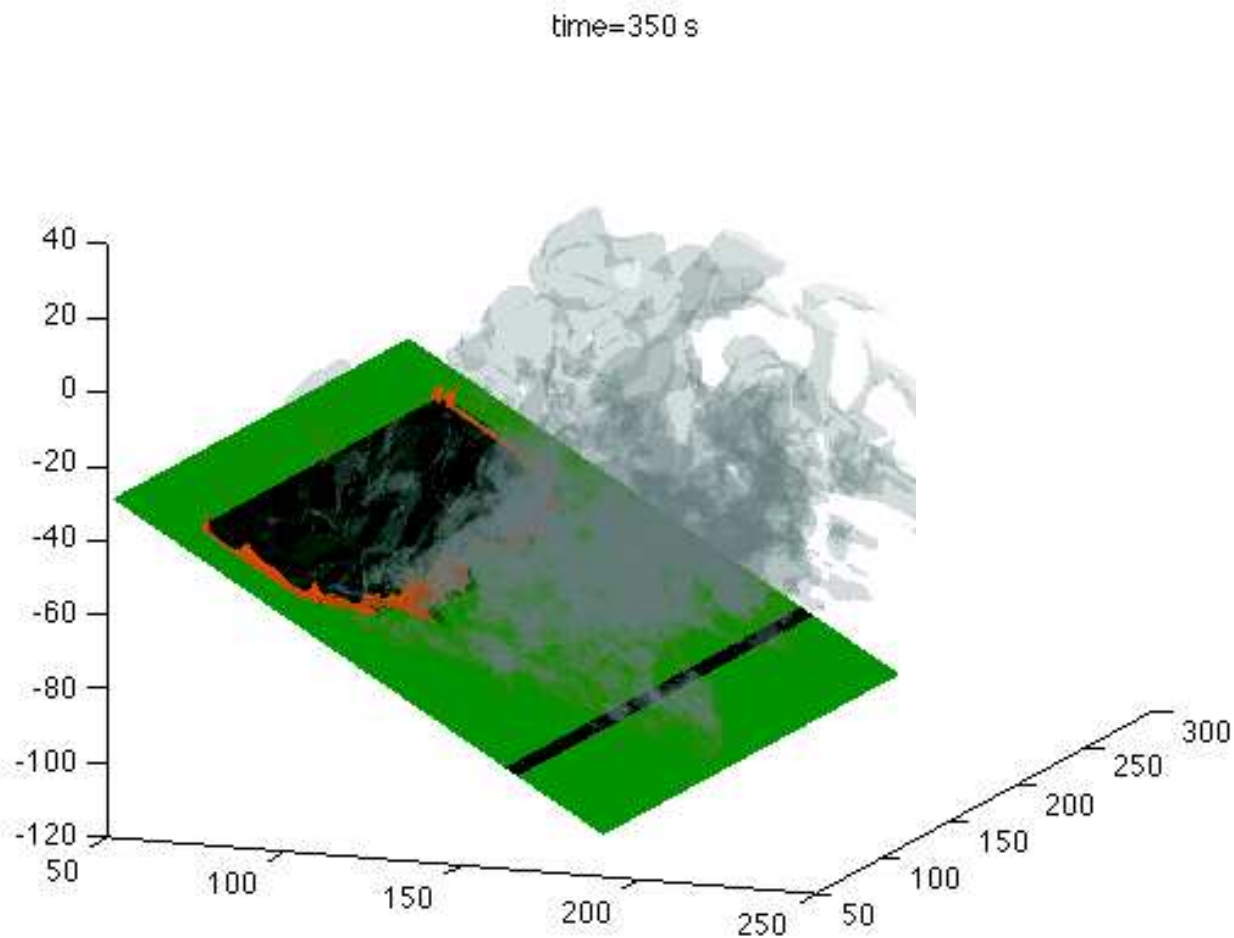
On peut déduire de ces "champs de variables bruts" :

- la vitesse du vent et l'intensité du feu
- la position et le déplacement de l'enveloppe du feu
- Flux, températures, etc.



FIRETEC : vents induits par le feu

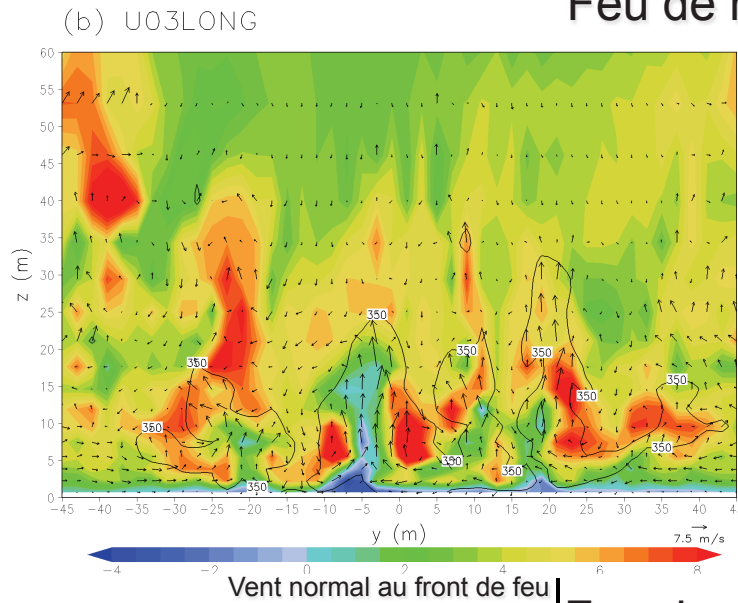
Simulation d'un contre feu par vent faible (Formation herbacée)



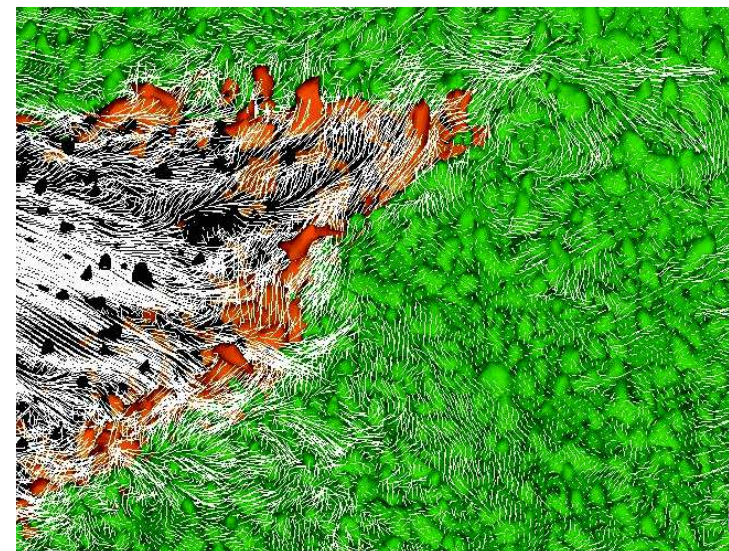
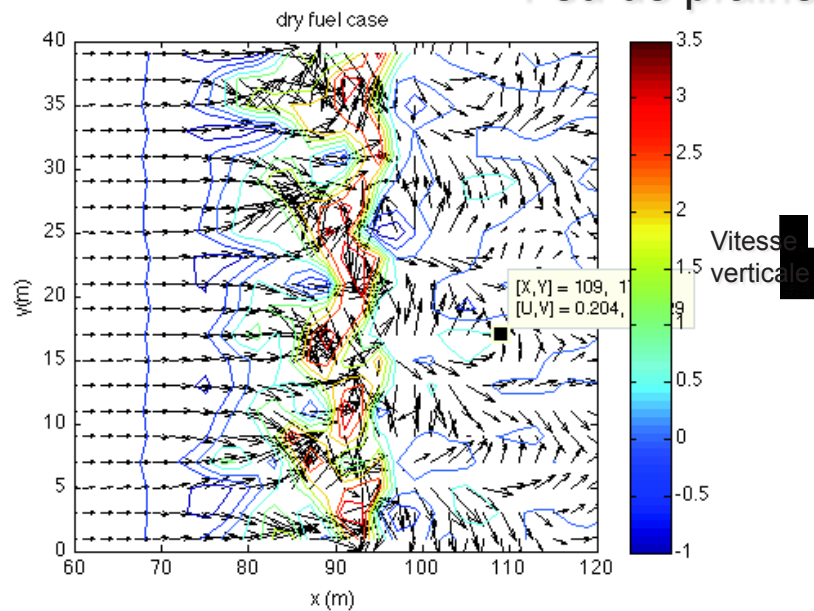
Dupuy, Pimont et al. (2011)

FIRETEC : structure des flammes, instabilités convectives

Feu de maquis, vue de face

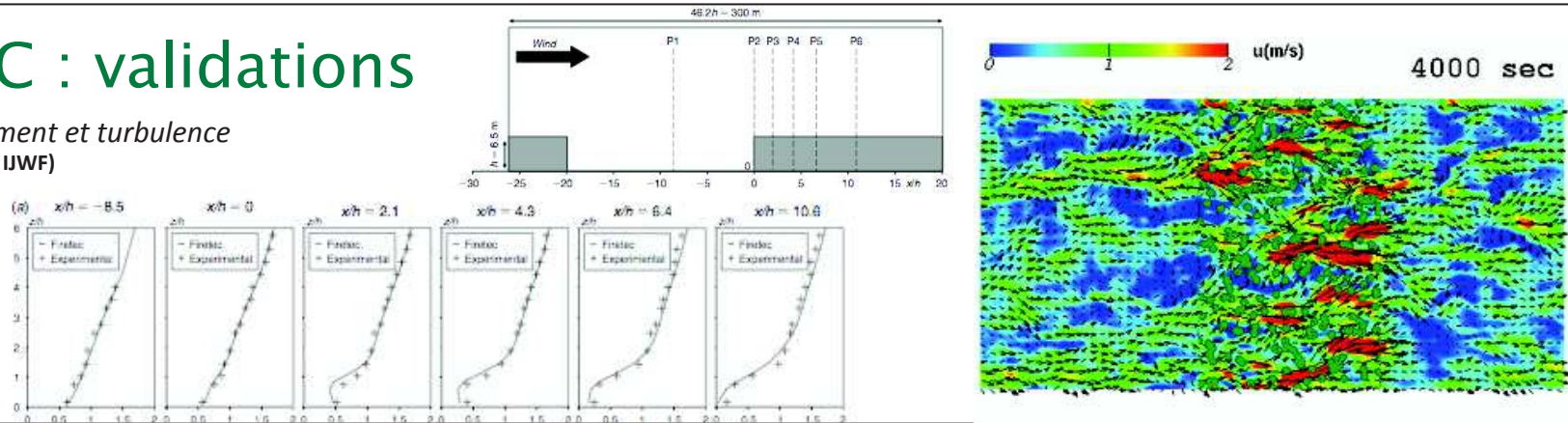


Feu de prairie, vue de dessus



FIRETEC : validations

Profil d'écoulement et turbulence
(Pimont et al. 2009 IJWF)

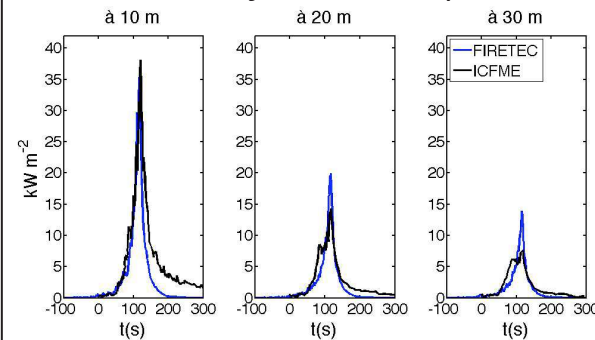


Vitesse de propagation Exp (Dupuy et al. 2011 IJWF)

Table 1. FIRETEC predicted versus experimental rates of spread in shrubland and grassland fires

Fuel type	Fuel height (m)	Fuel load (kg/m ²)	FMC ⁽¹⁾ (%)	Fire width (m)	Wind speed (m/s)	Rate of spread (m/s)	
						FIRETEC	Experiment
Shrubland France ⁽²⁾	0.3	0.5	80	10	2.7 at 2 m	0.08	0.07
	0.4	0.8	140	10	5.6 at 6 m	0.10	0.07
	0.4	0.8	70	10	5.7 at 6 m	0.12	0.09
Shrubland, Spain ⁽³⁾	0.5	2.2	65	25	2.1 at 2 m	0.039	0.043
Grassland, Australia ⁽⁴⁾	0.7	0.7	5	50	3.0 at 2 m	0.7	0.7-0.8
	0.7	0.7	5	50	6.0 at 2 m	2.8	1.8-2.7

Flux radiatifs simulés et prédits

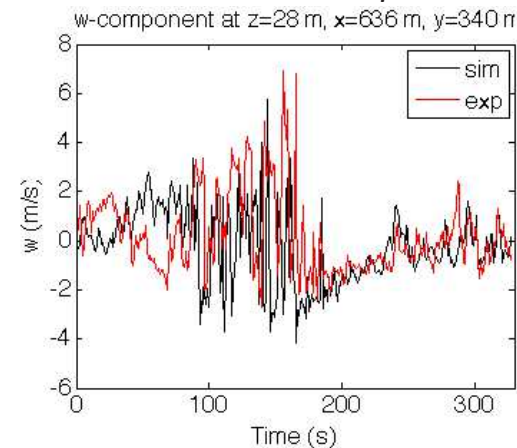


FIRETEC vs ICFME Exp
(Pimont et al. 2014 ICFRR)

FIRETEC vs ICFME Exp (Linn et al. 2012 CJFR)



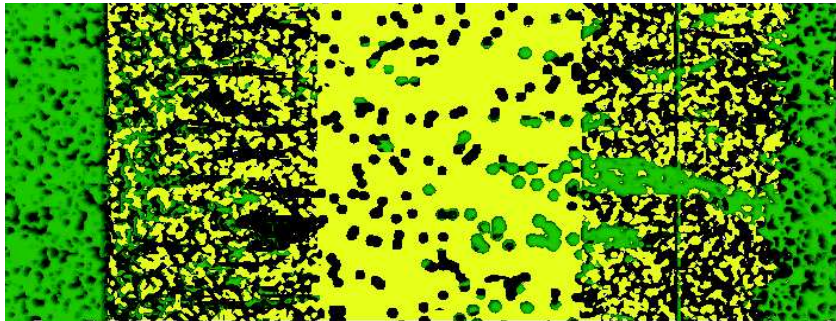
Vitesse verticale dans le panache



FIRETEC vs Fireflux Exp
(Dupuy et al. 2014 ICFRR)

FIRETEC : applications

Consommation des arbres en peuplement et sur éclaircie



Pimont et al. 2011, AFS

Impact de la fréquence de brûlage dirigé

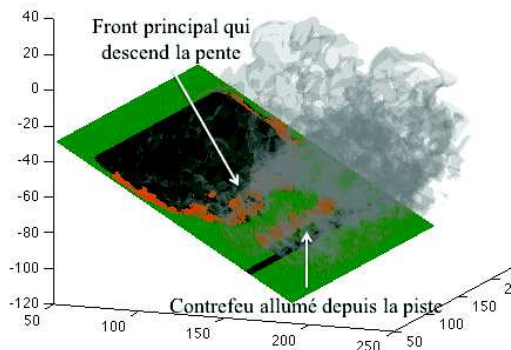


Intensité de feu en fonction du nombre d'années après traitement

Communauté	1	2	3	4	Contr
Taillis pin/chêne	1500	2000	13100	13800	14800
Taillis éparse	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, EM

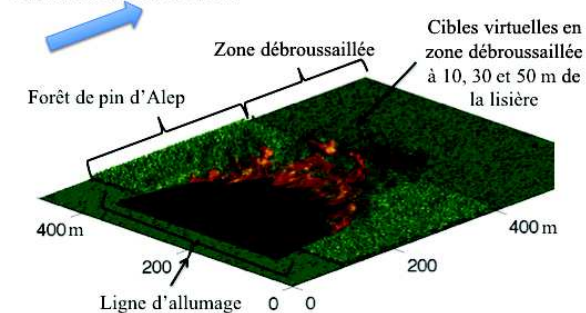
Simulation de contre-feu



Dupuy et al. 2011, EM

Effets du débroussaillage sur les flux (OLD)

Directions du vent et du feu



Pimont et al. 2014, ICFR

Radiant heat flux (kW m⁻²) Gas temperature (°C)
d=10 m d=30 m d=50 m d=10 m d=30 m d=50 m

Run	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)
Run 4 30% slope 10 m-respaced trees	30 (39)	12 (13)	8.0 (8.9)	345 (422)	113 (143)	63 (70)

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

1. Configuration simple

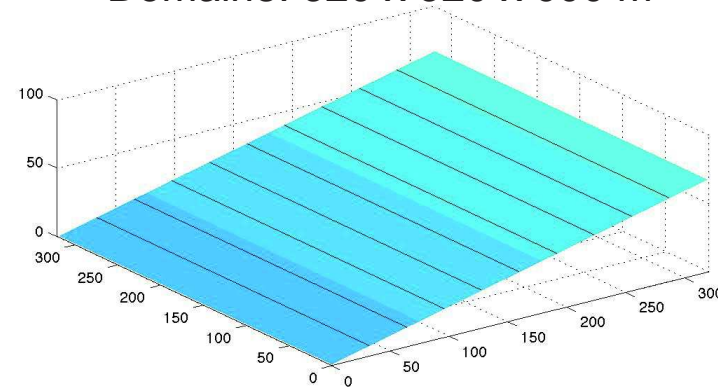
Simulations FIRETEC dans garrigue à Chêne kermès

Vent



Pimont, Dupuy et al. (2012)

Domaine: 320 x 320 x 600 m

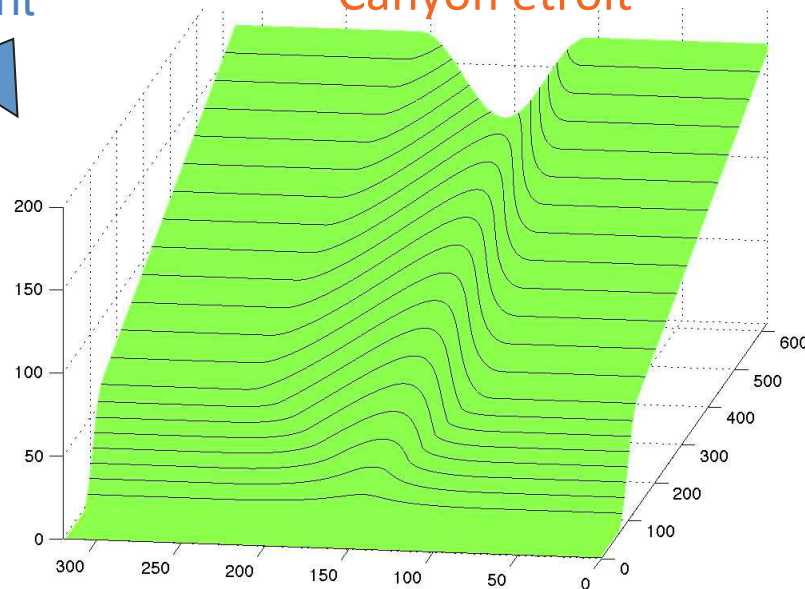


2. Topographie complexe

Vent



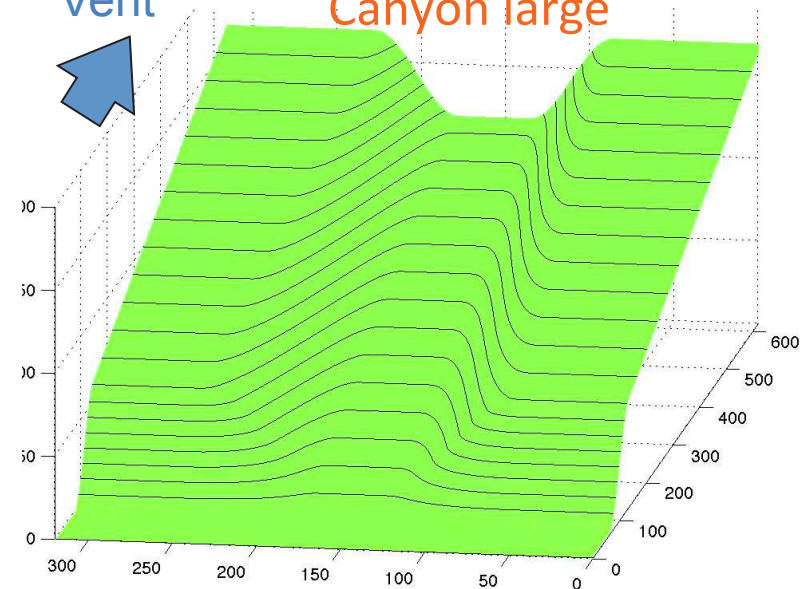
Canyon étroit



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

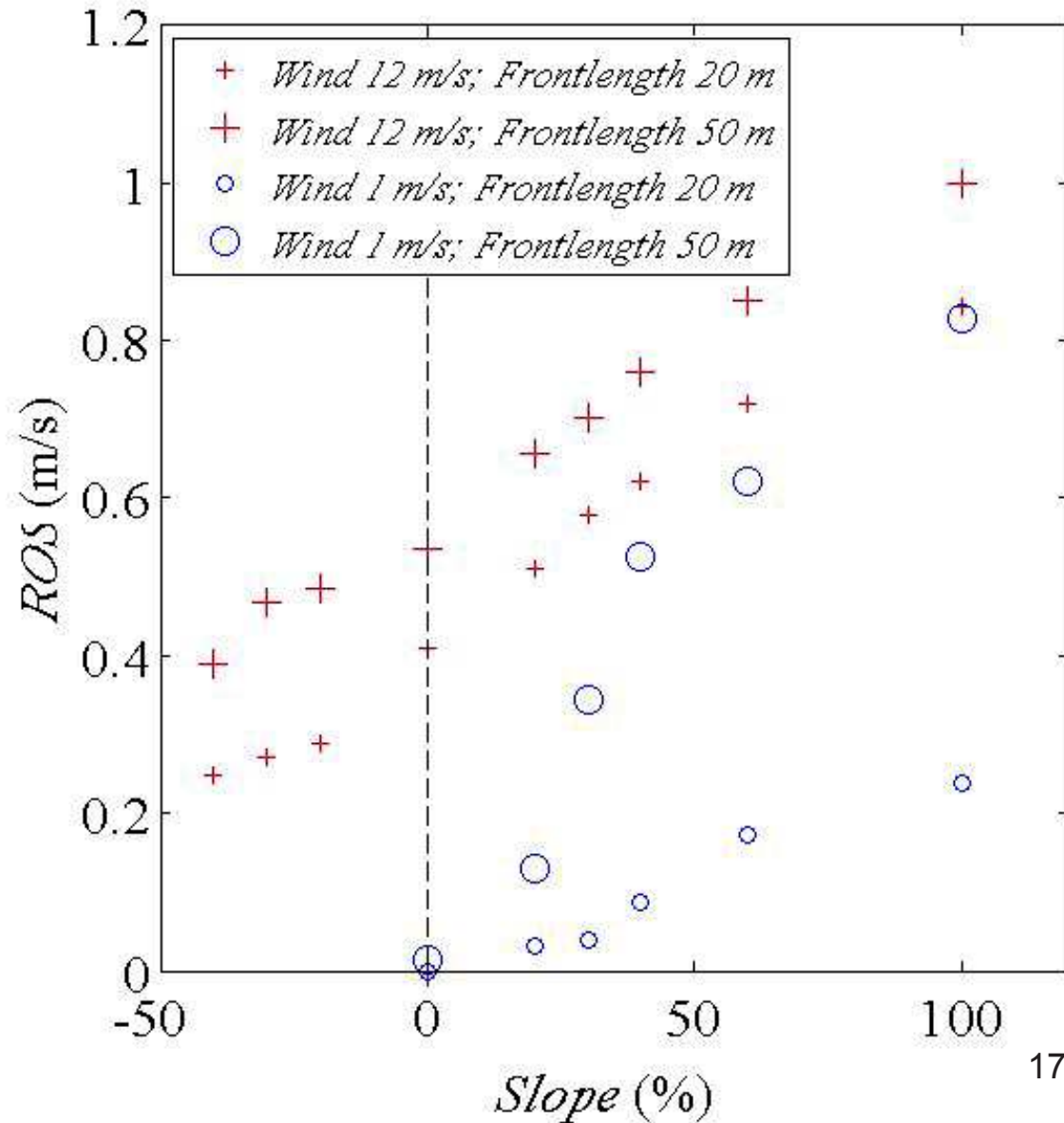
⇒ Fort effet de la largeur de front par vent faible

Domaine: 320 x 320 x 640 m

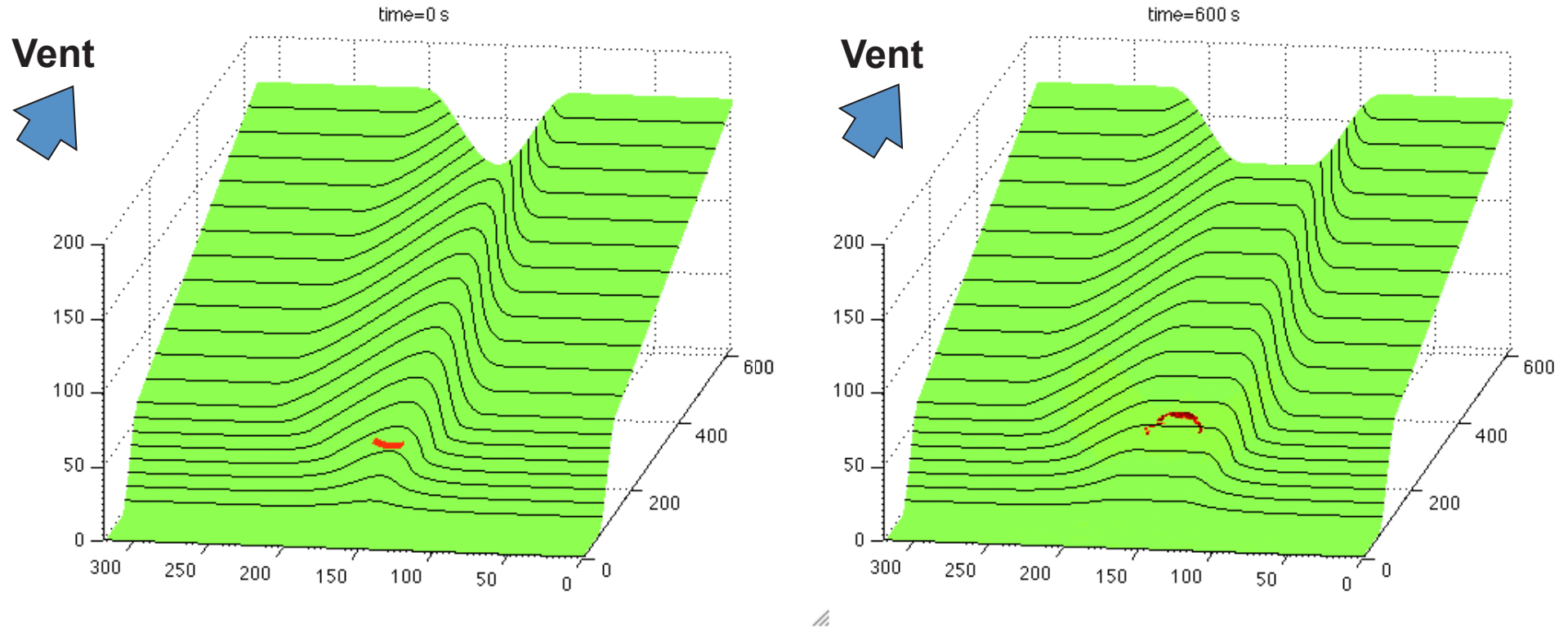
Vent: 1 et 12 m/s à 10 m

Pente: - 40% to 100%

Largeur feu: 20 and 50 m



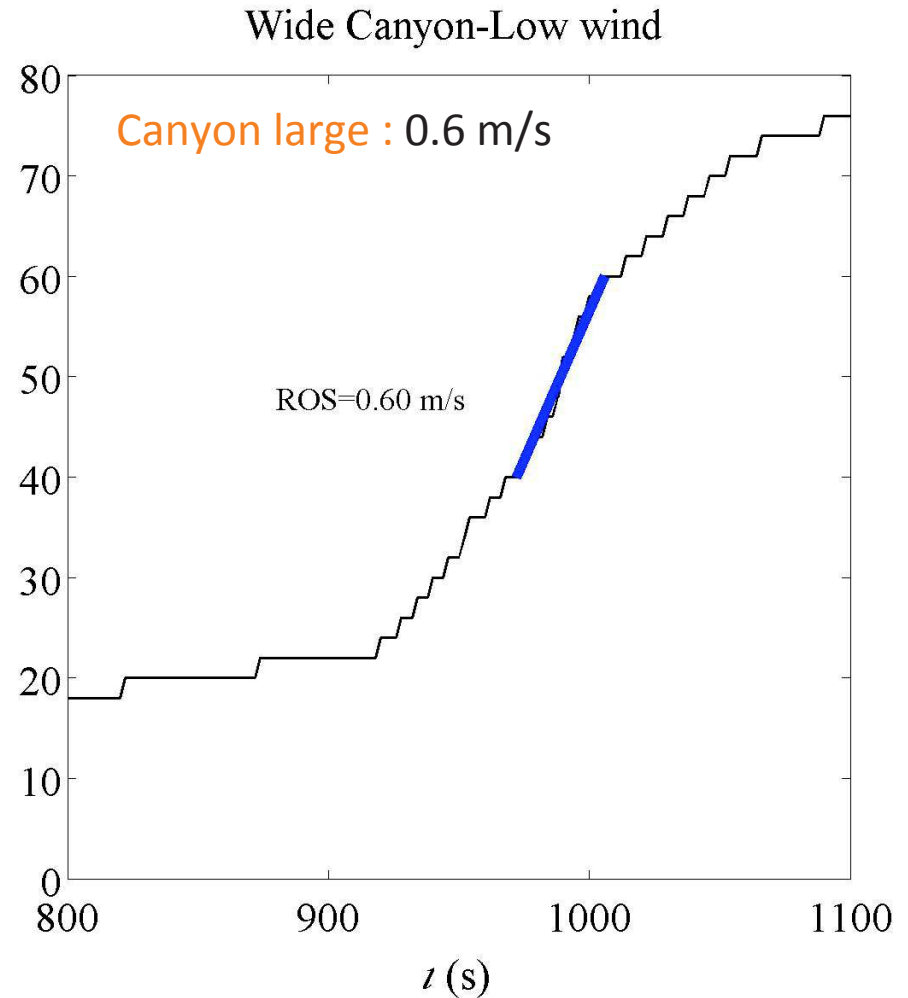
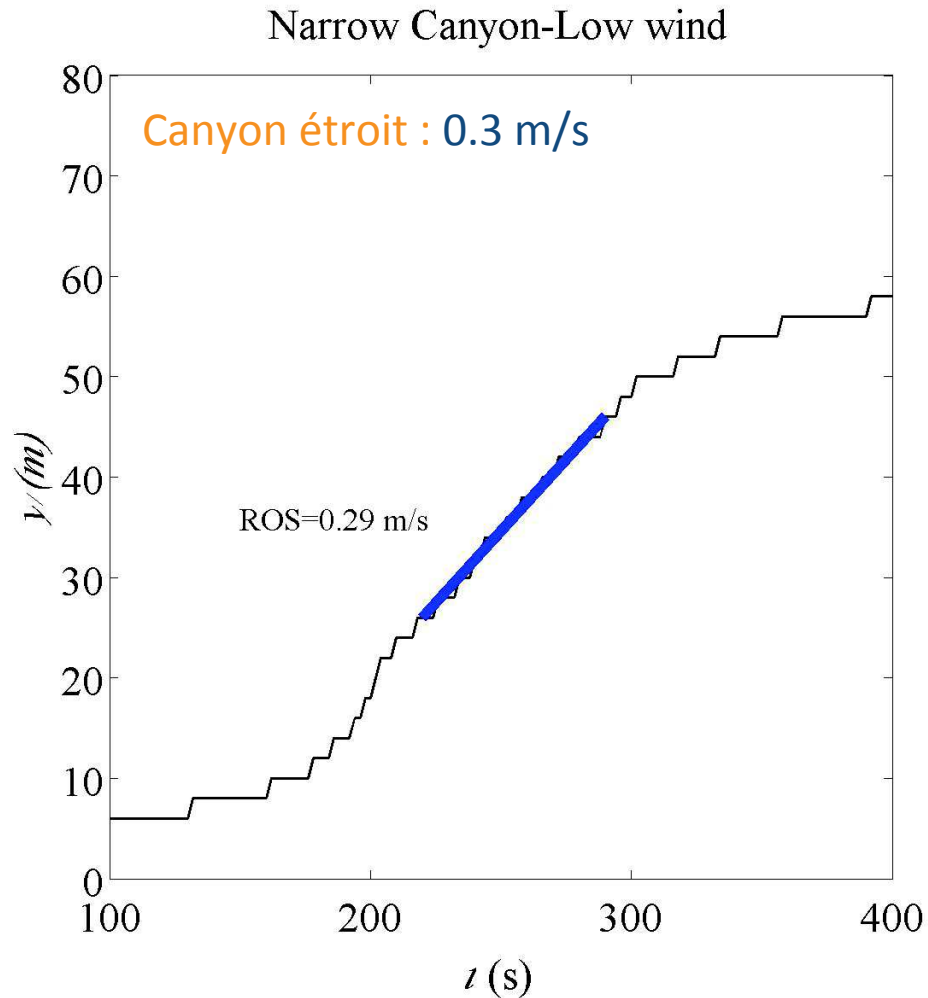
Simulation par vent faible



- **Canyon étroit** : le feu atteint rapidement les côtés du canyon et monte
- **Canyon large** : le feu reste plus longtemps dans le canyon, puis monte
=> le feu de flanc en fond de canyon devient feu de tête, avec un front plus large en bas de pente
- Forme en V caractéristique des feux montant une pente sans vent

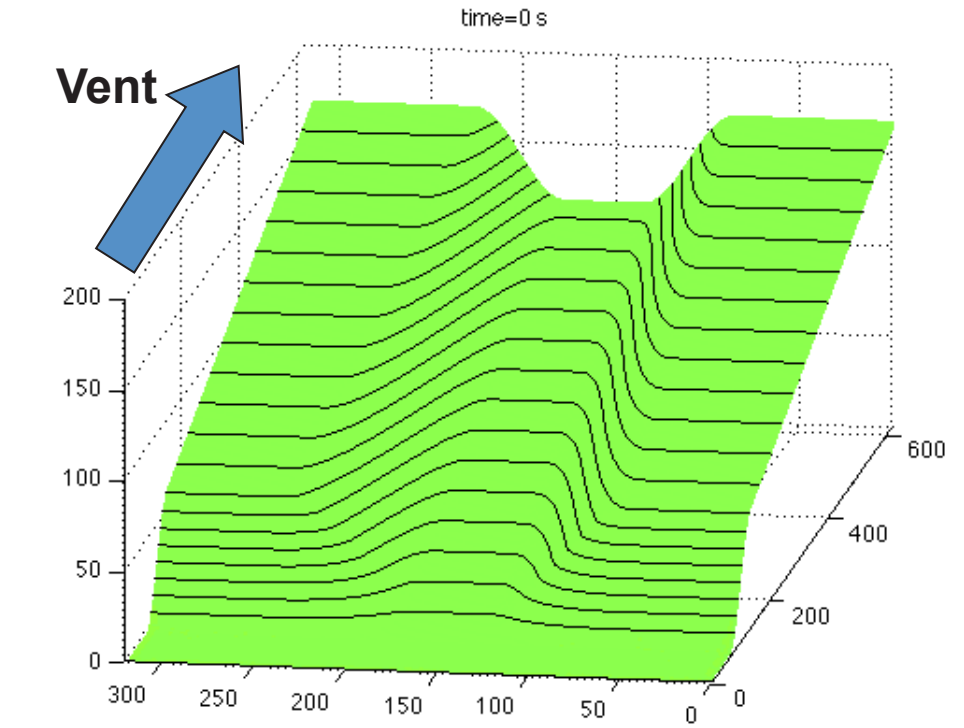
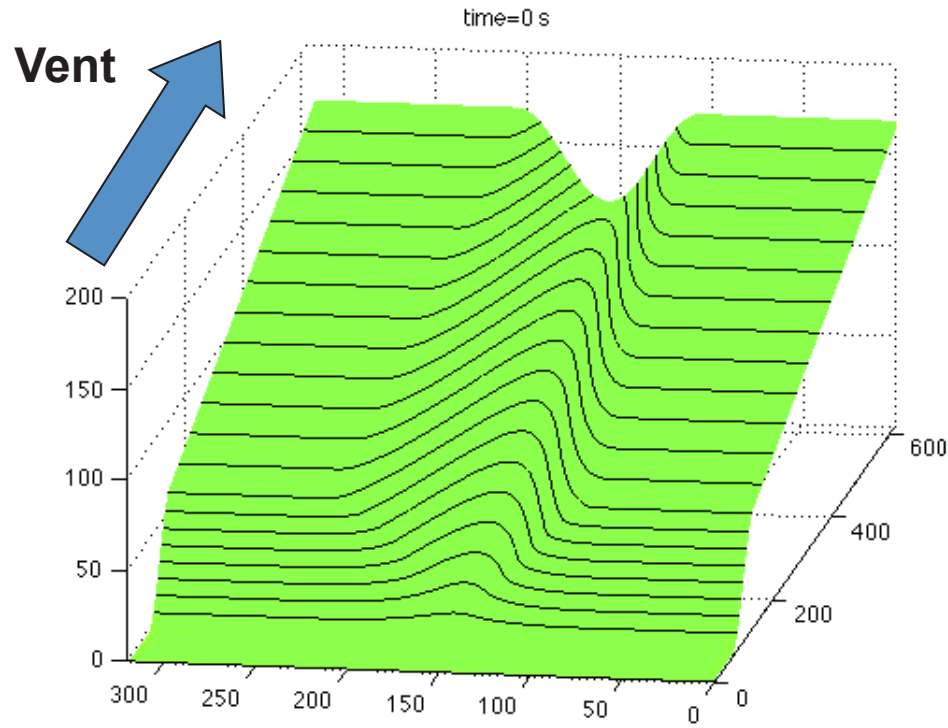
Simulation par vent faible

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



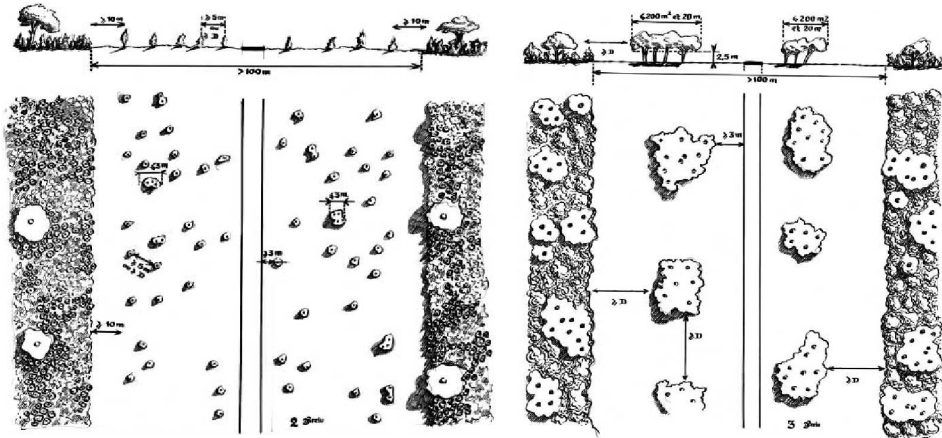
Par vent faible, les vitesses de montée sont très différentes pour des largeurs de front différentes en bas de pente

Simulation par vent fort



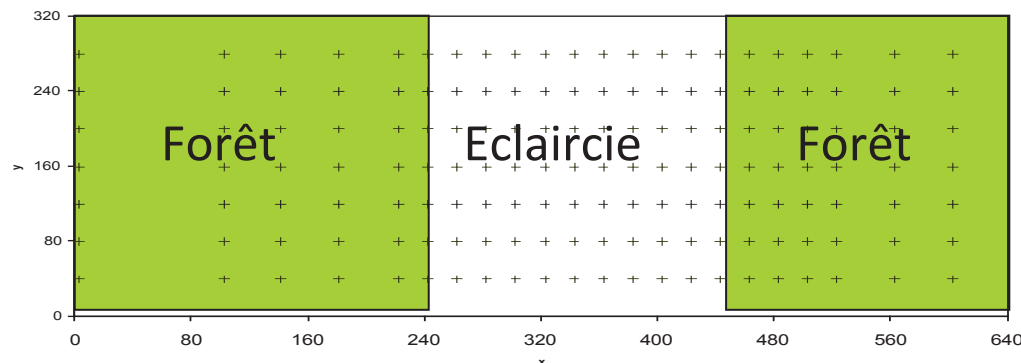
Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu

Eclaircies / taille de patches sur les coupures de combustible



Recommandations à dire d'expert
(Rigolot et Costa 2000)

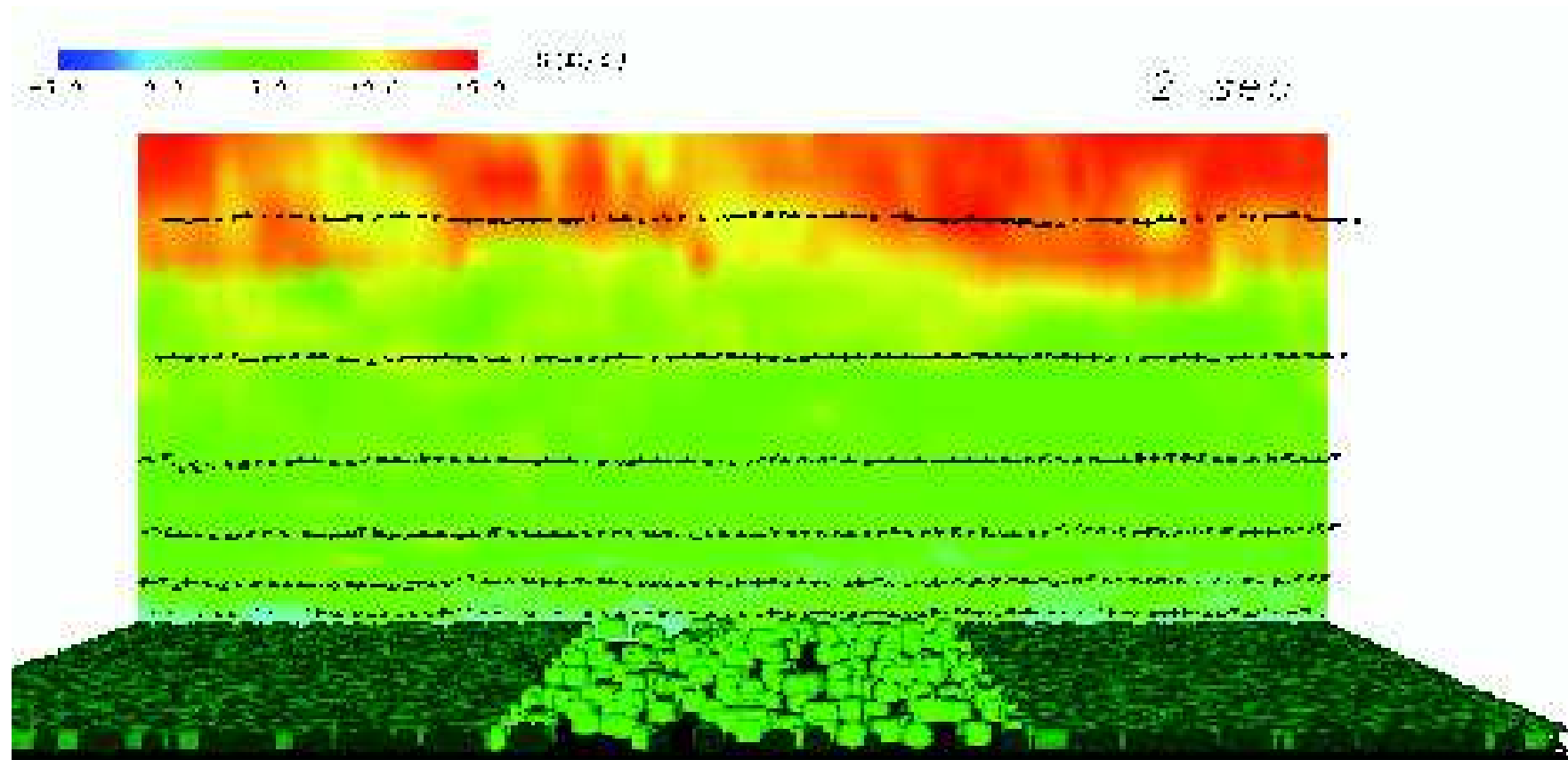
Simulations de l'impact de l'éclaircie sur le vent et la propagation du feu



Trois niveaux d'éclaircie
et d'agrégation d'arbres

Pimont, Dupuy et al. (2011)

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



Simulation avec 25 % de couvert arboré dans la zone éclaircie

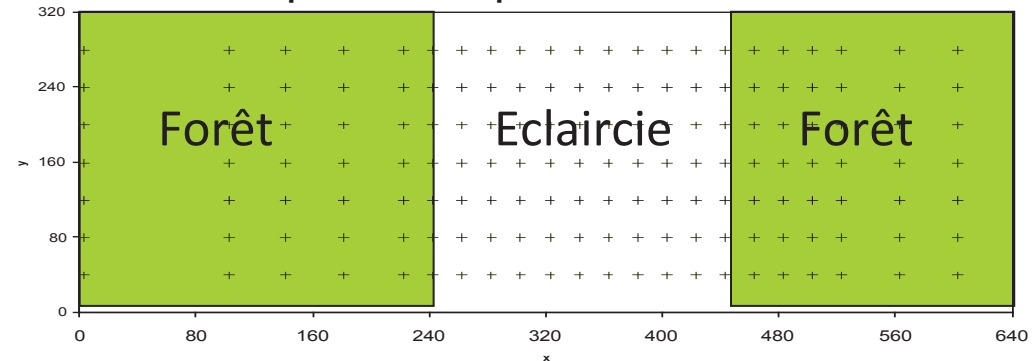
Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu

Effet du recouvrement

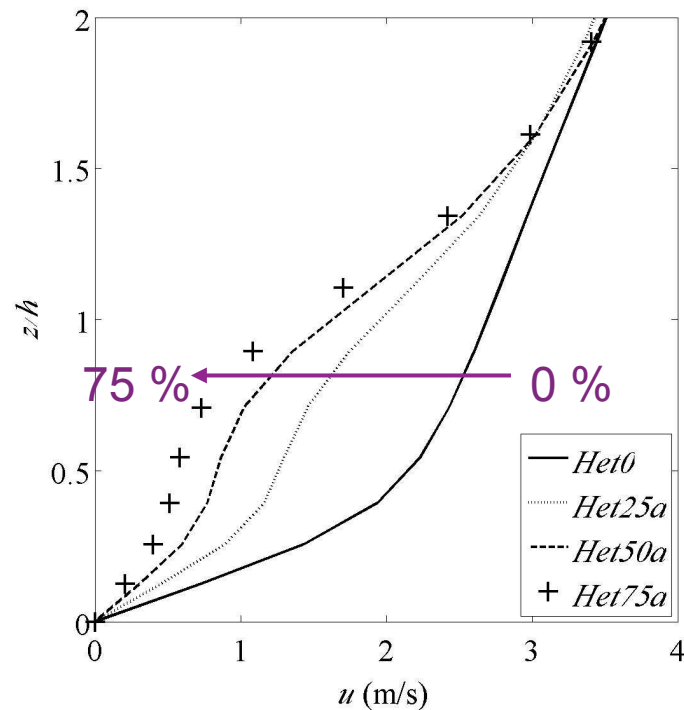
(0, 25, 50 et 75%)

Un couvert de 25 % réduit le vent au sol et la puissance du feu

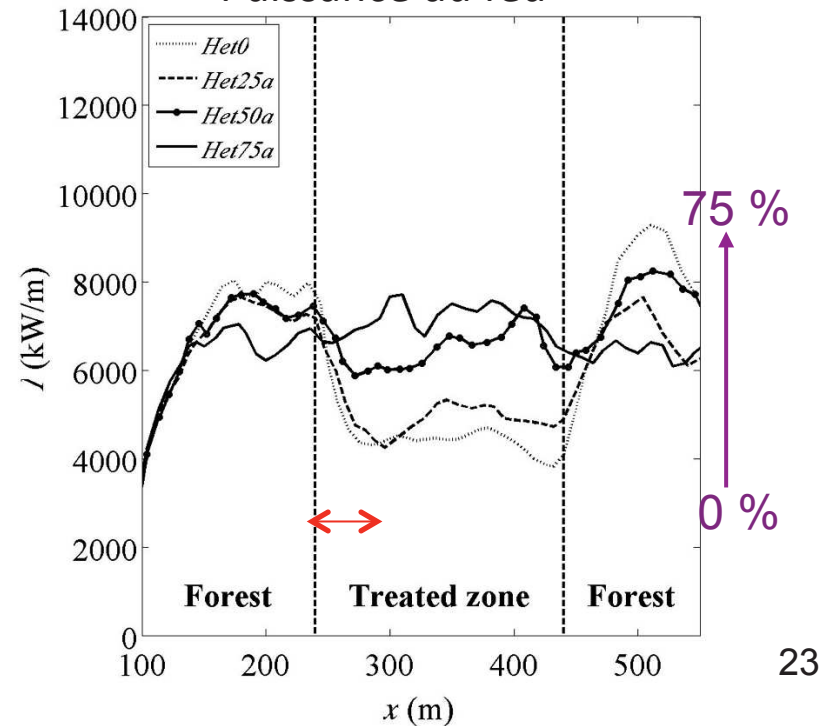
Forêt de pins d'Alep



Profils de vent



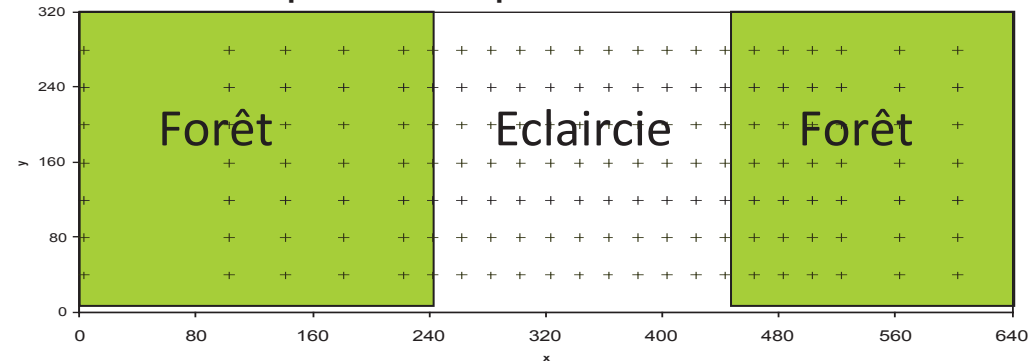
Puissance du feu



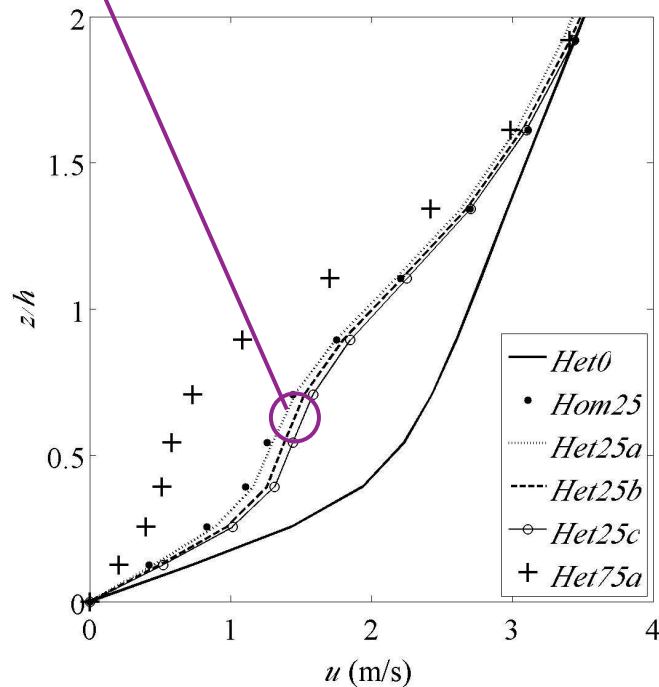
Effet de l'hétérogénéité de la canopée sur le vent et la propagation du feu

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

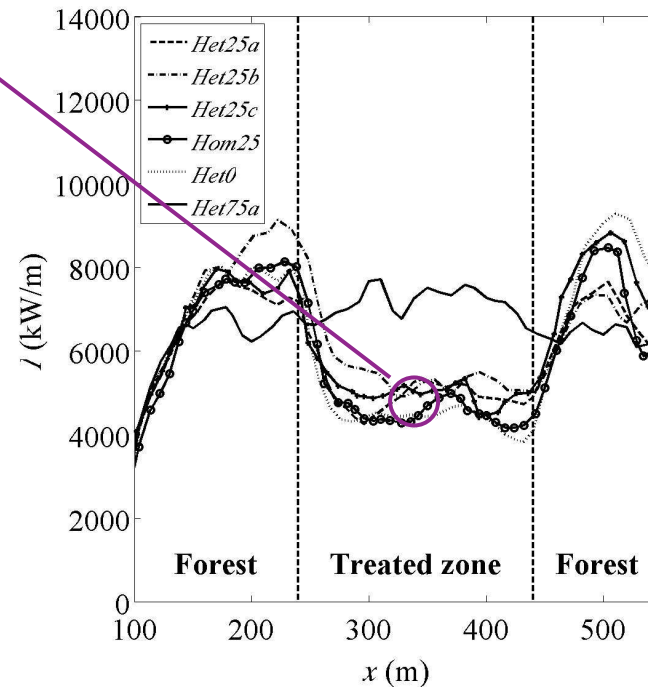
Forêt de pins d'Alep



Profils de vent



Puissance du feu



Hétérogénéité des dommages aux arbres

Rôle des structures turbulentes

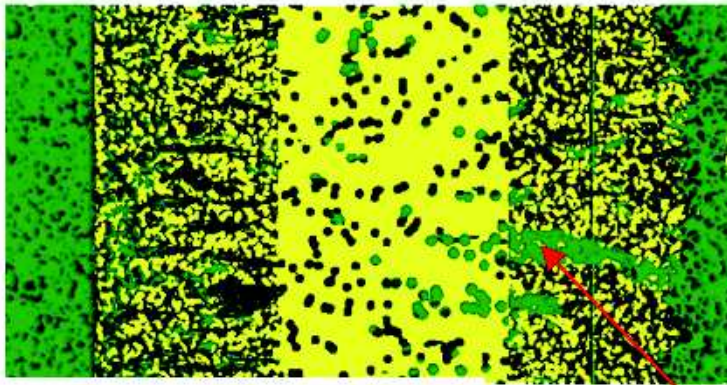
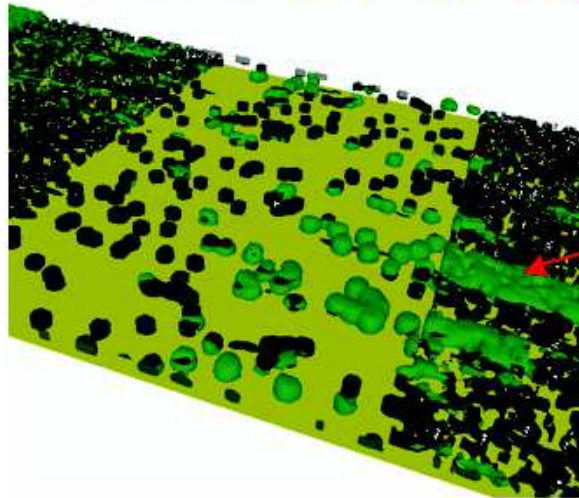
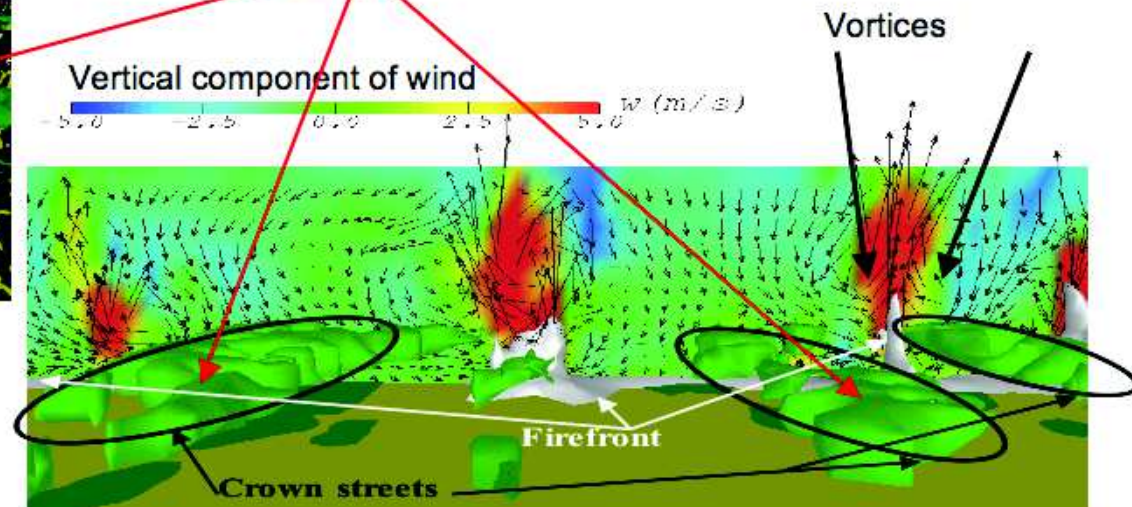


Photo Kevin Hyer, Jones Center for Ecology
Georgia (US)



Crown Streets



Conséquences des attaques de scolytes sur les feux

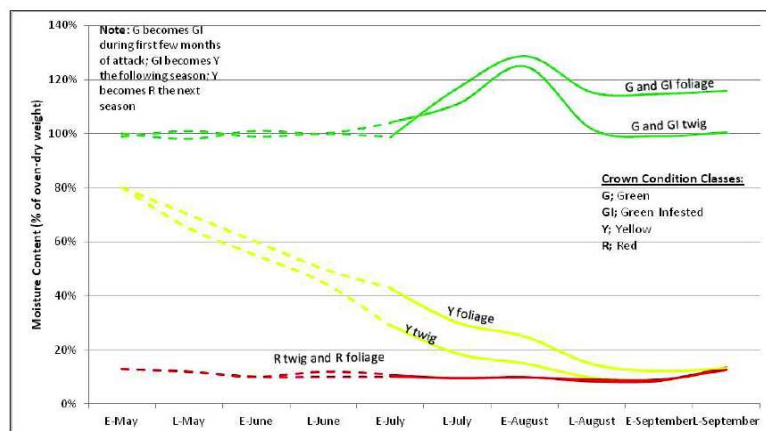
Des conditions de combustible inédites :

- Patrons spatiaux des dommages, variés
- Chute de la teneur en eau la première année
- Aiguilles sèches en cimes plusieurs années (stade rouge)
- Chute des aiguilles au sol (stade gris)

Attaques massives favorisées par un climat sec et chaud (*Hicke et al. 2012*)



Evolution de la teneur en eau du feuillage (Page 2006)



Une question controversée en Amérique du Nord :
Plus de surfaces brûlées ?

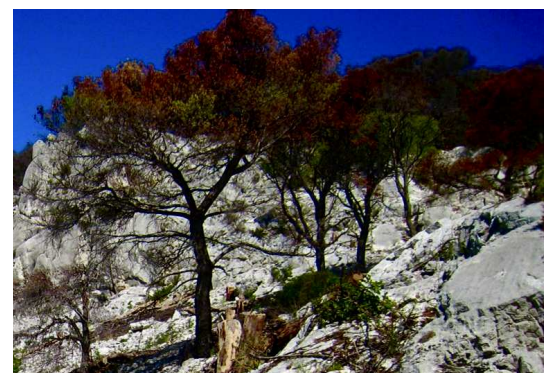
-> Non, les années les plus sèches (*Hart et al. 2015*)

Des feux plus intenses ?

-> Les modèles empiriques ne peuvent pas répondre

En France, les pullulations dans les zones à risque incendie sont limitées

Pin d'Alep au « stade rouge » près de Toulon



FIRETEC : simulations de feu après attaques de scolytes

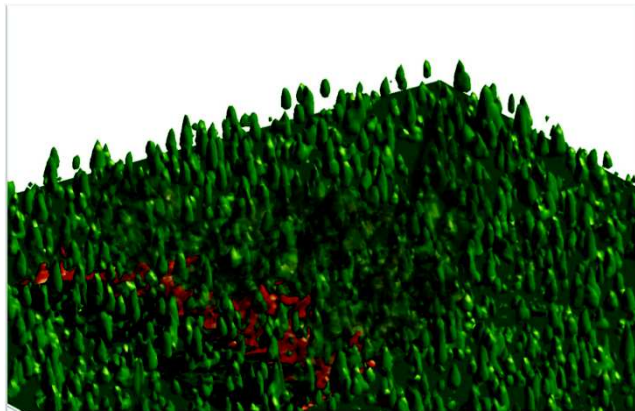
Collaboration INRA – LANL – USDA Forest Service

- Peuplements de pins Ponderosa, en mélange avec des feuillus
- Trois niveaux de mortalité des pins observés : 20, 58, 100 %
- Les feuillus ne sont pas touchés par le scolyte du pin

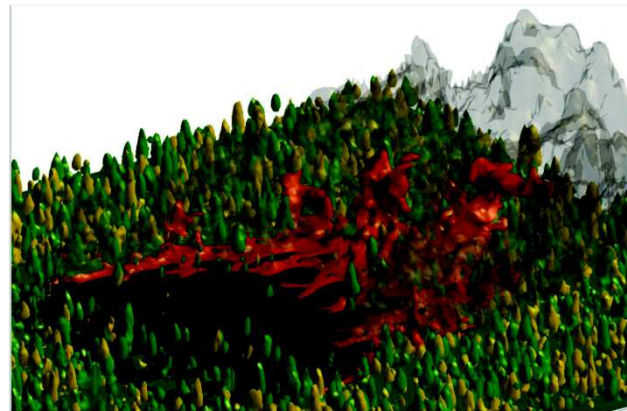
Pins d'Alep au stade rouge



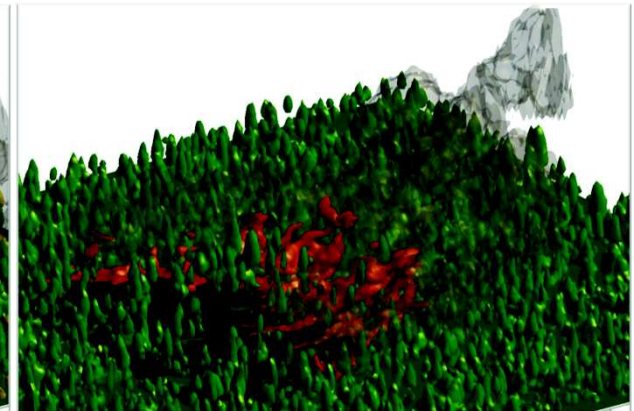
Peuplement sain



58% mortalité, stade rouge



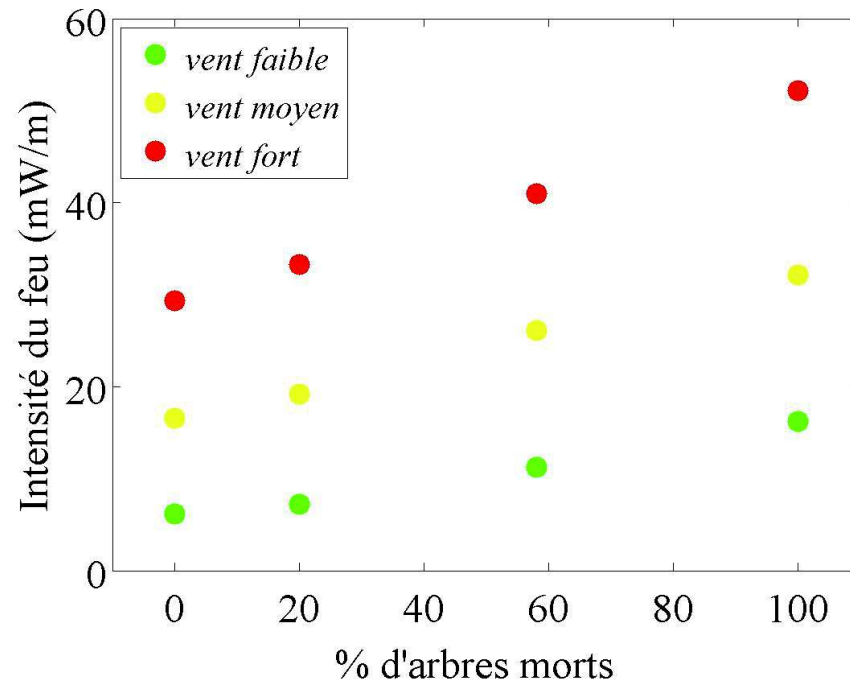
58% mortalité, stade gris



Sieg et al. 2016, submitted to EA

L'intensité du feu augmente avec les attaques de scolytes au stade rouge

Puissance du feu selon la mortalité des arbres (stade rouge)



- L'intensité augmente ~de manière linéaire avec le taux de mortalité
- L'accroissement est plus fort par vent fort
- Les effets de la mortalité et du vent sur la puissance du feu sont du même ordre



Sieg et al. 2016, submitted to EA

Effets du feu sur les arbres du peuplement attaqué

- Au stade rouge, les arbres morts sont plus largement consommés que les arbres vivants
- **Impact du taux d'arbres scolytés sur la consommation par le feu des arbres survivant à l'attaque d'insectes ?**
 - on calcule la consommation de combustible par le feu des arbres survivant
 - on la compare à la consommation dans le peuplement sain

*Interactions attaques d'insectes – incendie
(impact du feu sur les arbres survivant au scolyte)*

	Vent faible	Vent moyen	Vent Fort
Stade « Rouge », 20 %	2 (0)	3 (0)	1 (0)
Stade « Rouge », 58 %	53 (+++)	10 (+)	2 (0)
Stade « Rouge », 100 %	89 (+++)	12 (+)	2 (0)
Stade « Gris », 20 %	16 (+)	-15 (-)	-3 (0)
Stade « Gris », 58 %	-13 (-)	-20 (--)	-9 (-)
Stade « Gris », 100 %	-15 (-)	-24 (--)	-24 (--)

Au stade rouge :

- 53 à 89 % de dégâts en plus par vent faible, pour des taux d'infestation moyens à forts
- Pas d'effet par vent fort

Au stade gris :

- 10 à 25 % de réduction des dégâts
- sauf pour un taux faible et un vent faible : aggravation de 16 %

Indépendance (0), synergie (+), ou antagonisme (-) des perturbations



Sieg et al. 2016, submitted to EA

Conclusions

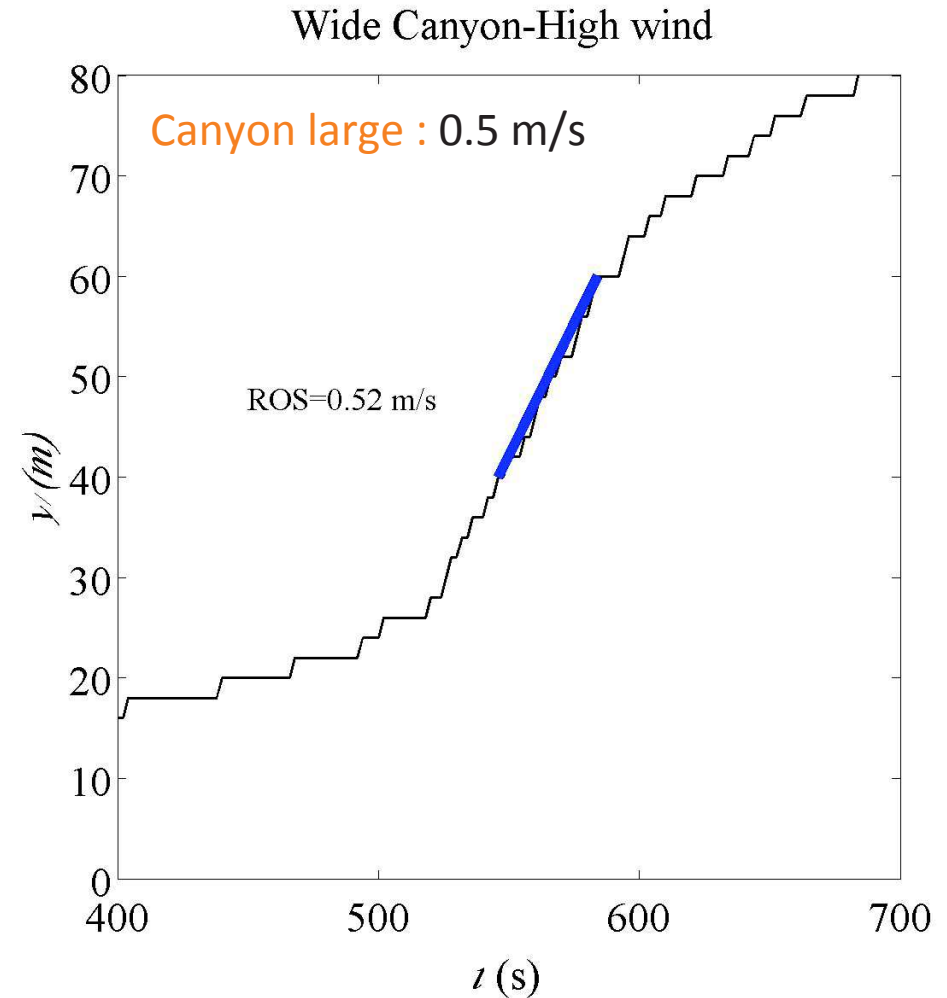
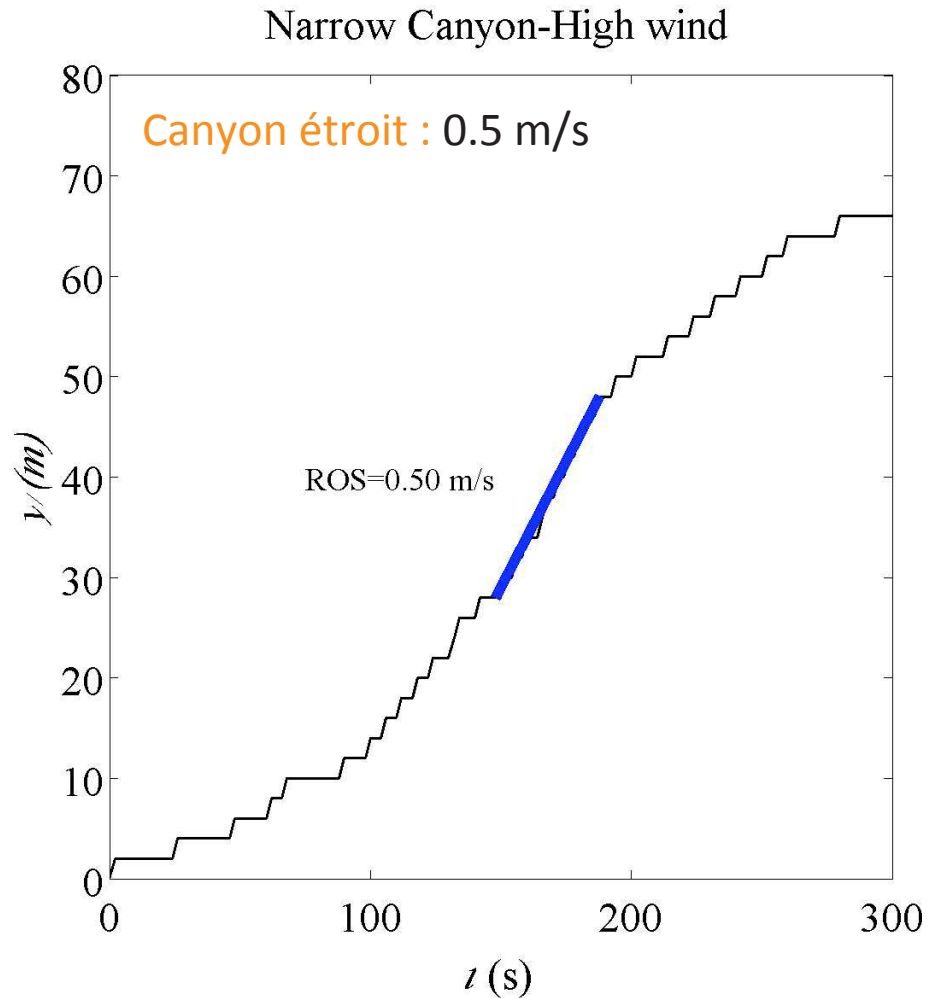
- FIRETEC simule des comportements conformes aux observations
- Les simulations montrent des interactions complexes entre facteurs du feu ignorées par les modèles empiriques.
- Les applications de FIRETEC sont variées, mais limitées par :
 - la ressource calcul,
 - la représentation de l'atmosphère (données initiales et aux limites),
 - la disponibilité des données sur le combustible.
- Multiplier les simulations ?
 - méta-modèles (e.g. courbes de réponse de la vitesse du feu aux paramètres d'entrée)
- Simuler à plus grande échelle ?
 - couplage avec modèle atmosphérique méso-échelle (LANL)



Merci de votre attention

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