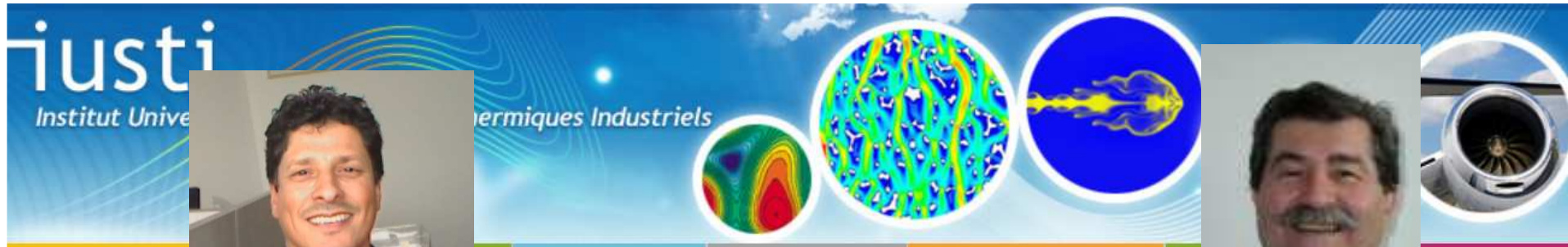


Modélisation des Feux de Forêts : Déterministe vs. Stochastique

Bernard PORTERIE

Equipe Dynamique des Feux
Institut Universitaire des Systèmes
Thermiques Industriels
(AMU/CNRS, Marseille)



A. KAISS



JP. CLERC



Y. PIZZO



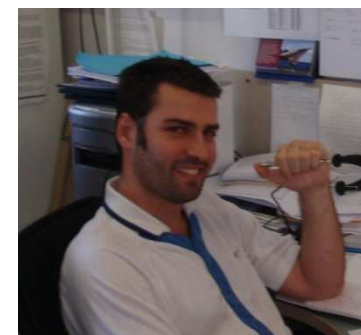
JC. LORAUD



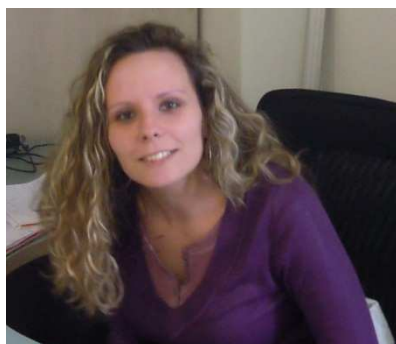
Marseille
université



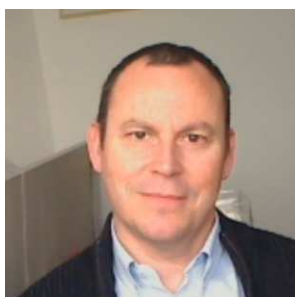
B. KADOCH



Y. BILLAUD
(Post-doc)



N. GIRAUD
(Doct)



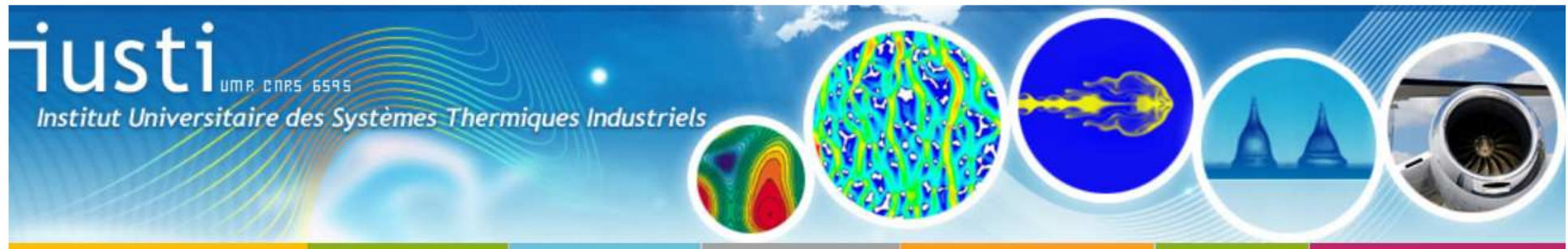
B. PORTERIE



M. De GENNARO
(Doct)



JL. CONSALVI



En collaboration avec:

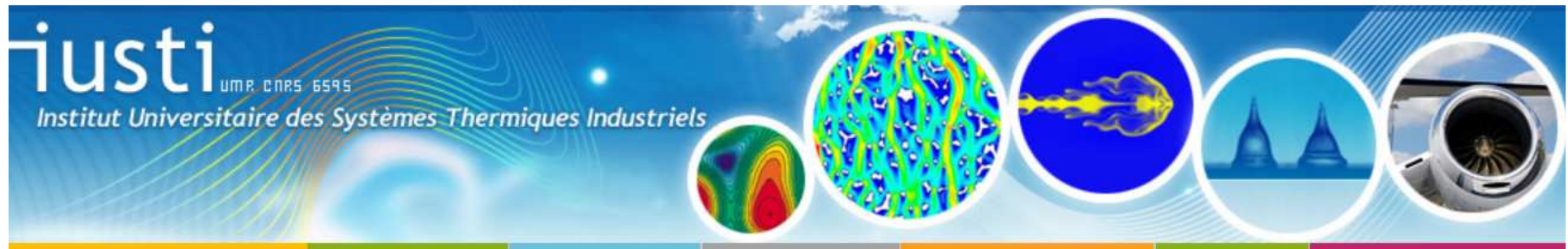
LEMETA, Nancy (Boulet et al.)

PPRIME, Poitiers (Rogaume et al.)

SPE, Corte (Santoni et al.)

USTO, Oran (Zekri et al.)

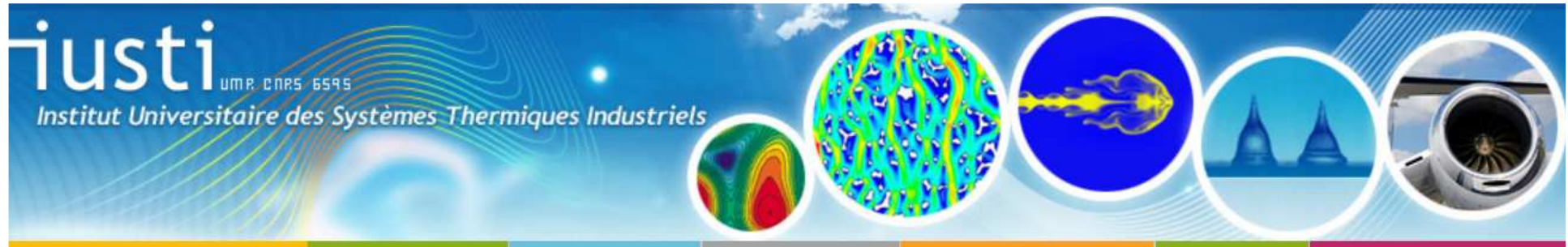
Univ. California, Berkeley (Fernandez-Pello et al.)



Thématiques: modélisation et expérimentations sur les incendies en milieux urbain, industriel et naturel

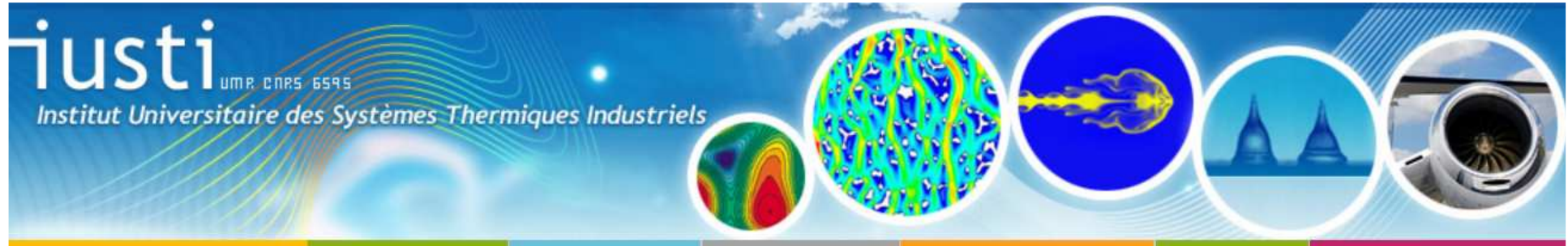
- **Feux de forêts: déterministe vs. stochastique**
- Feux en milieux confinés (tunnel, locaux) et lutte par aspersion d'eau
- Comportement des matériaux exposés au feu (cinétique de dégradation, combustion, production de suies)





Sommaire

- ❖ **Contexte des feux de forêts à grande échelle**
- ❖ **Présentation du modèle de propagation**
- ❖ **Paramètres du modèle**
- ❖ **Quelques cas d'étude**
- ❖ **Validation du modèle de propagation**
- ❖ **Etude de sensibilité**
- ❖ **Fractalité des grands feux**
- ❖ **Conclusions et perspectives**



Sommaire

- ❖ **Contexte des feux de forêts à grande échelle**
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Contexte des feux de forêts à grande échelle

Feux de forêts: un pb environnemental et sociétal majeur, particulièrement dans les écosystèmes tropicaux (Asie, Afrique, etc.)

- Mouvements démographiques rapides (interfaces péri-urbaines, mitage)
- Augmentation de l'activité anthropique (reconversion des terres pour l'agriculture)
- Changement climatique



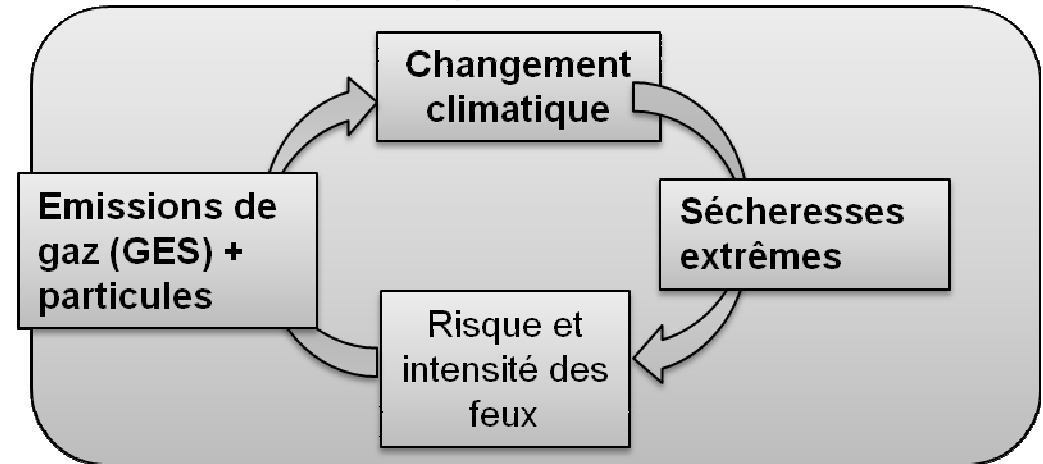
.....Et si la pression diminue dans nos régions, elle ne fait qu'augmenter dans d'autres régions du globe.

Multiplication des interfaces péri-urbaines



Contexte des feux de forêts à grande échelle

Feux/changement climatique



Enjeux actuels:

Améliorer la prévention par une meilleure évaluation du risque incendie

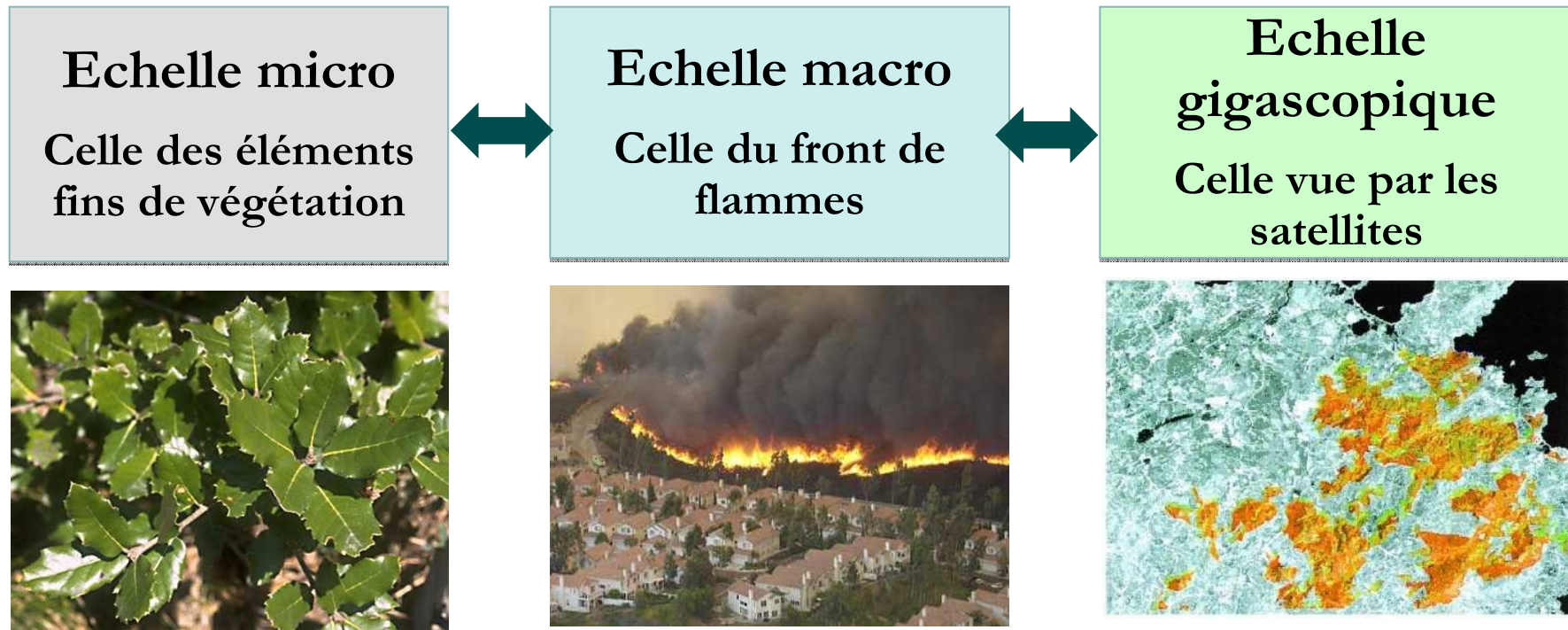
Outils d'aide à la lutte

Mieux quantifier les émissions par les feux → estimation des surfaces et masses brûlées par le feu. Mesures satellitaires (ex: MODIS) → estimations des émissions à $\pm 50\%$

- Développement des modèles de comportement et de propagation
- validation: REX sur feux réels, expérimentations (brûlages dirigés)

Contexte des feux de forêts à grande échelle

Les feux de forêts: un problème multiphysique multi-échelle

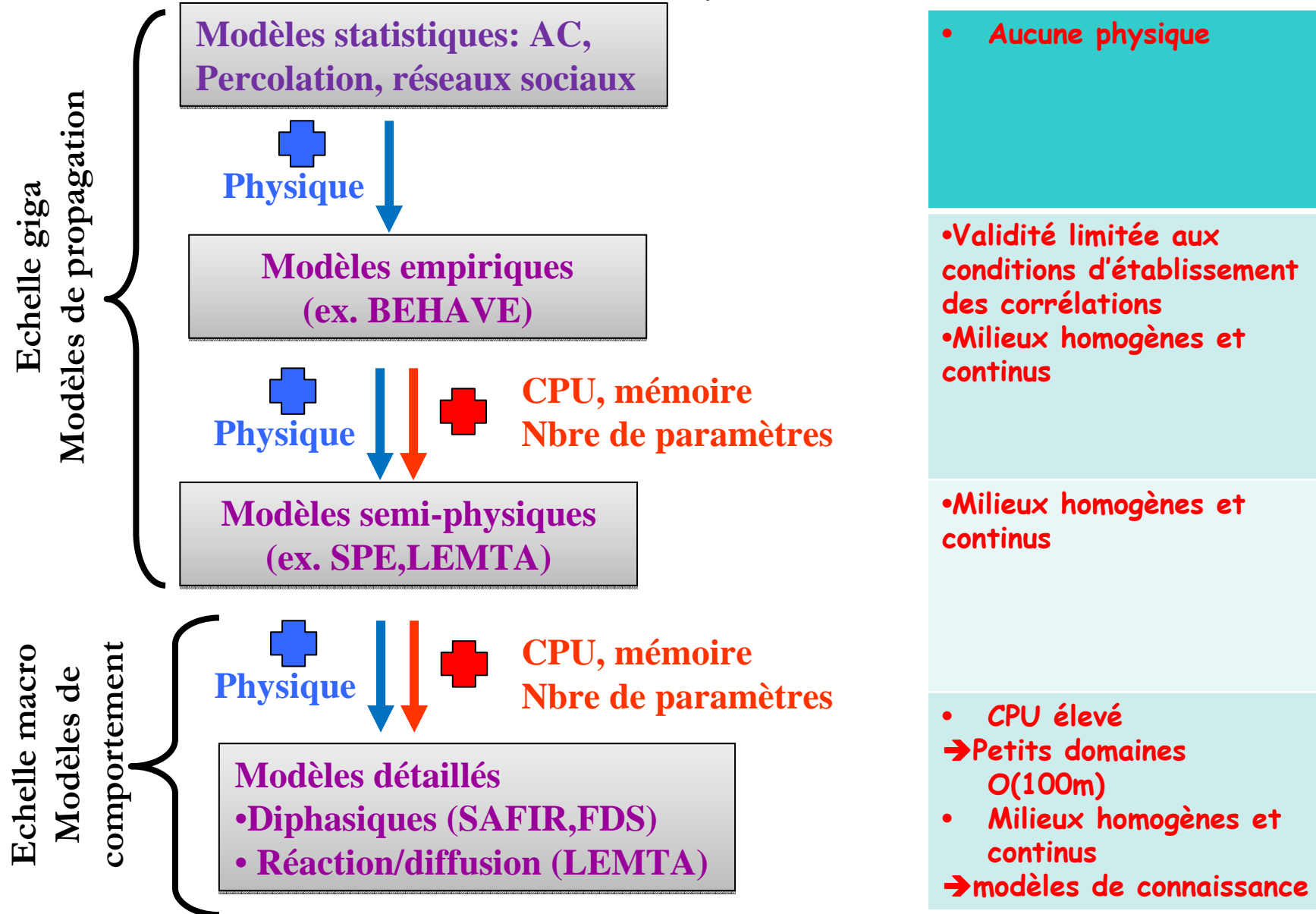


A cette échelle, le feu dépend de la COS, topographie (MNT) et des conditions météo
Effet des sautes de feu (brandons) sur la propagation

✓ **Rex de feux historiques**

✓ **Classe de modèles:** modèles de propagation semi-physiques (SPE, LEMTA) ou stochastiques.

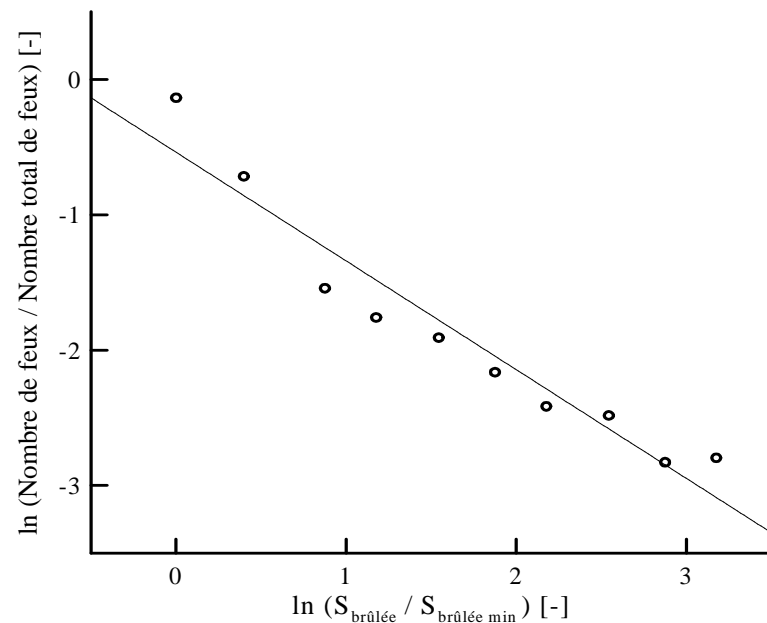
Classification des modèles de feu par échelle d'observation



Double constat

Premier constat: la distribution du nombre de feux vs. surface brûlée suit une loi de puissance dite **loi de Pareto**:

« un feu de grande amplitude est relativement rare, alors qu'inversement, un feu de faible ampleur a de fortes chances de se produire ».



$$Prob(X > x) = \left(\frac{x}{x_{min}} \right)^{-k}$$

Feux PACA:

$$x_{min} \approx 1 \text{ ha} ; k \approx 0.833$$

Canada 1959-1997: 3% des feux représentent 90% des surfaces brûlées

CORSE 2003-2009: 1% -----84%-----

➔ **Nécessité de s'intéresser aux grands incendies de forêts**

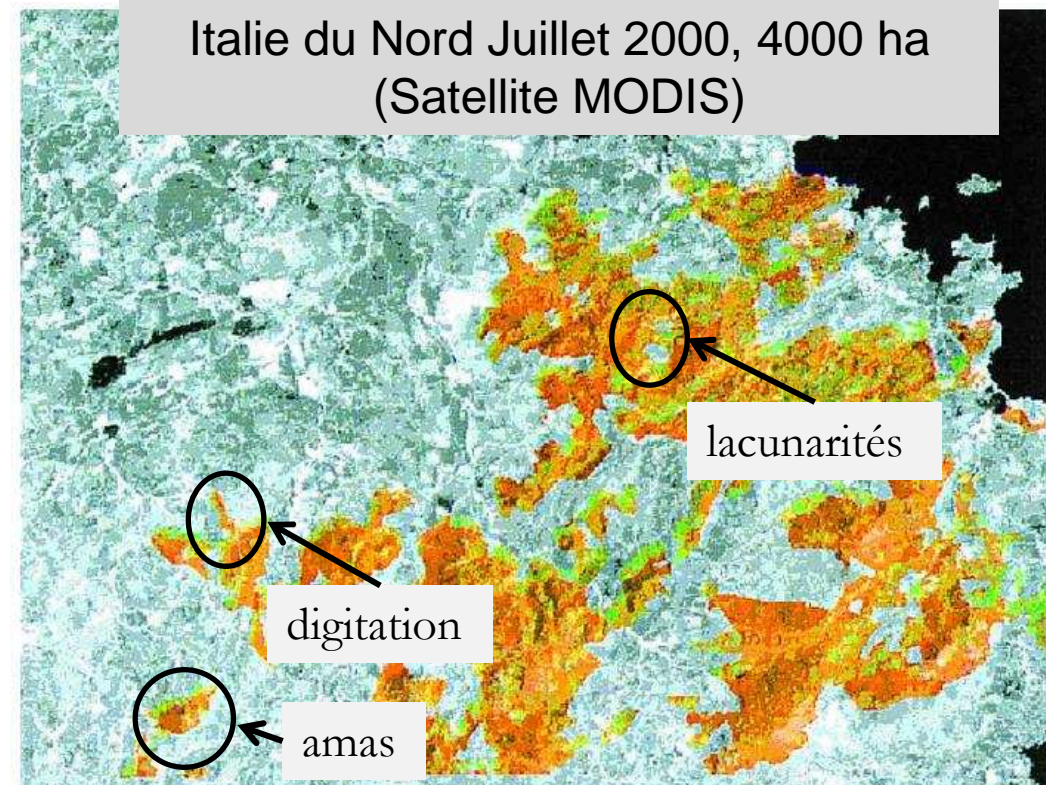
Double constat

deuxième constat: Comportement fractal des grands feux à l'échelle gigascopique.

Comportement fractal dû aux hétérogénéités locales (Vent, topographie, végétation)



Nécessité de décrire le comportement fractal des grands feux



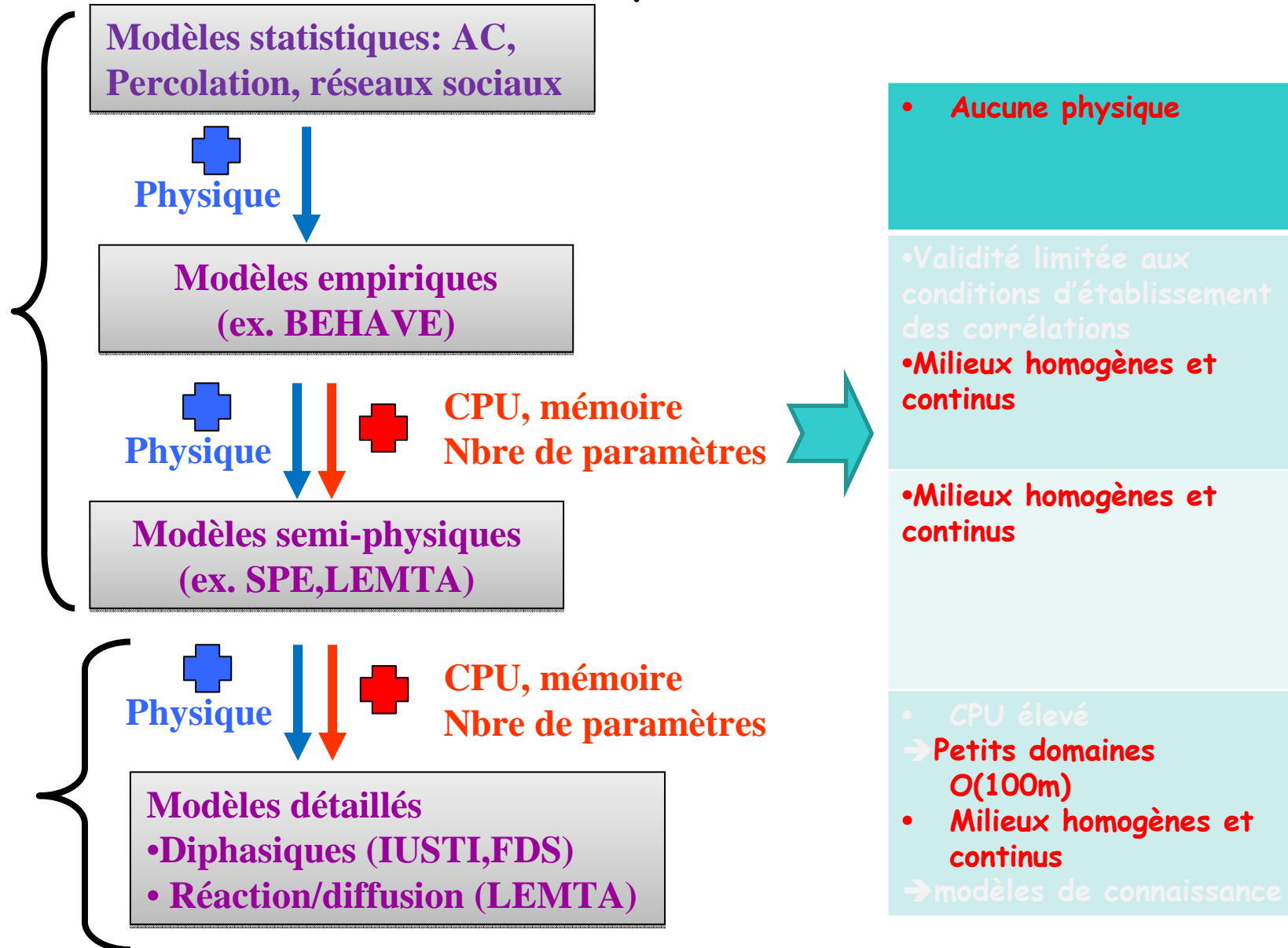
Dimensions fractales (box counting)

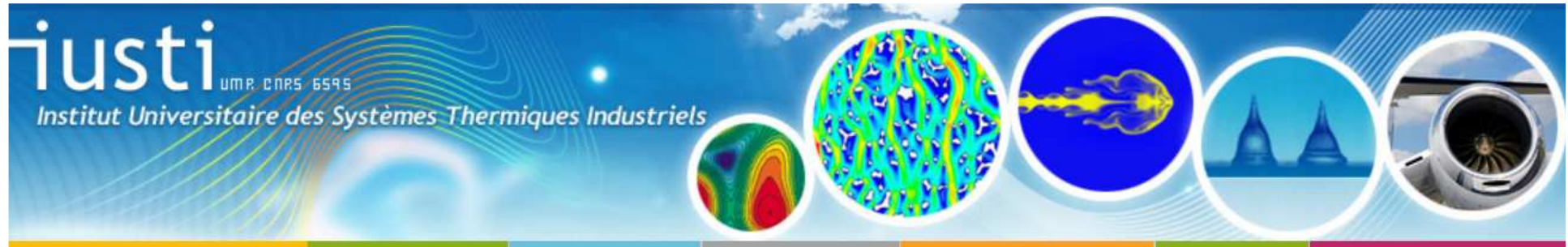
$$D_p \approx 1.3 \text{ et } D_s \approx 1.9$$

(Caldarelli et al., Europhys. Lett., 2001)

Contexte des feux de forêts à grande échelle

Classification des modèles de feu par échelle d'observation



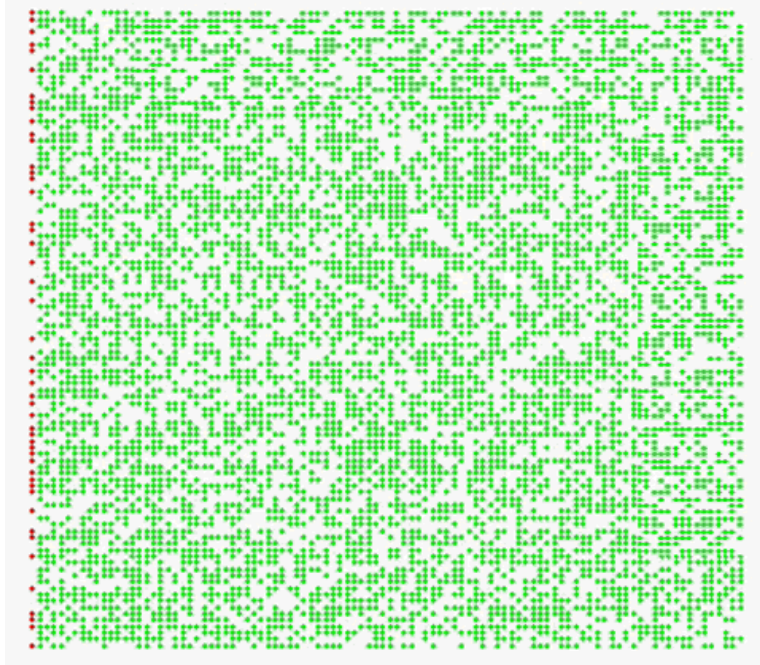


Sommaire

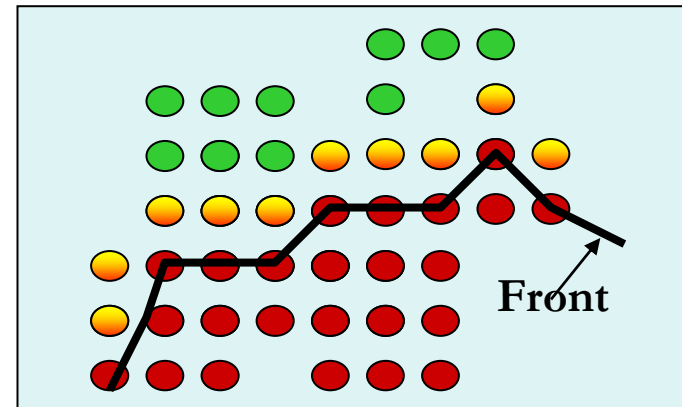
- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ **Présentation du modèle de propagation**
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Modéliser la propagation du feu avec les modèles de réseaux sociaux réguliers (automates cellulaires, percolation...)

Modèle de percolation avec $p=0,6$



→ mauvaise estimation du ros, surface brûlée, propriétés fractales



Connexion entre les proches voisins → ignore les connexions à longue distance (rayonnement, brandons)

→ Les réseaux sociaux réels (peuplement végétal, réseau des thermiciens, facebook, etc.) ne sont ni réguliers ni totalement aléatoires, ce sont **des réseaux dits « de petit monde »**

Réseau de « petit monde » = Voisinage de Von Neumann + connexions aléatoires à longue distance

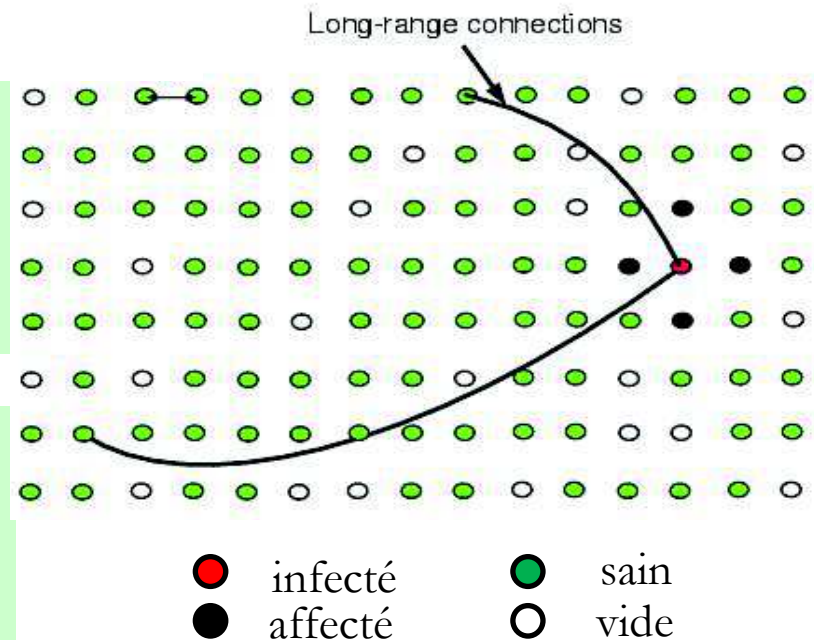
- ✓ Formulation mathématique du modèle de réseau de petit monde
(Watts et Strogatz, Nature, 1998)
- ✓ Applications : épidémies, virus sur internet, connexions d'aéroports,...

Extension aux feux de forêts en 2005

1) Voisinage de von Neumann (4ppv)

→ Domaine d'interaction dû à l'impact thermique (rayonnement + convection) du site en feu.

2) Procédure de pondération des sites basée sur les temps caractéristiques de dégradation et de combustion des éléments végétaux fins.



Le modèle de propagation:

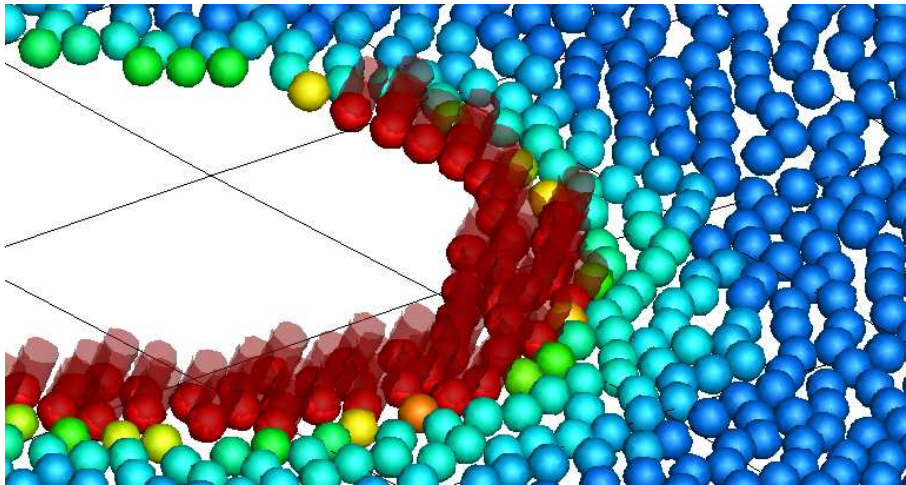
❖ doit prendre en compte les hétérogénéités locales

→ topographie (MNT)

→ vent local (calcul de couche limite avec rugosité/COS)

→ végétation

❖ doit inclure les effets à courte et longue distances (rayonnement, convection, sautes de feu)



Il requiert:

- 1) Construction d'un réseau
- 2) Modèle macroscopique de combustion
- 3) Détermination des paramètres du modèle macroscopique

Construction du réseau



Végétation homogène et uniforme
avec une classe végétale
Réseau **cristallin** monodisperse



Végétation éparse + distribution aléatoire
avec plusieurs classes végétales
Réseau **amorphe** polydisperse avec un
taux de remplissage prédéfini



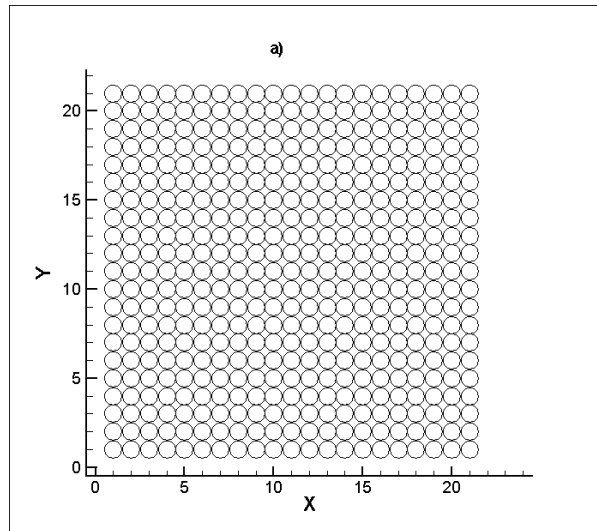
Seuil de percolation: Taux de couverture
végétale au-delà duquel le feu peut se
propager d'un bord à l'autre du domaine

Construction du réseau

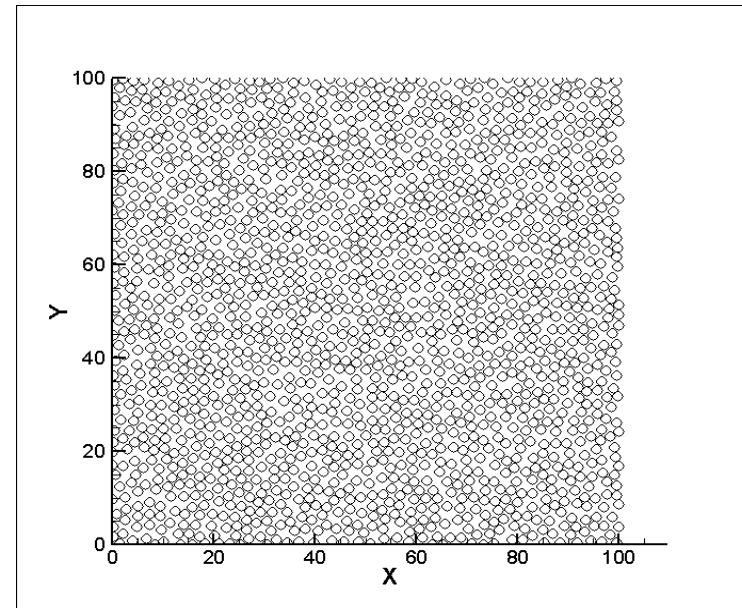
Méthodes de génération sans chevauchement de sites

✓ À la volée

- ✓ Réseau cristallin carré ou triangulaire



→ bien adapté à une végétation homogène



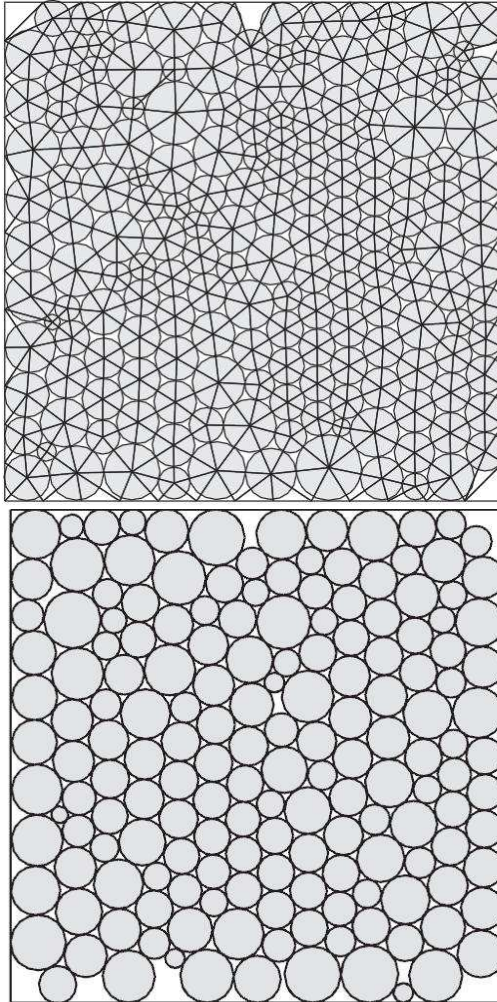
Réseau monodisperse amorphe dopé à 56%.

→ rapide

→ difficulté à atteindre des taux de remplissage élevés (max. 0,56 en monodisperse)

Construction du réseau

- ✓ Minimisation de fonctionnelle

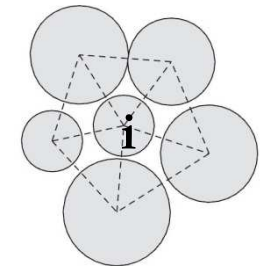


- *Maillage triangulaire non structuré de Delaunay*
- Résoudre le pb de minimisation de la fonctionnelle

$$\min F = \mathbf{E}^T \mathbf{E}$$

Où, pour un site i , E_i est la somme des distances avec ses N_i ppv:

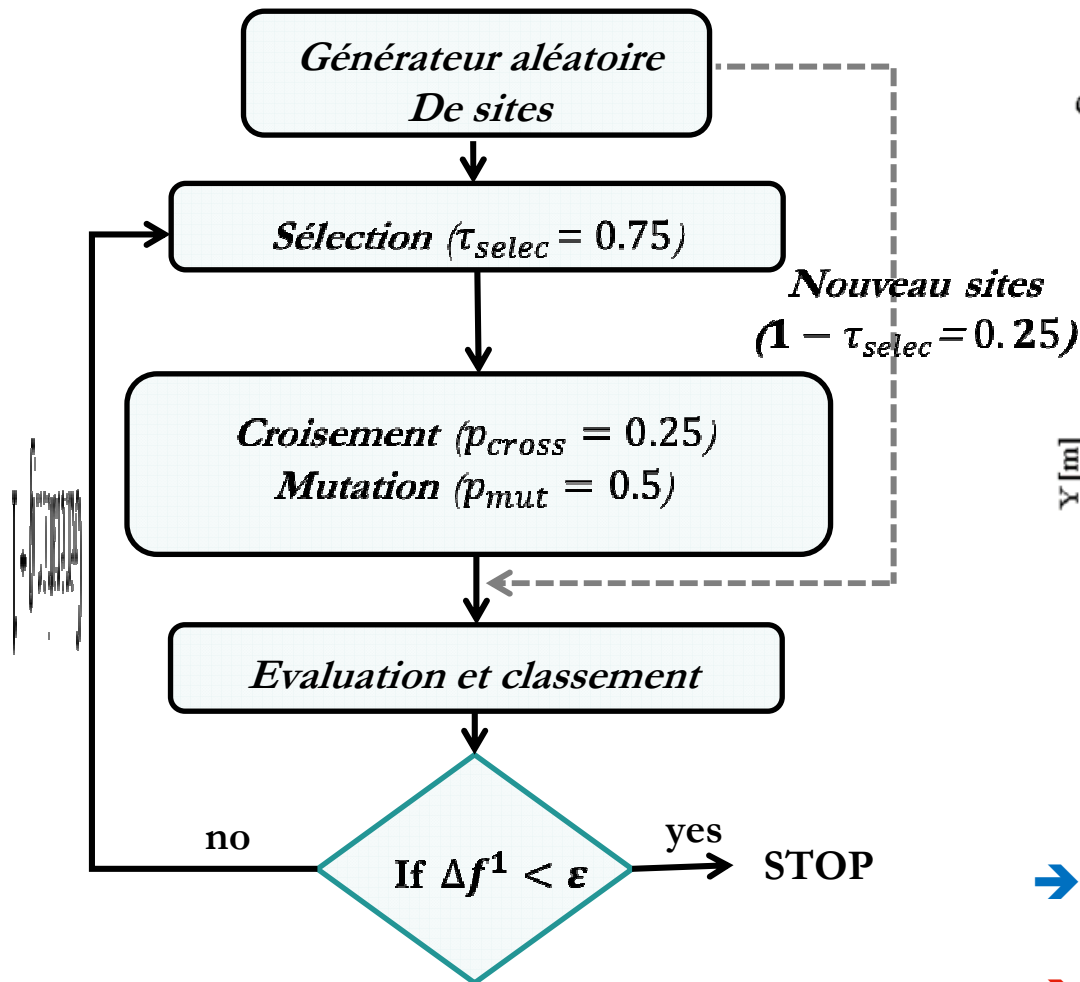
$$E_i = \sum_{j=1}^{N_i} \left[\|x_i - x_j\|^2 - (R_i + R_j)^2 \right]$$



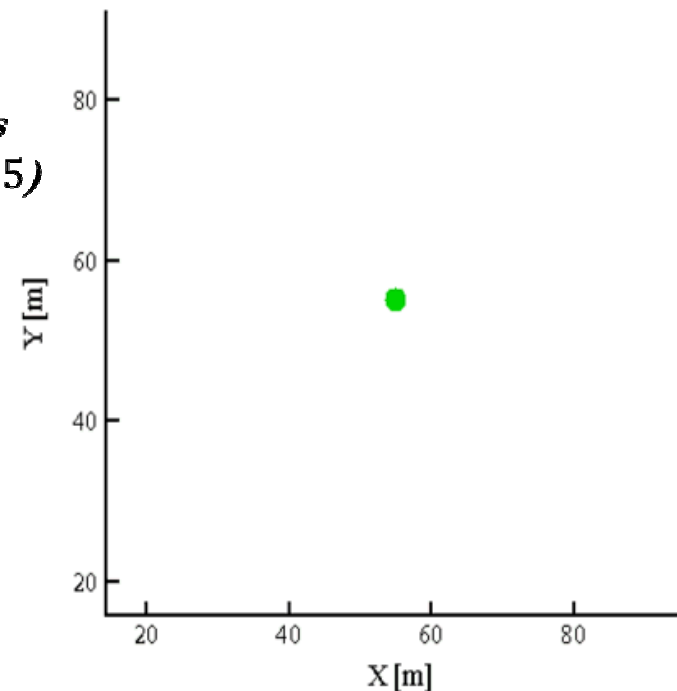
➔ difficulté à maîtriser l'amorphisme et la polydispersité

Construction du réseau

- Algorithme génétique: inspiré de la théorie de l'évolution naturelle de Darwin (sélection, reproduction, mutation, croisement)



Fct d'évaluation basée sur la distance du site à ses 6 ppv
Generation n°0

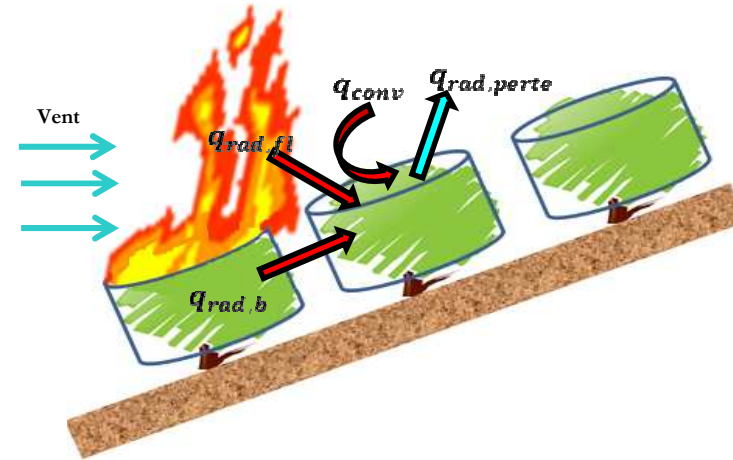


➔ bonne maîtrise de l'amorphisme et de la polydispersité

➔ CPU élevé

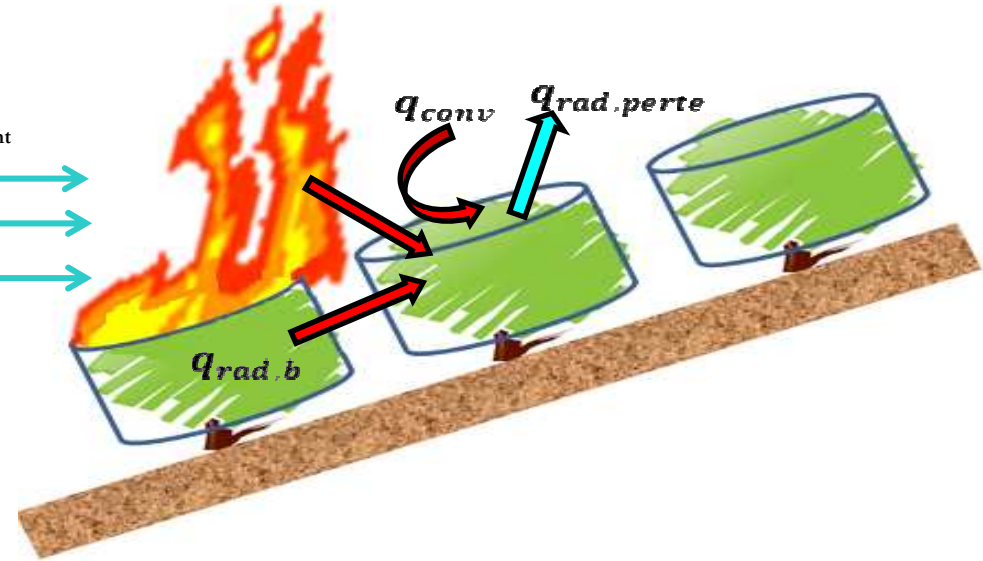
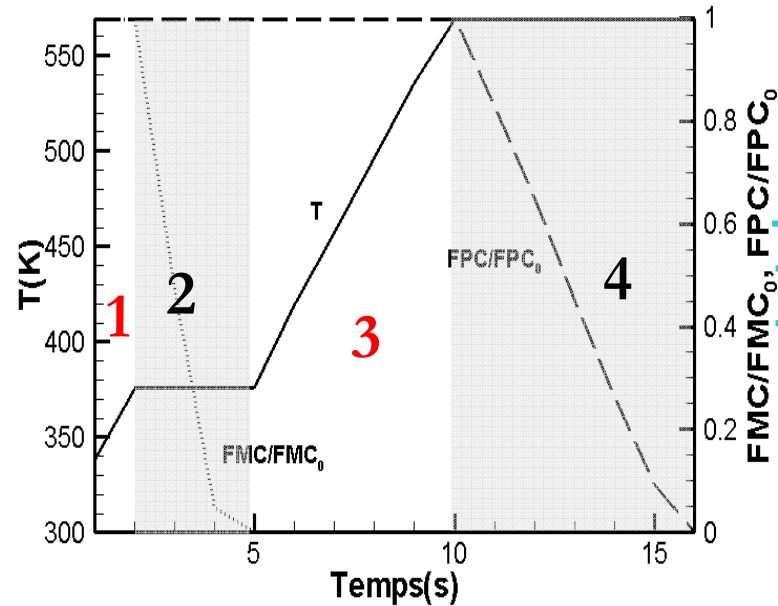
Modèle macroscopique de combustion

- **Instationnaire**
- **3D**
- **Bilan d'énergie incluant convection et rayonnement**



- **Éléments végétaux thermiquement fins ($d < 0,6\text{cm}$) $\rightarrow t_c \propto d$**
(\neq éléments thermiquement épais: $t_c \propto d^2$)

Modèle macroscopique de combustion



Bilan d'énergie d'un site récepteur exposé à N sites en feu

$$\sum_{i=1}^N [q_{rad,fl}(i) + q_{rad,b}(i) + q_{conv}(i)] - q_{rad,perdes} = \begin{cases} \rho_{hum} c_{p, hum} \alpha \frac{dT}{dt} & \text{si } T < 373K \\ -\rho_{sec} L_{vap} \alpha \frac{dFMC}{dt} & \text{si } T = 373K \\ \rho_{sec} c_{p, sec} \alpha \frac{dT}{dt} & \text{si } T_{vap} < T < T_{pyr} \end{cases}$$

Et $T = T_{pyr}$ durant t_c

Modèle macroscopique de combustion

- **Puissance convective des gaz chauds (après traversée du front de flammes)**

Décroissance exponentielle avec la distance (distance caractéristique $\sim 3L_{fl}$)

$$q_{conv} = \frac{h}{\delta} (T_{fl} - T) \exp(-0.3 y/L_{fl})$$

h : coeff. moyen de convection

T_{fl} : température de flamme

δ : profondeur de pénétration du rayt

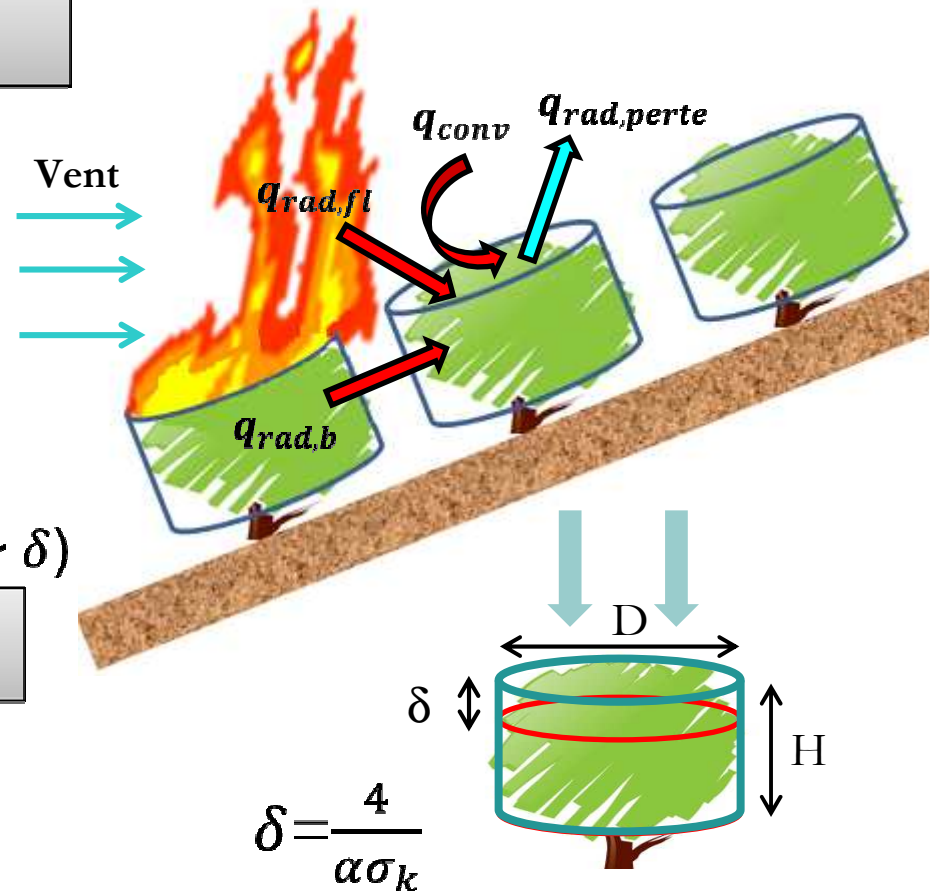
- **Puissance radiative des braises**

Décroissance exponentielle avec la distance (distance caractéristique $\sim \delta$)

$$q_{rad,b} = a_m \sigma T_b^4 \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right)$$

a_m : absorptivité du milieu végétal

T_b : température des braises



Modèle macroscopique de combustion

- Pertes radiatives du site exposé au feu

$$q_{rad,pertes} = \frac{\varepsilon_m \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)}{\delta}$$

ε_m : émissivité du milieu végétal

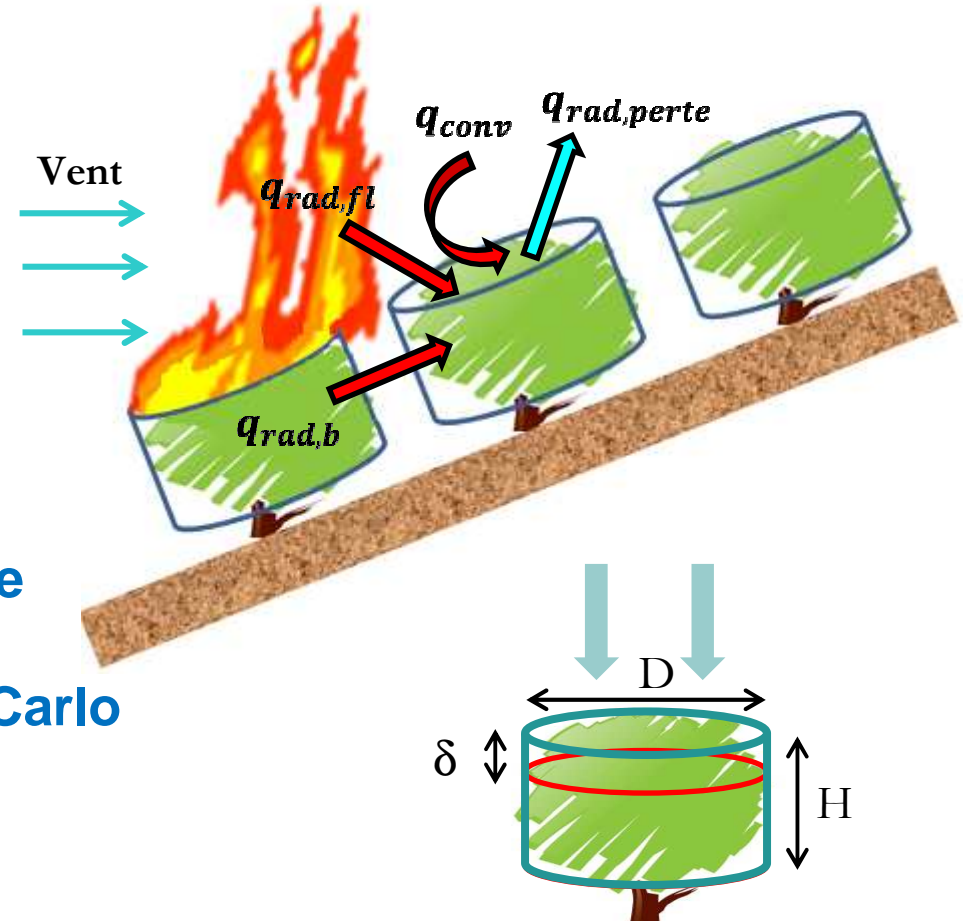
- Puissance rayonnée par la flamme et reçue par le site calculée par la méthode de Monte Carlo

$$q_{rad,fl} = a_m p N'''$$

a_m : absorptivité du milieu végétal

N''' : nombre de quanta émis par la flamme et reçu par le site par unité de volume

p : puissance (W) transportée par chaque quantum



Modèle de rayonnement de flamme

modèle de flamme solide + méthode de Monte Carlo

Modèle de flamme solide

- flamme = corps solide de géométrie simple
- rayonnement émis par la surface

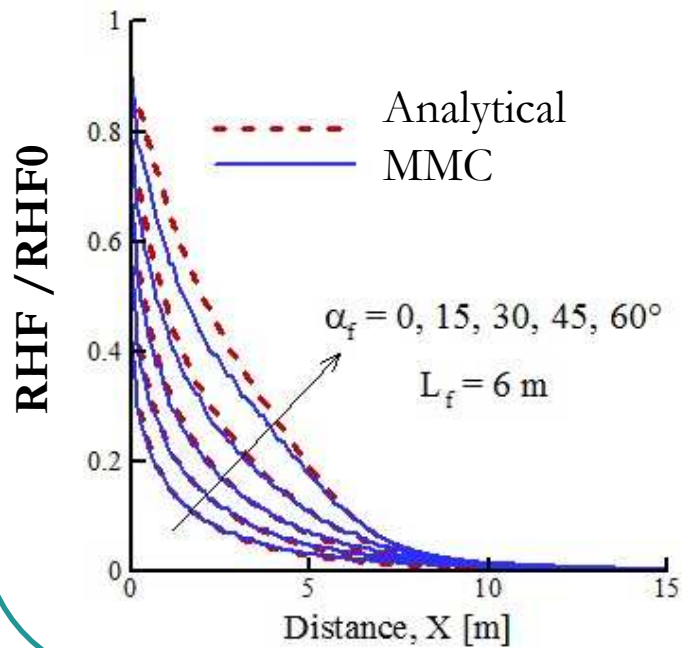
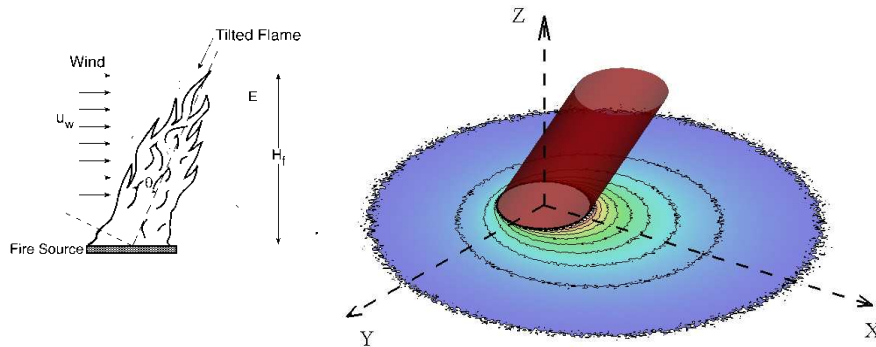
Méthode statistique de Monte-Carlo

- Connaissant le pouvoir émissif de la flamme, on lance pour chaque m^2 de flamme, un gd nombre de quanta de puissance p générés aléatoirement (Loi macroscopique de rayonnement)
- Puissance reçue par la cible : pN'''



Validation modèle de rayonnement

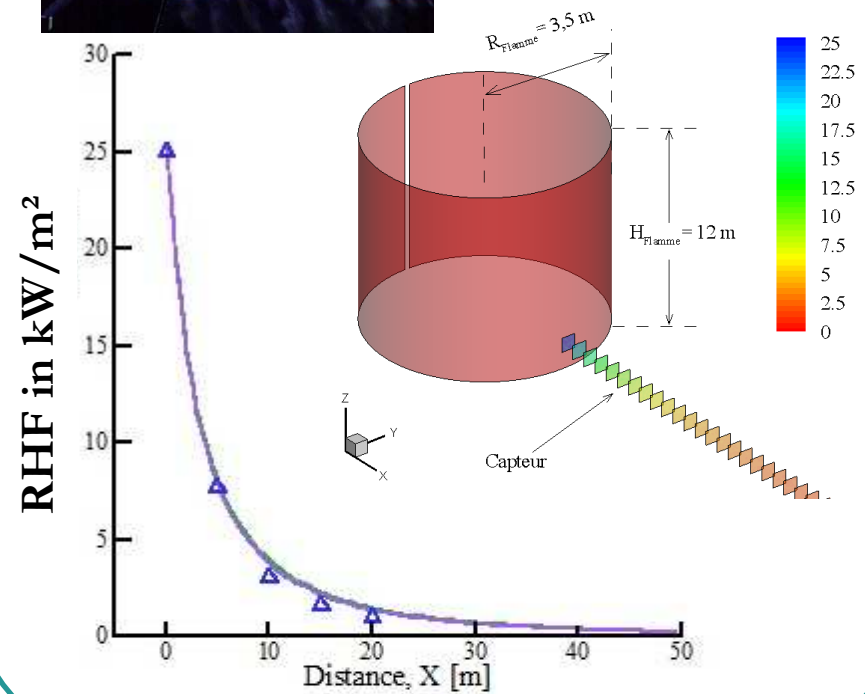
MMC vs. Solutions analytiques approchées



MMC vs. Exp.



flamme d'éthanol
(h=12m, D=7m)



Présentation du modèle de propagation

Pouvoir émissif et géométrie d'une flamme de végétation



Puissance libérée par la combustion avec flamme des éléments végétaux fins secs

$$\dot{Q} = \frac{m_{sec} \Delta h_c}{t_c}$$

Fraction perdue par convection

Fraction rayonnée χ_r

$$\varepsilon_{fl} = 1 - e^{-0.4D} \text{ (Boulet et al.)}$$

Pouvoir émissif de la flamme: $P''_{fl} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{S_{fl}}$

$$T_{fl} = \left(\frac{P''_{fl}}{\sigma \varepsilon_{fl}} \right)^{1/4}$$

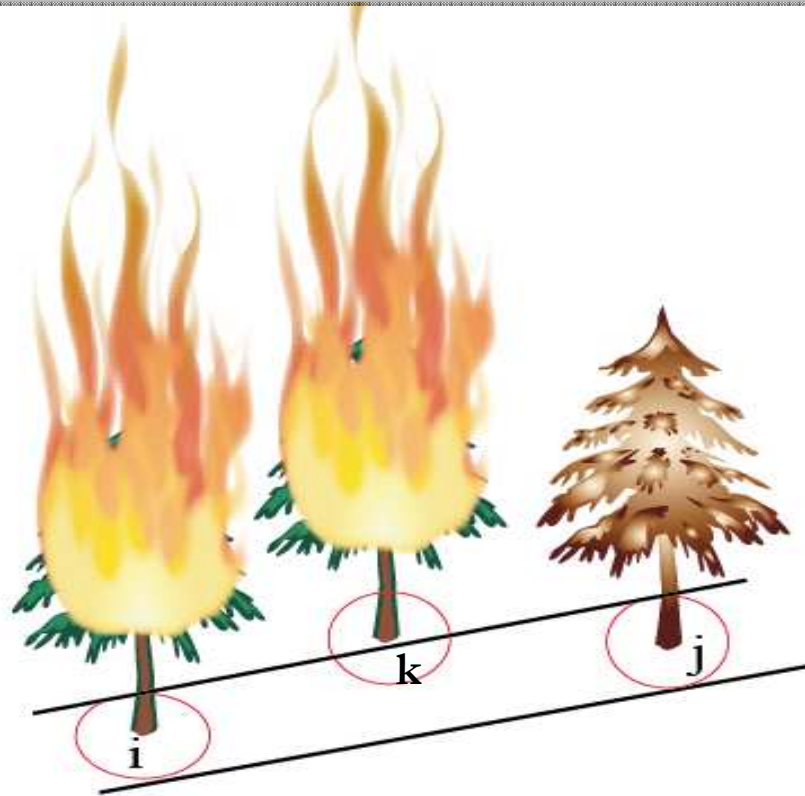
Propriétés géométriques de la flamme

- | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|
| •Hauteur de flamme sans vent | $H_{fl0} = fct(\dot{Q}, D)$ | (Heskestad) |
| •Hauteur de flamme avec vent | $H_{fl} = fct(H_{fl0}, U)$ | (Putnam) |
| •Angle d'inclinaison dû au vent | $\tan \alpha = fct(H_{fl}, U)$ | (Albini) |

Effet d'écran

En présence d'un site k en feu intercalé entre le site en feu i et le site intact j

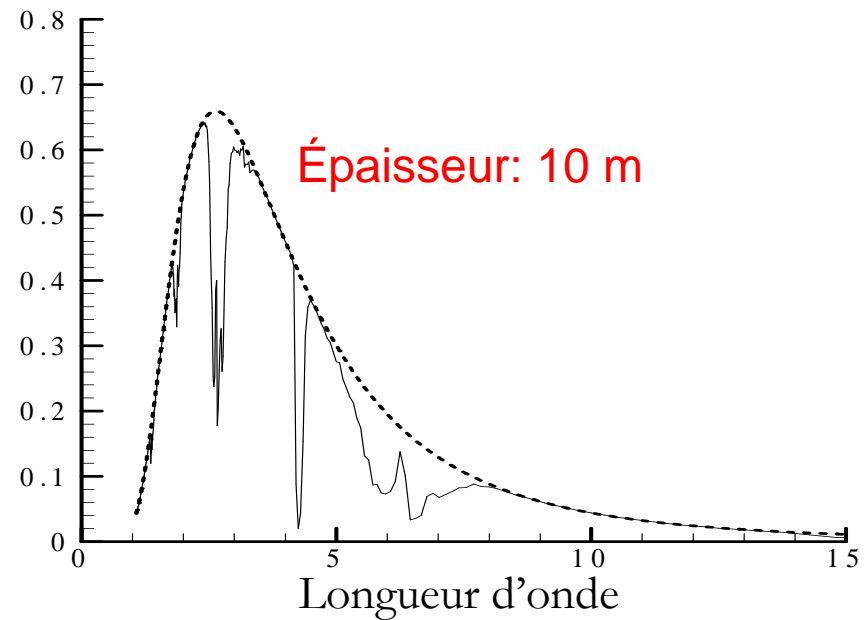
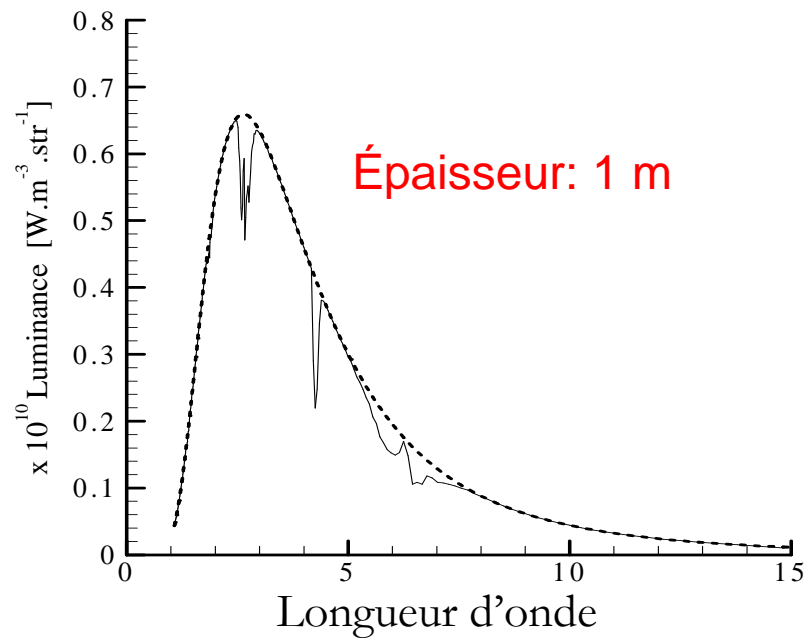
→ j ne reçoit qu'une partie du rayonnement émis par i



MMC : Un quantum émis par le site i et arrivant dans la zone de flamme solide du site k est perdu et ne contribue pas à préchauffer le site j

Atténuation du rayonnement par la couche d'air atmosphérique traversée entre un site en feu et un site récepteur (coll. IUSTI/LEMETA)

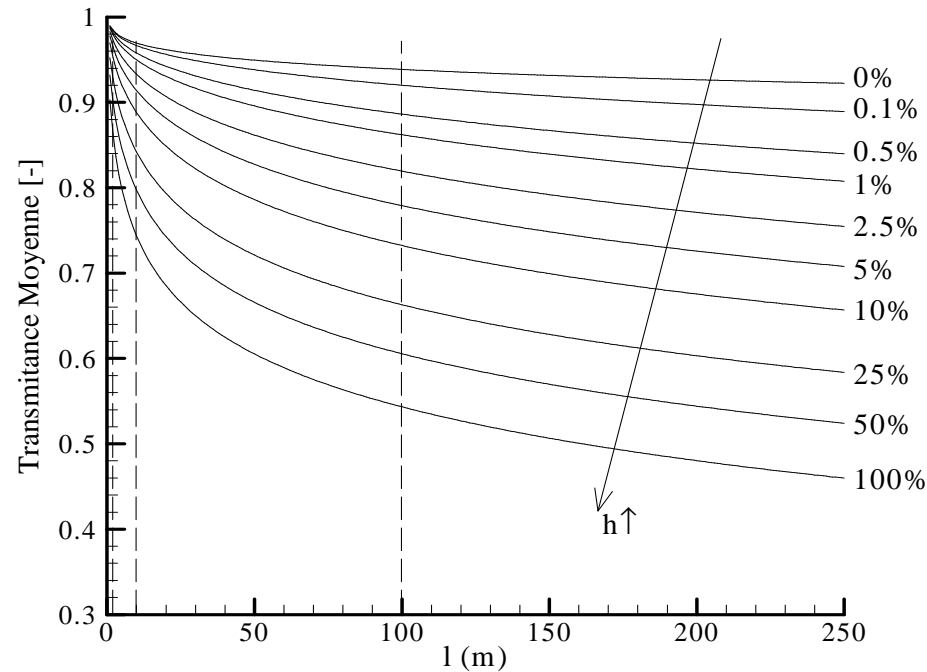
Atténuation du spectre d'un CN (1100K) par une couche d'air à 300K et HR=30%



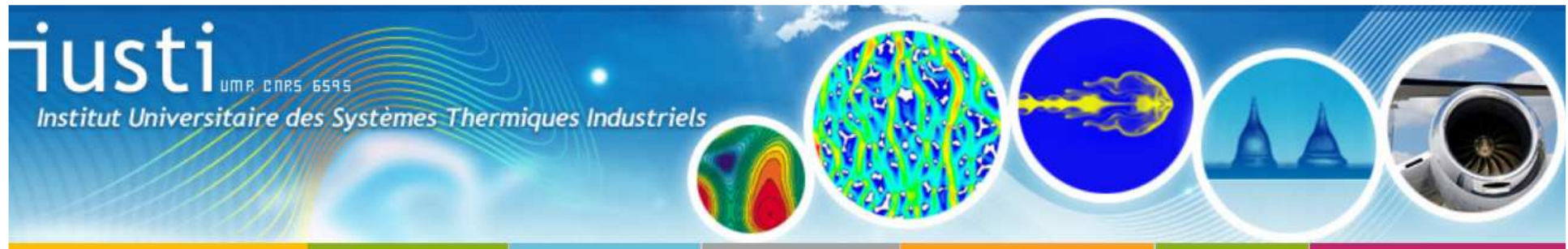
Atténuation du rayonnement par la couche d'air

Modèle SNB (milieu homogène isotherme, décorrélation des spectres d'émission/absorption des gaz)

→ Transmittance moyenne en fct des transmittances des gaz (CO_2, O_2, CO, N_2, H_2O) composant l'air et ce, pour différentes HR



Epaisseur de la couche d'air traversée(m)



Sommaire

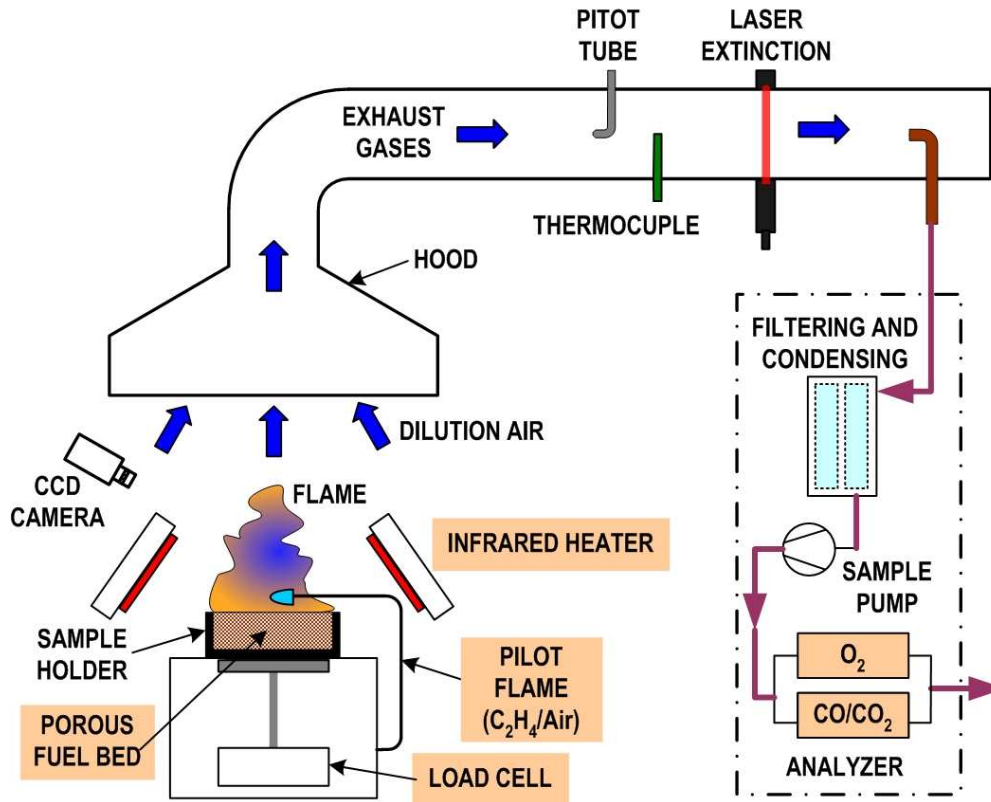
- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ **Paramètres du modèle**
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Paramètres du modèle

Données topographiques (MNT 50m) + carte d'occupation du sol (50m)

		Paramètres du modèle	Feu de Favone, Corse (Santoni et al., 2011)
Données météo (Météo-France, mesures <i>in-situ</i>)	}	Force du vent (m/s)	6
		Direction du vent	OUEST
		Humidité relative de l'air: RH (%)	42
Mesures <i>in-situ</i> (SPE)	}	Diamètre d'un site végétal: D (m)	3
		Hauteur de strate: H (m)	3
		Charge en éléments secs fins au sol (kg/m ²)	2.7
		Teneur en eau initiale du végétal fin: FMC ₀	0.69
Mesures directes en Labo (SPE, LEMTA, PPRIME, IUSTI)	}	Chaleur spécifique des éléments fins secs: $c_{p_{sec}}$ (J/kg/K)	1900
		Mass volumique des éléments fins secs: ρ_{sec} (kg/m ³)	720
		Rapport surface/volume des éléments fins: σ_k (m ⁻¹)	5544
		Temps de résidence de flamme: t_c (s)	30
		Chaleur de combustion des éléments fins: Δh_c (J/kg)	16×10 ⁶
Mesures indirectes en Labo (LEMTA/IUSTI)	}	Absorptivité du milieu végétal: a_m	0.9
		Emissivité du milieu végétal: ε_m	0.9
		Fraction rayonnée par la flamme: χ_R	0.3

Exemple de mesures directes en labo: les propriétés d'inflammation et de combustion des éléments végétaux fins (SPE,PPRIME,IUSTI)



Expériences sous cône calorimètre:

- Temps de résidence de flamme
- Délai d'inflammation
- Perte de masse

En fonction du flux incident, de la teneur en eau et de la charge

Exemple de mesures directes en labo: rapport surface/volume et la masse volumique des éléments fins, ici des aiguilles de pin (SPE)



Mesures directes → s et v

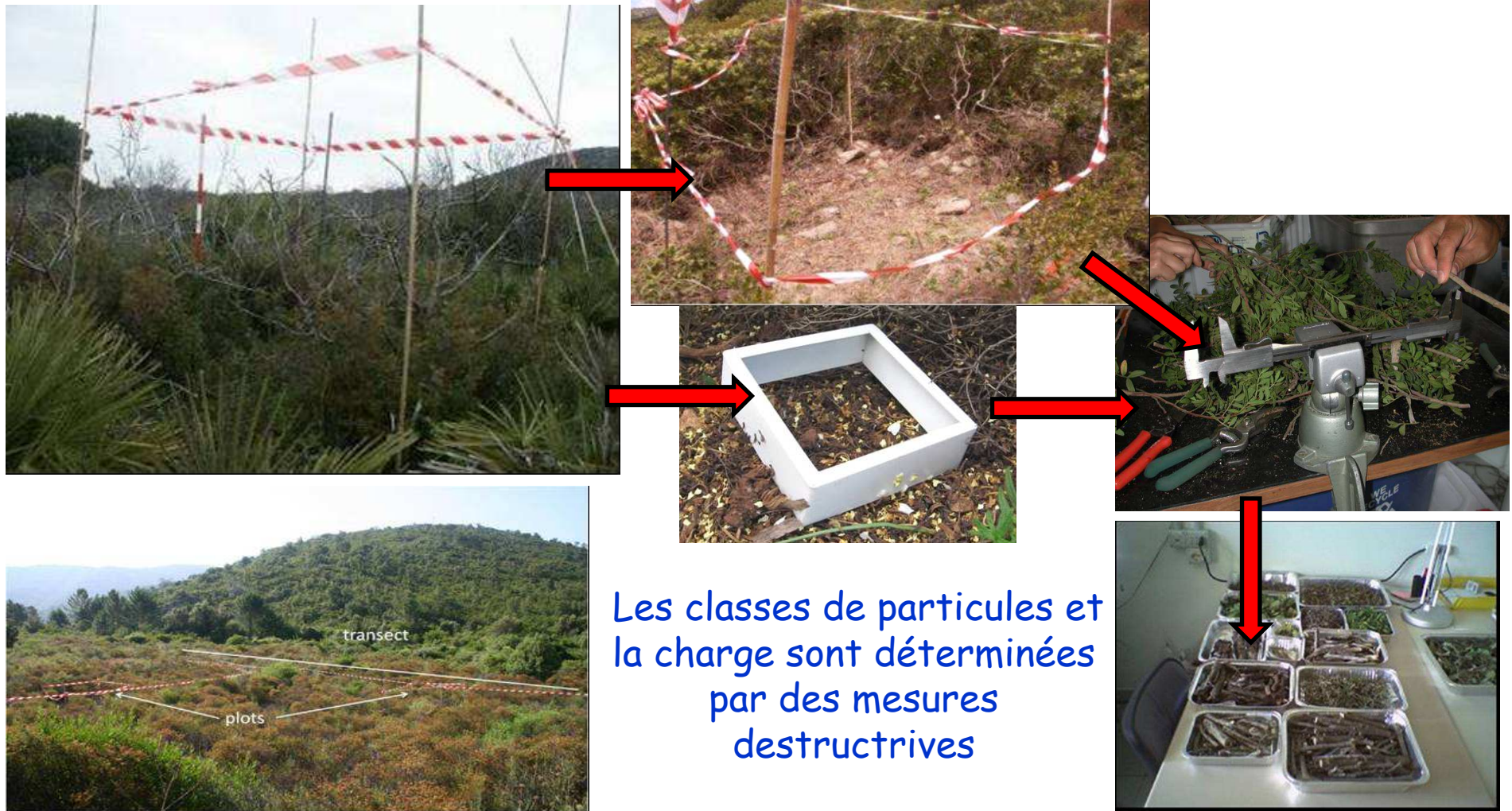


On vérifie la cohérence de la mesure en déterminant également le volume à l'aide d'un pycnomètre

On en profite alors pour déterminer la masse volumique $\rho_k = m_k / v_k$

Paramètres du modèle

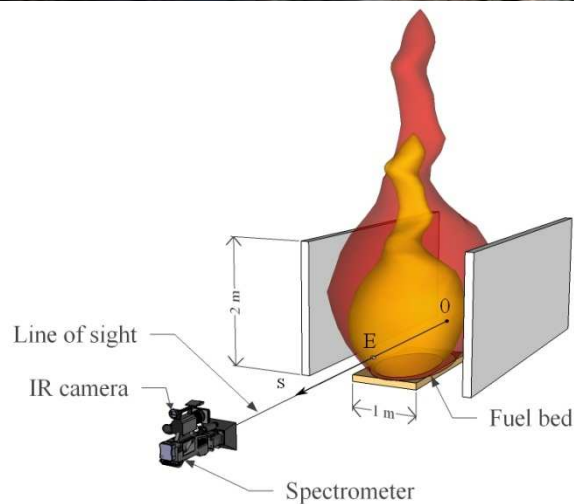
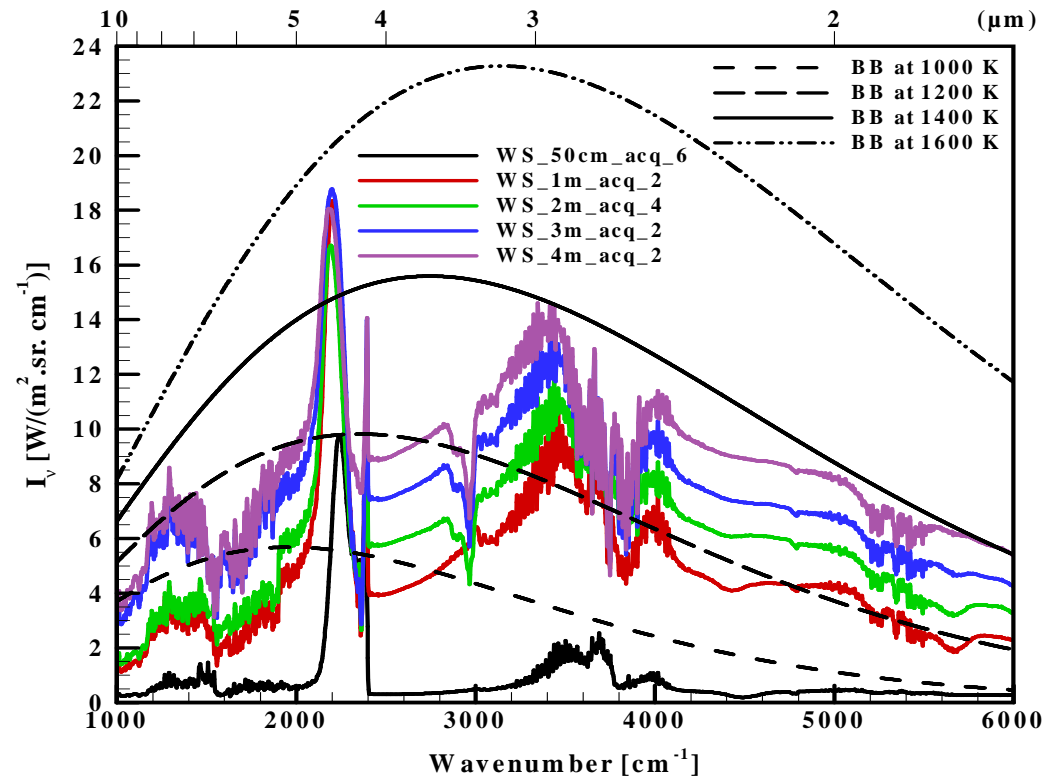
Exemple de mesures in-situ: classification des végétaux et de leur charge respectives (SPE, Corte)



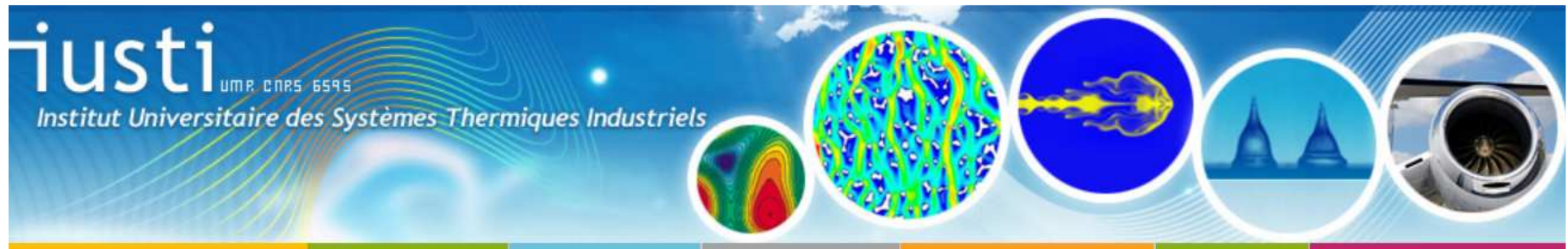
Exemple de mesures indirectes en labo: fraction rayonnée par la flamme (LEMETA/IUSTI/CEREN, Sécurité Civile)



Spectres d'émission



- ➔ fraction rayonnée
- ➔ propriétés de flamme (Température et composition gaz/suies) par méthode inverse (AG) grâce à un modèle couplant SNB à 450 bandes + Curtiss-Godson (Collin et al., Interflam, juin 2013)



Sommaire

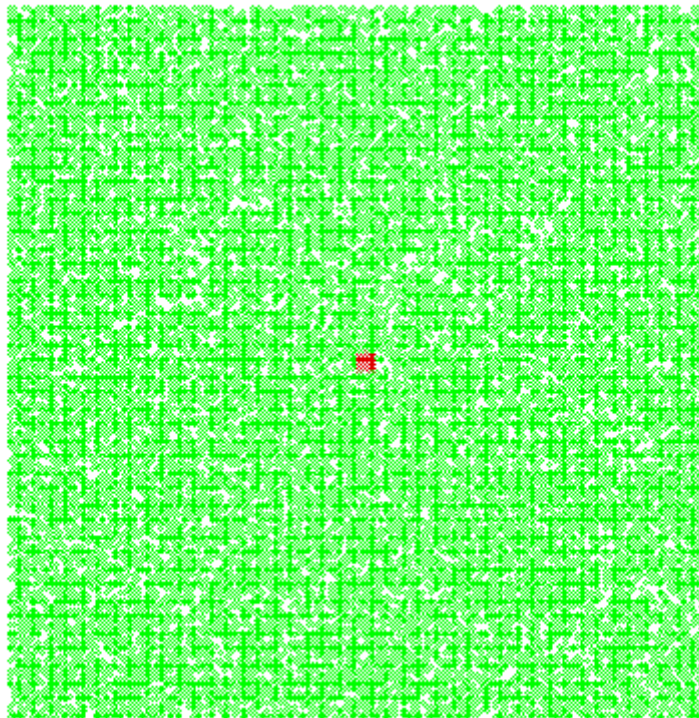
- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ **Quelques cas d'étude**
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Quelques cas d'étude

Le modèle de « petit monde » est particulièrement adapté aux milieux hétérogènes

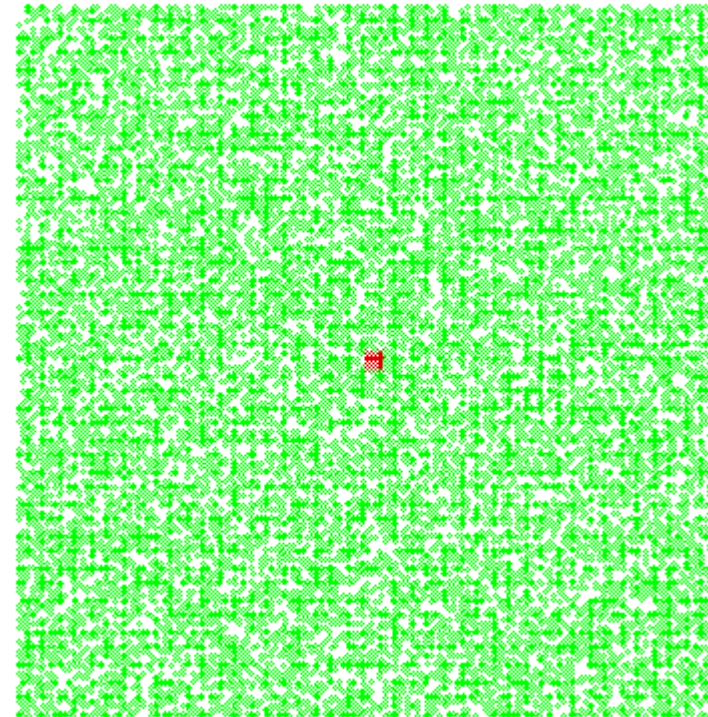
$p=0.6$

(couverture végétale de 60%)



$p=0.4$

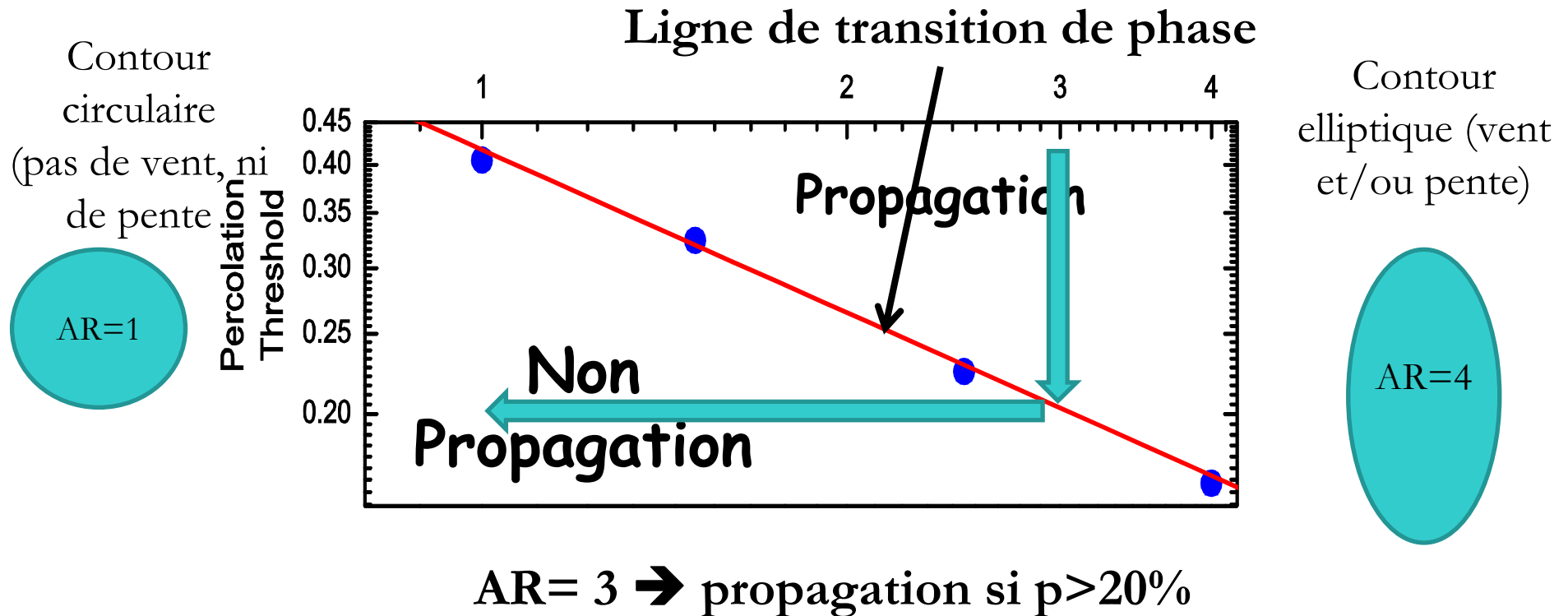
(couverture végétale de 40%)



→ Près du seuil de percolation (ici $p_c \sim 0.36$), les hétérogénéités locales entraînent une augmentation des effets « petit monde »: lacunarités, digitations, formation d'amas (comportement fractal)

Quelques cas d'étude

Seuil de percolation* vs. Rapport d'anisotropie

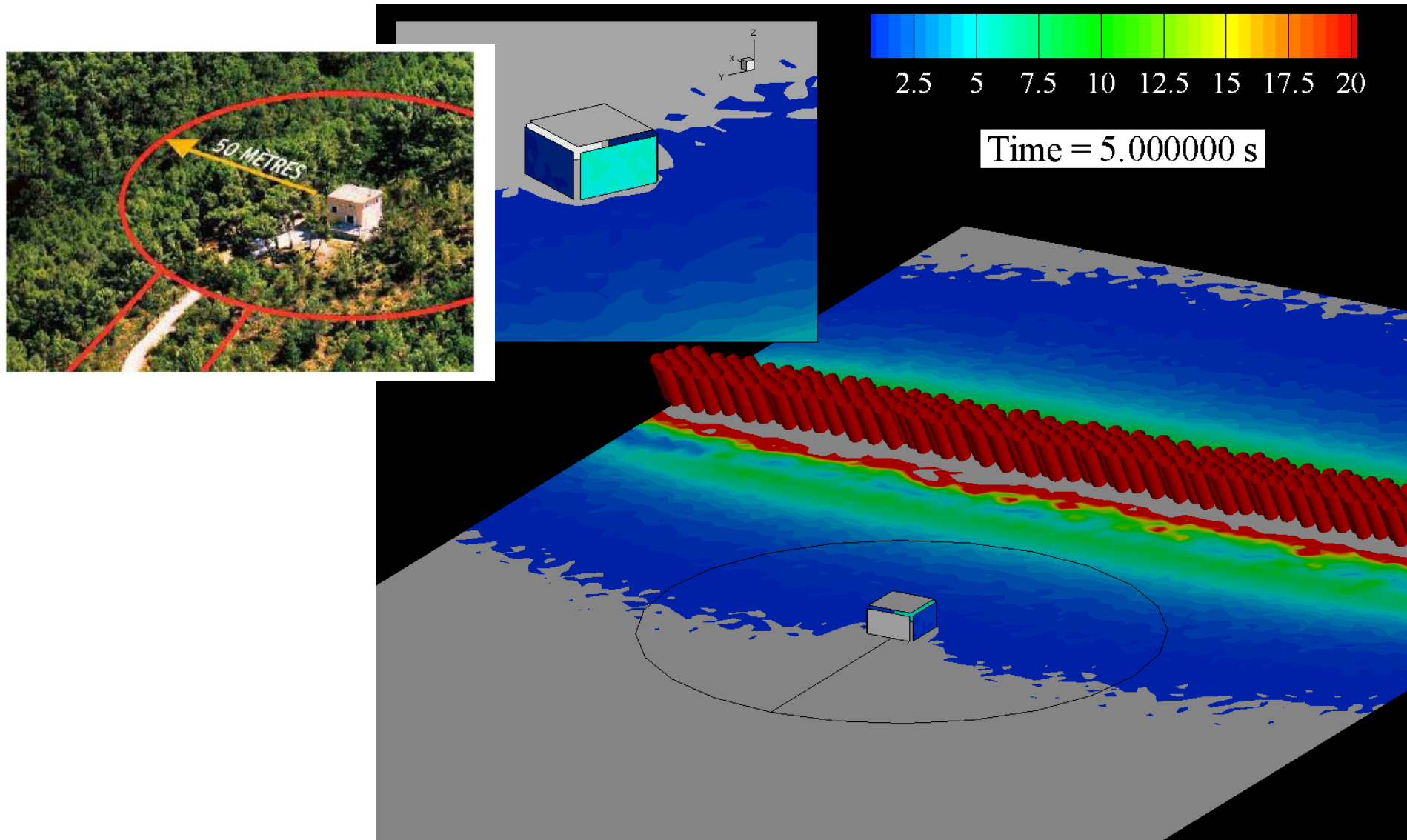


Applications: construire coupe-feux percolatifs efficaces

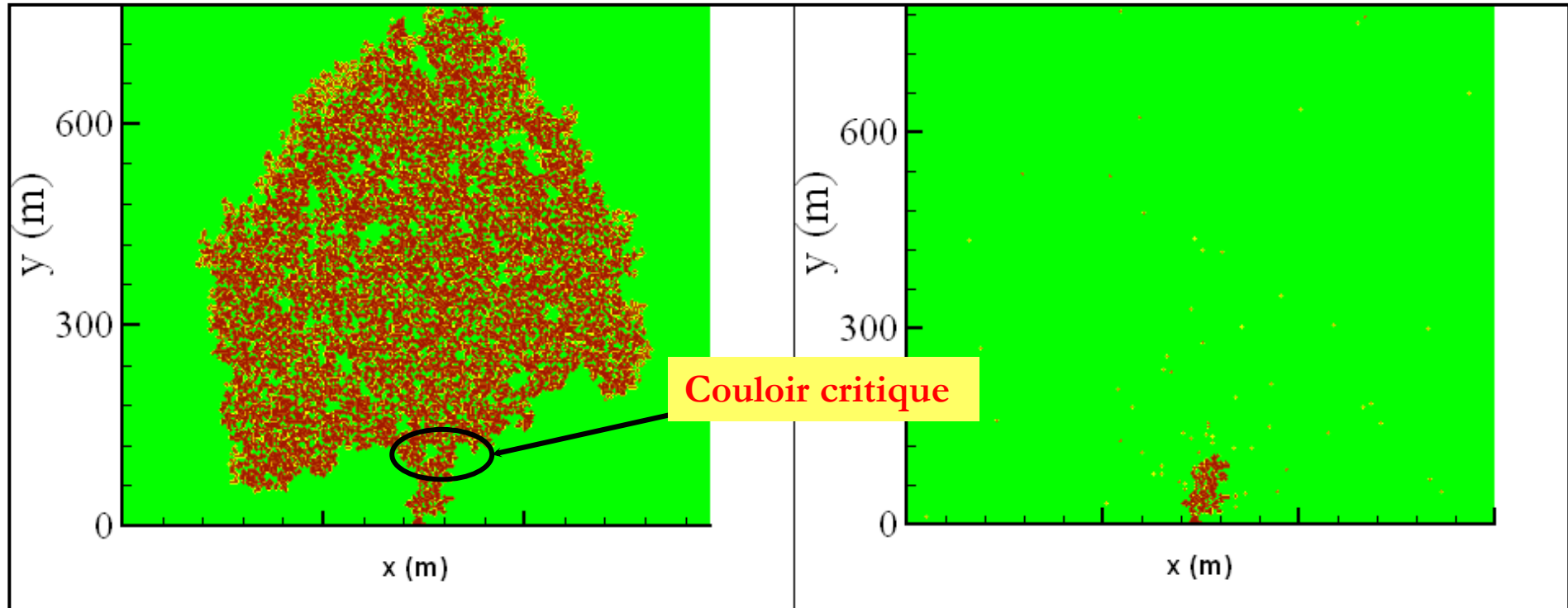
***Seuil de percolation:** taux de couverture végétale au-delà de laquelle le feu peut se propager d'un bord à l'autre du domaine

Quelques cas d'étude

Efficacité du débroussaillage autour des habitations



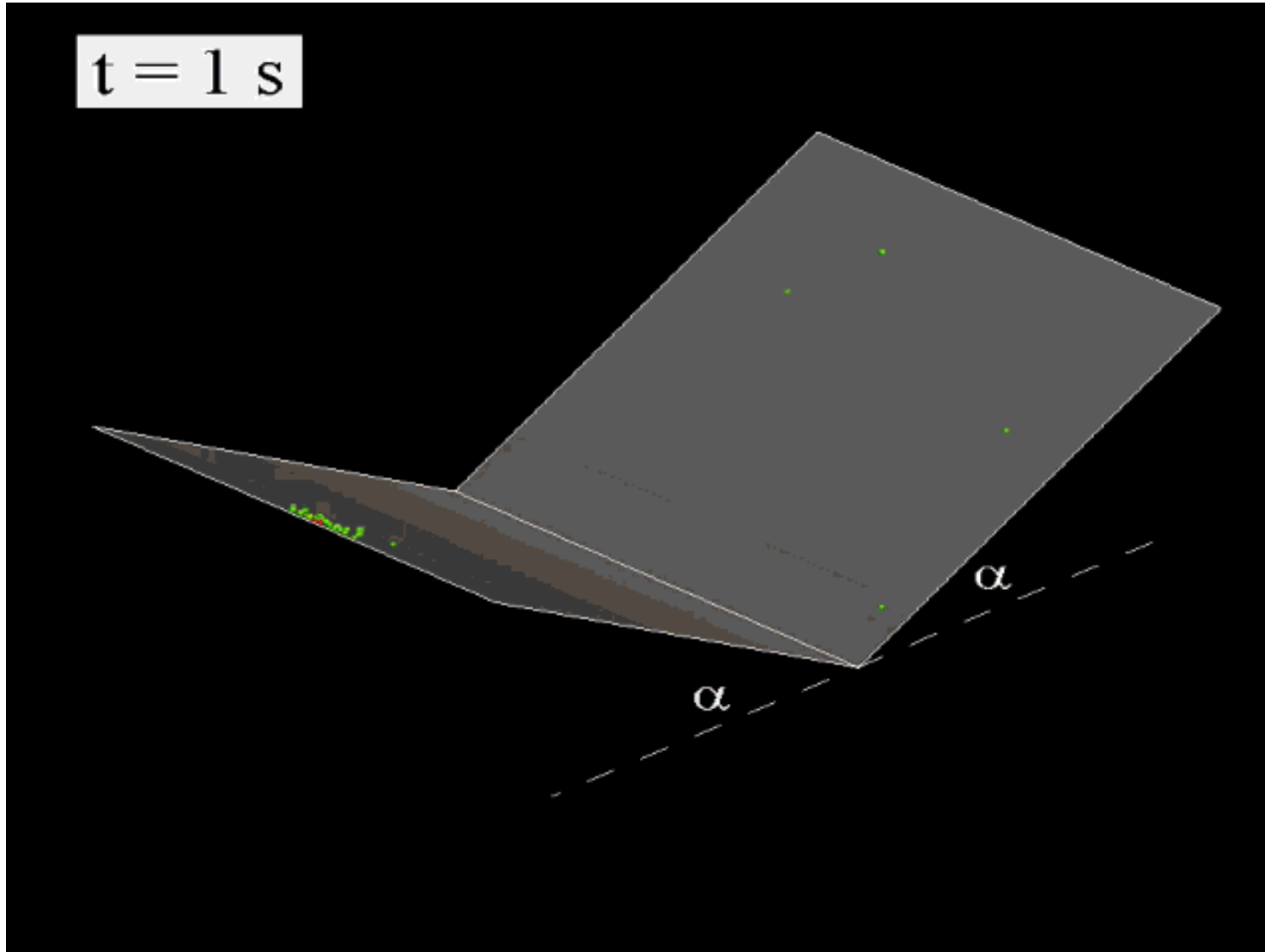
Propriétés de percolation

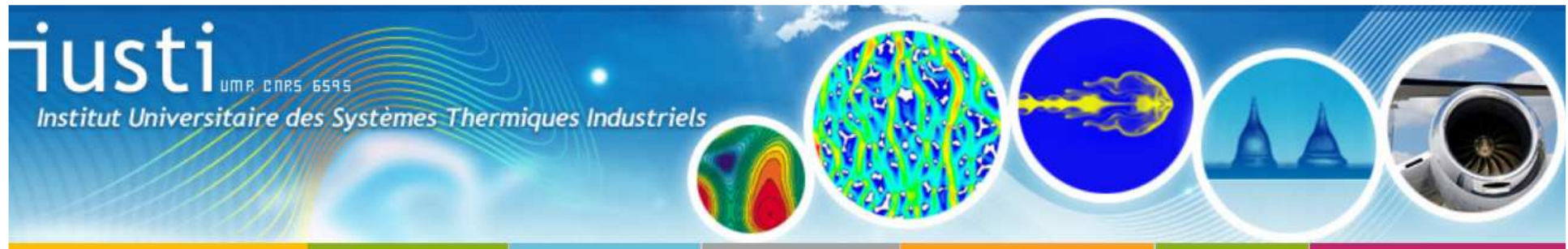


Cas pathologique: seuls qqs sites (nœuds) dominant le réseau
Existence de super-nœuds (très connectés) (*Barabási et László, 2003*)

Quelques cas d'étude

Comportements atypiques des feux:
EGE, feux éruptifs, effets canyons, etc.





Sommaire

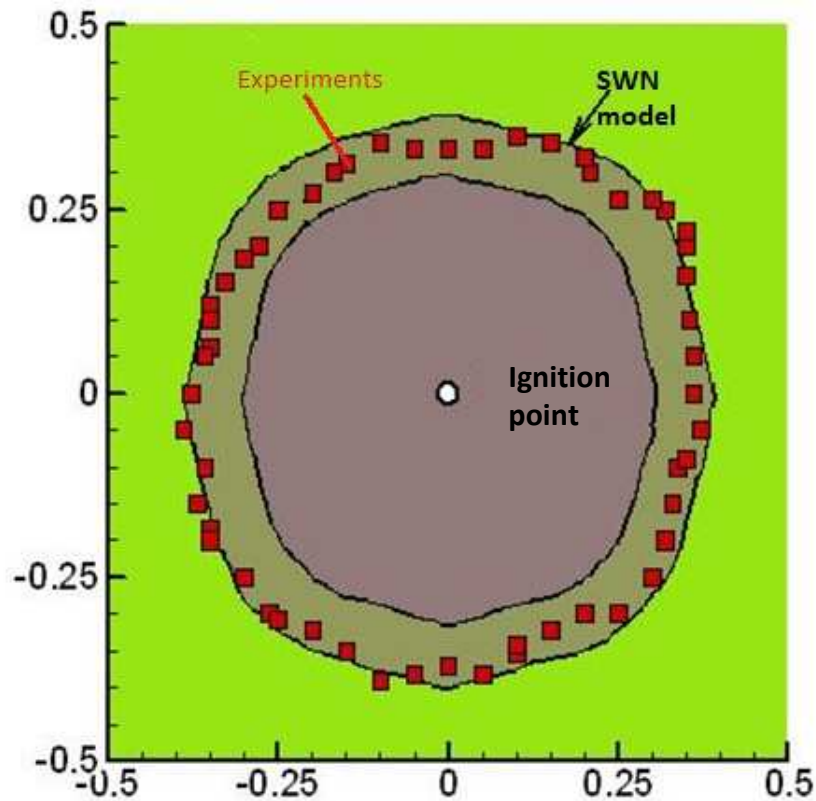
- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ **Validation du modèle de propagation**
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Validation du modèle de propagation

A l'échelle du laboratoire sur des bancs de combustion

Effet de vent et de pente (exp. du SPE, Corte)

0°, vent nul

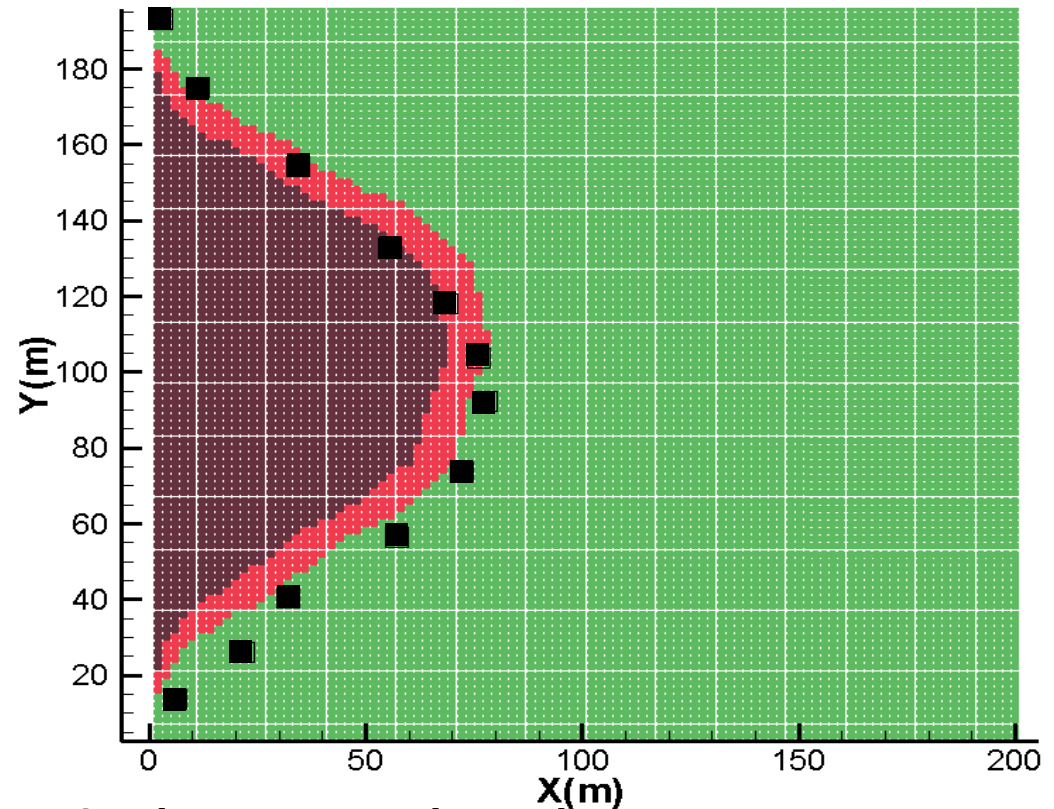


Validation du modèle de propagation

Validation sur un brûlage dirigé (Cheney et al. , 1986)



- Terrain plat 200mX200m
- Végétation homogène d'herbacées
- Teneur en eau: 6%
- Vent constant: 4.8m/s
- HR de l'air: 20%



Contour du feu à t=56s

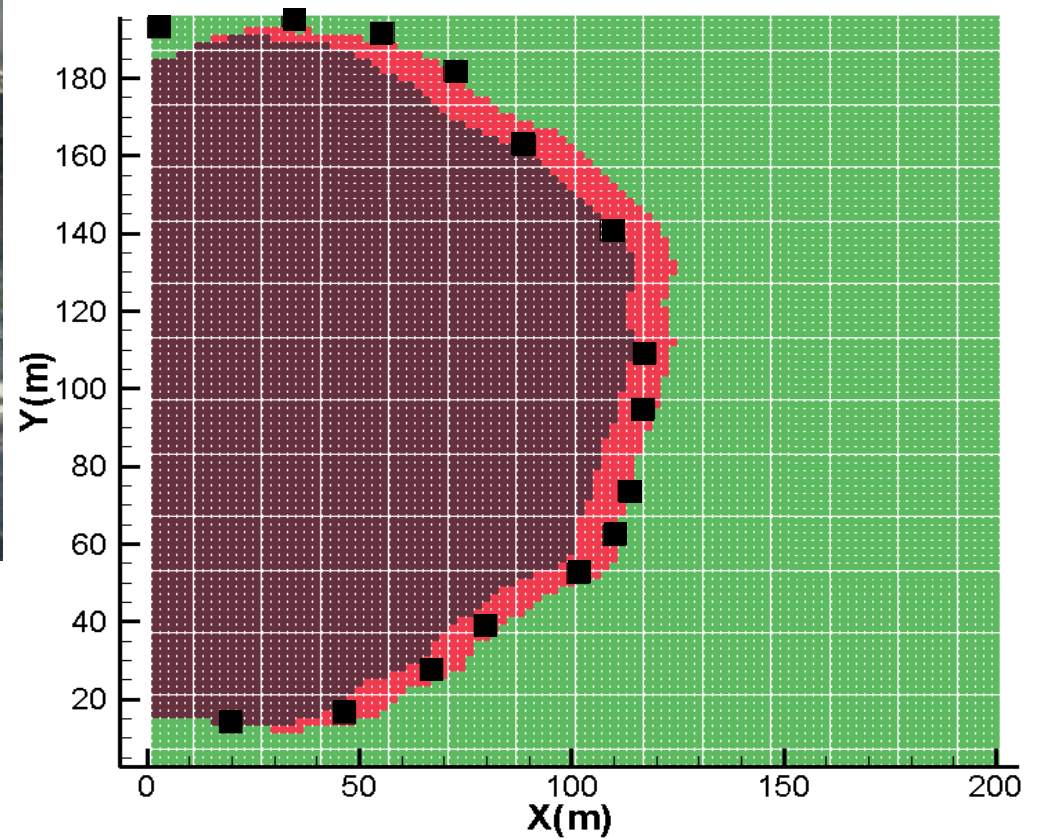
Epaisseur du front: 10m (modèle) vs. 11m (exp.)

Validation du modèle de propagation

Validation sur un brûlage dirigé (Cheney et al. , 1986)



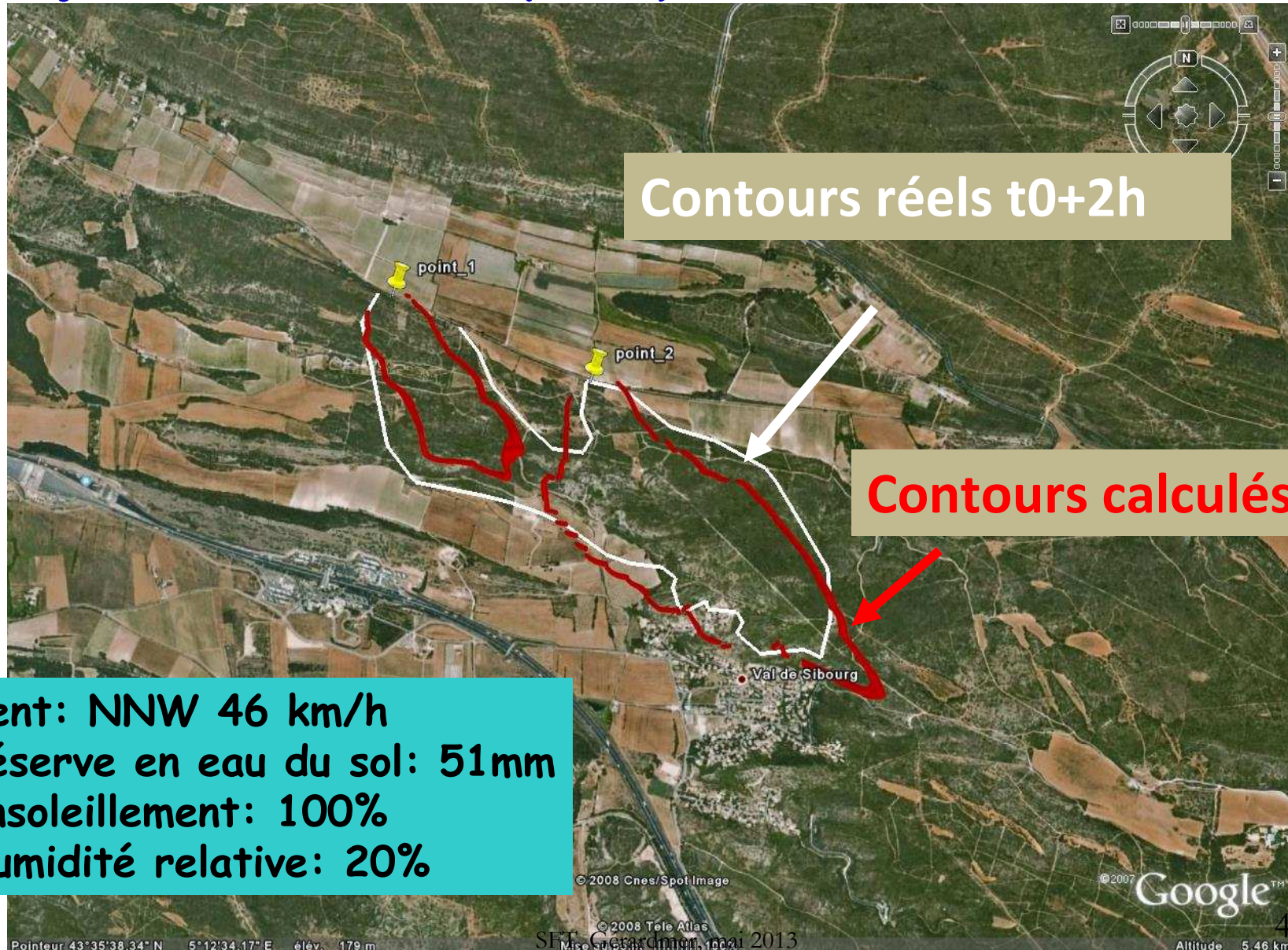
Contour du feu à $t=86s$



Validation du modèle de propagation

Validation grande échelle - Benchmark GdR FEUX du CNRS

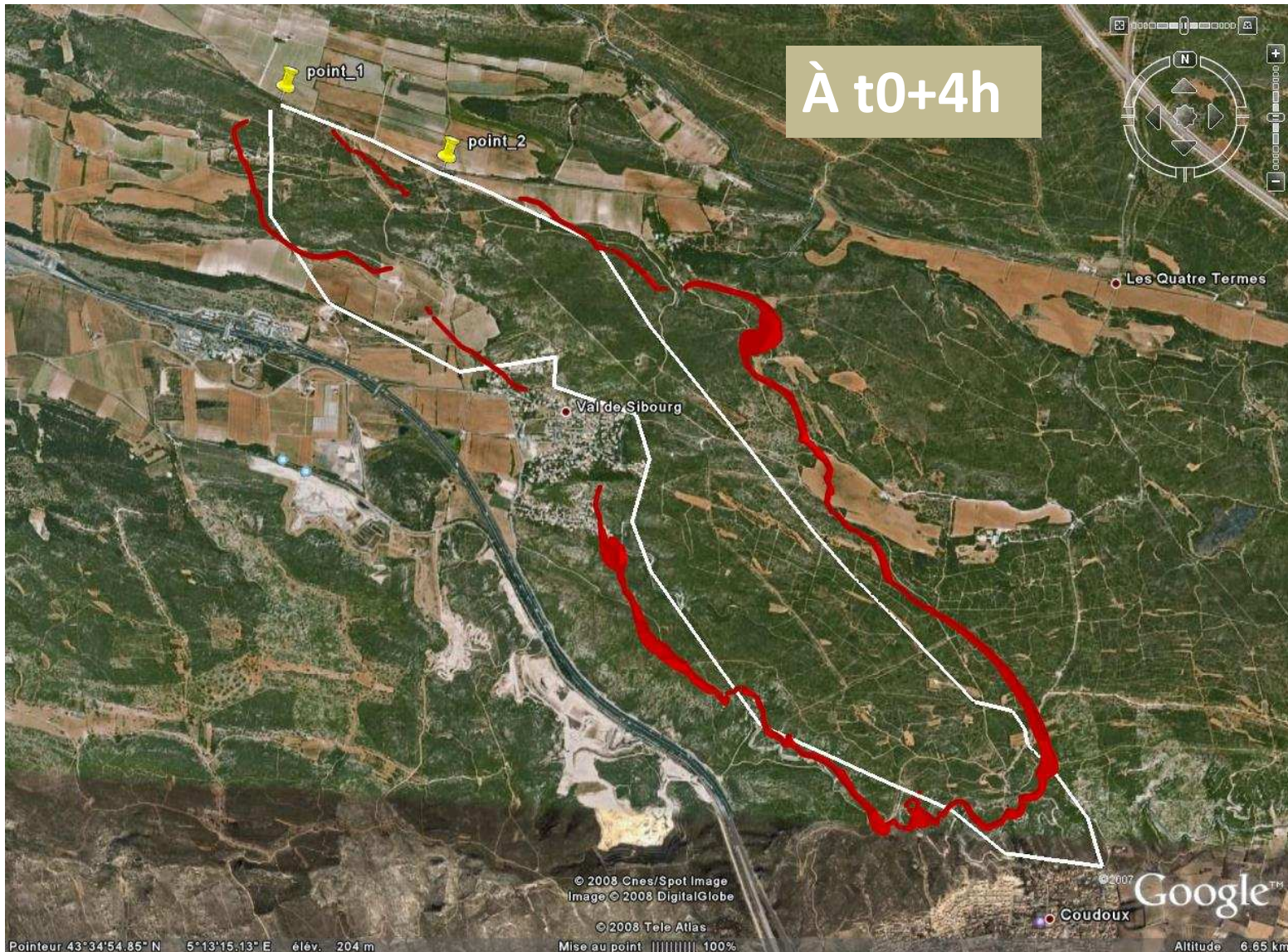
Lançon de Provence 2005 (700ha)



Validation du modèle de propagation

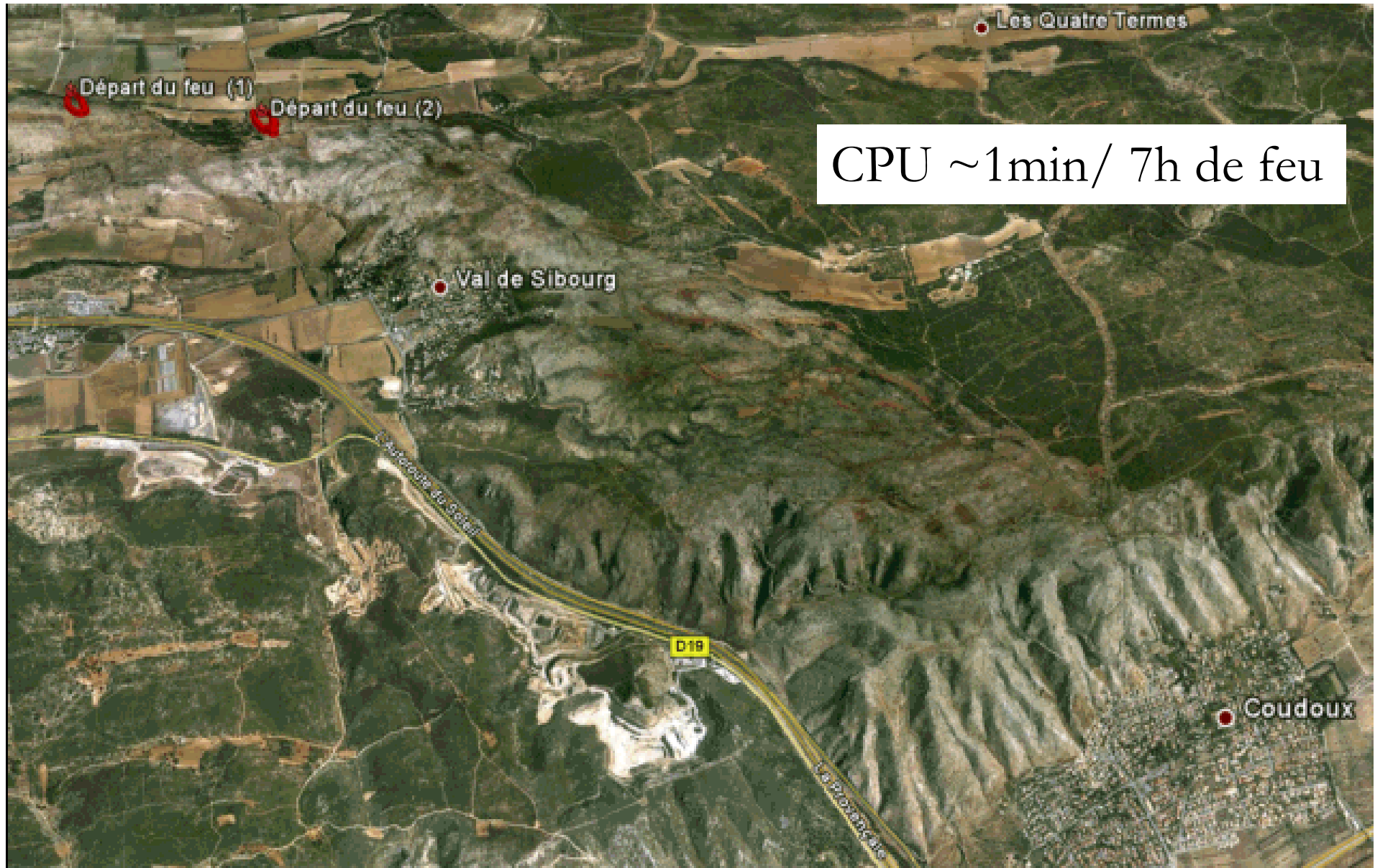
Validation grande échelle - Benchmark GRD FEUX du CNRS

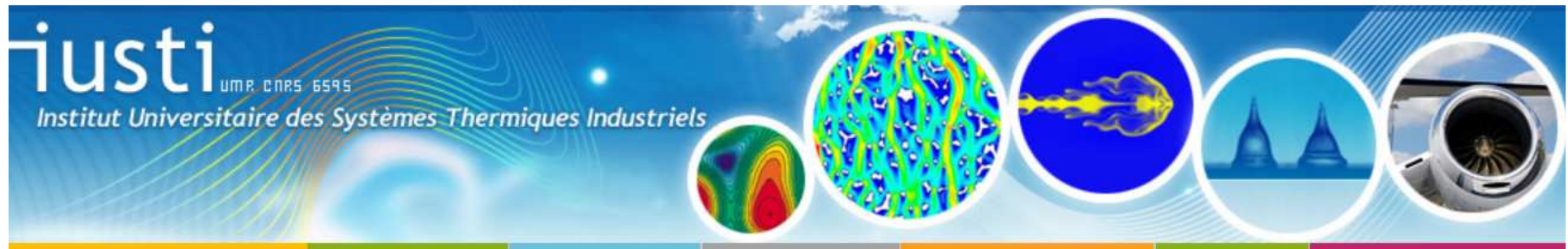
Lançon de Provence 2005 (700ha)



Validation du modèle de propagation

Model validation: Benchmark of CNRS (2010)





Sommaire

- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ **Etude de sensibilité**
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ Conclusions et perspectives

Etude de sensibilité

Données topographiques (MNT à 50m) + Données d'occupation du sol (COS à 50m)

		Paramètres du modèle	Feu de Favone, Corse (Santoni et al., 2011)
Données météo (Météo-France, mesures <i>in-situ</i>)	}	Force du vent (m/s)	6
		Direction du vent	OUEST
		Humidité relative de l'air: RH (%)	42
Mesures <i>in-situ</i> (SPE, INRA)	}	Diamètre d'un site végétal: D (m)	3
		Hauteur de strate: H (m)	3
		Charge en éléments secs fins au sol (kg/m ²)	2.7
		Teneur en eau initiale du végétal fin: FMC ₀	0.69
Mesures directes en Labo (SPE, LEMTA, IUSTI, PPRIME)	}	Chaleur spécifique des éléments fins secs: $c_{p_{sec}}$ (J/kg/K)	1900
		Mass volumique des éléments fins secs: ρ_{sec} (kg/m ³)	720
		Rapport surface/volume des éléments fins: σ_k (m ⁻¹)	5544
		Temps de résidence de flamme: t_c (s)	30
		Chaleur de combustion des éléments fins: Δh_c (J/kg)	16×10 ⁶
Mesures indirectes en Labo (LEMTA/IUSTI)	}	Absorptivité du milieu végétal: a_m	0.9
		Emissivité du milieu végétal: ϵ_m	0.9
		Fraction rayonnée par la flamme: χ_R	0.3

Certains paramètres sont difficiles à mesurer et/ou présentent une grande variabilité → analyse de sensibilité

Etude de sensibilité

Etude de sensibilité:

- ❑ permet d'analyser le modèle mathématique, en étudiant l'impact de la variabilité des paramètres du modèle sur la variable de sortie
- ❑ Identifier et hiérarchiser les paramètres influents du modèle
- ❑ Polynômes du chaos, Sobol, Plans d'exp., etc. (Collin et al., GdR2011, CFM2010)

Conditions du brûlage dirigé (Cheney et al. , 1986)

Plan factoriel complet:
6 facteurs
2 niveaux

Facteur	Niveau de référence	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Charge sèche du végétal (kg/m ²)	3	2.5	3.5
Temps de résidence de flamme (s)	30	27	33
Teneur en eau initiale du végétal	20%	16%	24%
Température d'inflammation (K)	550	540	560
Fraction rayonnée	30%	25%	35%
Vitesse du vent (m/s)	5	4	6



2⁶=64 simulations

Etude de sensibilité

Matrice d'expérience

Réponse

Simulation	M''_{DFP}	t_c	χ_r	FMC_0	T_{ign}	$\ \vec{Vent}\ $	$ROS(m.s^{-1})$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
1	-1	1	-1	1	-1	-1	0.697
2	1	1	1	-1	-1	1	2.222
3	1	1	1	-1	1	-1	1.276
4	-1	1	1	1	1	-1	0.714
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1.017
.
.

$$ros = \beta_0 + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \beta_i X_i}_{\substack{\text{effets} \\ \text{principaux} \\ \text{d'ordre 1}}} + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \beta_{ij} X_i X_j}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 2}}} + \underbrace{O(3)}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 3}}} + \dots + \underbrace{O(6)}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 6}}}$$

Vitesse de propagation obtenue par la simulation en utilisant les valeurs de référence pour tous les facteurs.

Diagramme de Pareto

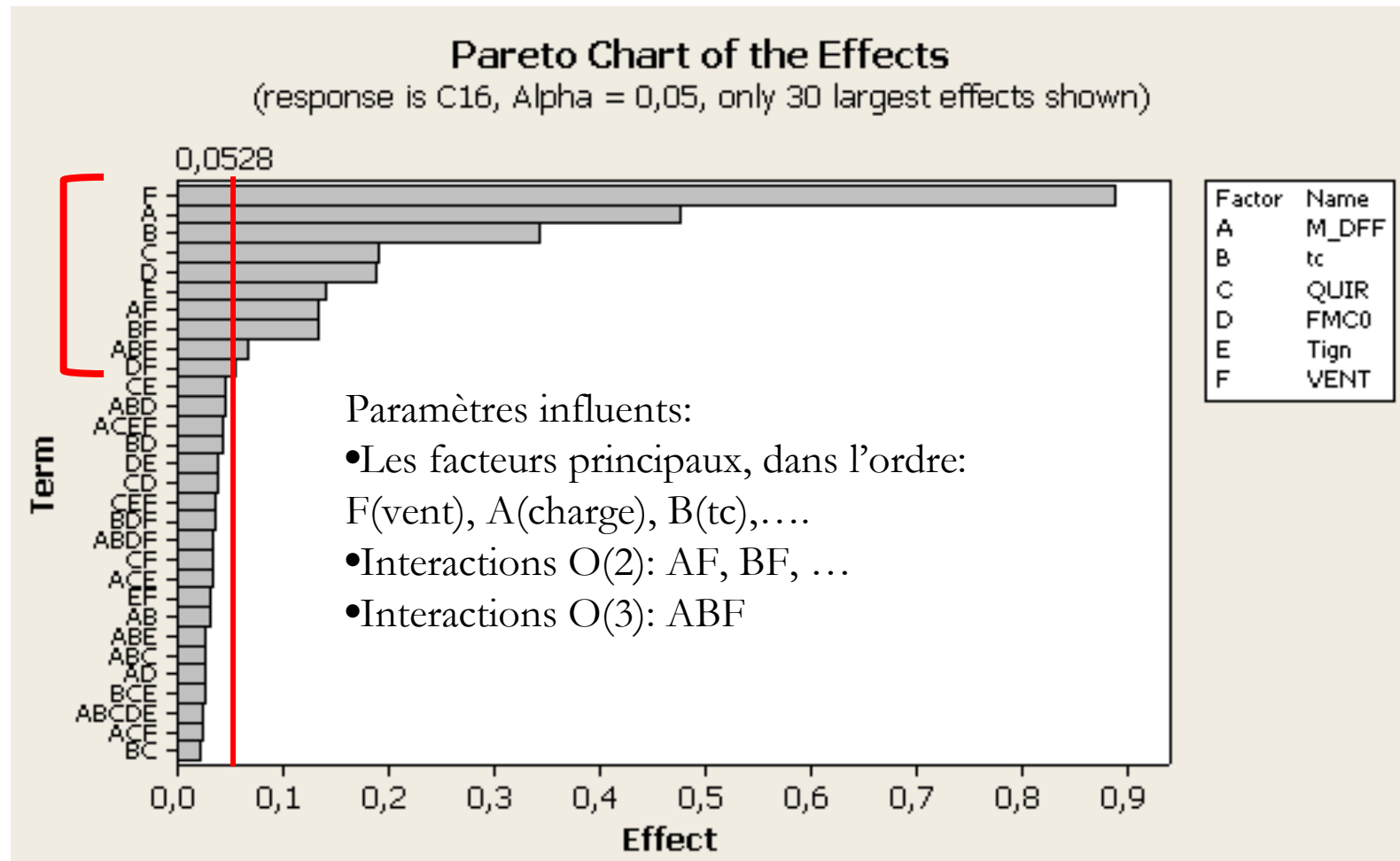
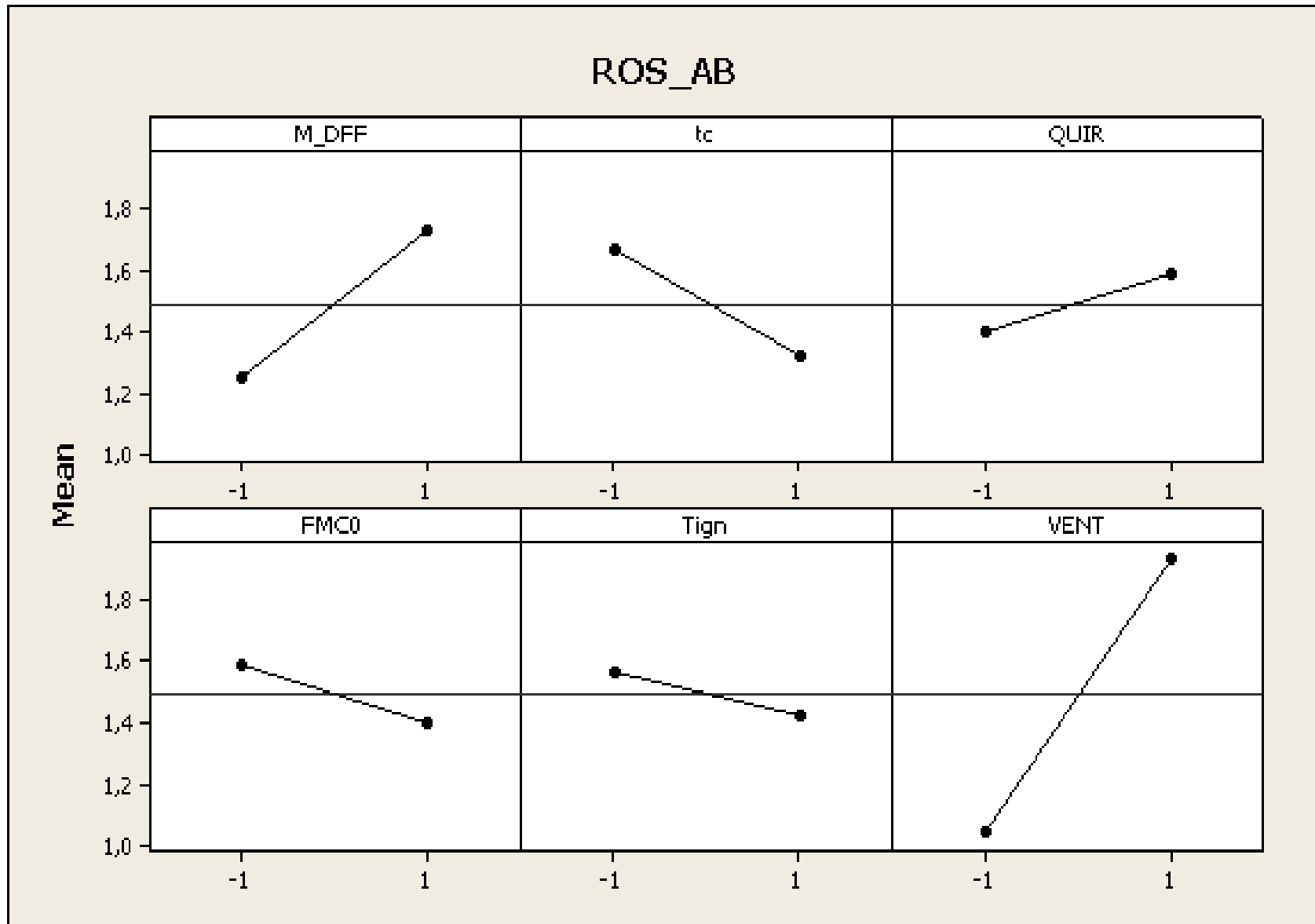


Diagramme des effets principaux



Etude de sensibilité

Etude de sensibilité → établir des corrélations entre la vitesse de propagation et les différents facteurs

$$ros = \beta_0 + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \beta_i X_i}_{\substack{\text{effets} \\ \text{principaux} \\ \text{d'ordre 1}}} + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \beta_{ij} X_i X_j}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 2}}} + \underbrace{O(3)}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 3}}} + \dots + \underbrace{O(6)}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 6}}}$$

Approximation du premier ordre

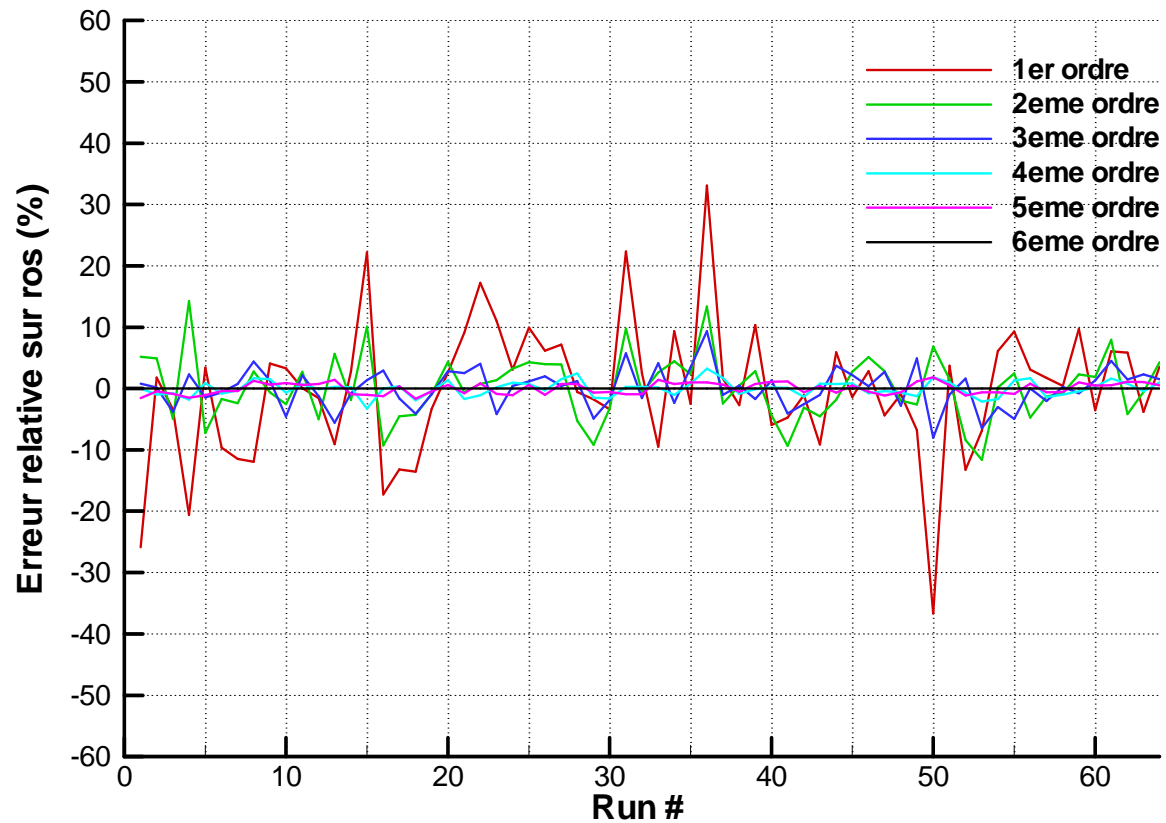
$$\overline{ros}_1 = 1.49 + 0.48(m_{DWF}'' - 3) - 0.06(t_c - 30) + 1.91(\chi_r - 0.3) - 2,35(FMC_0 - 0.2) - 0.01(T_{ign} - 550) + 0.44(U - 5)$$

Approximation du second ordre

$$\overline{ros}_2 = \overline{ros}_1 - 0.01(m_{DWF}'' - 3)(t_c - 30) + 0.15(m_{DWF}'' - 3)(\chi_r - 0.3) + \dots$$

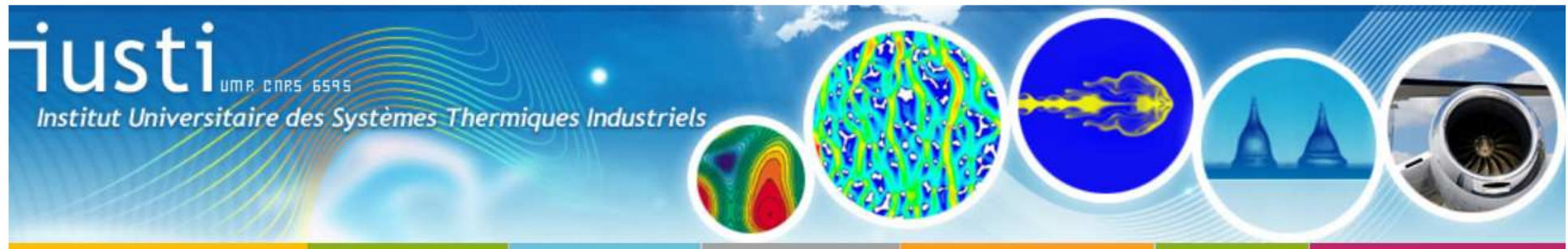
Etude de sensibilité

Erreur relative entre le ros à différents ordres et la vitesse de propagation calculée par le modèle.



Ordre 1: erreur moyenne < 20%

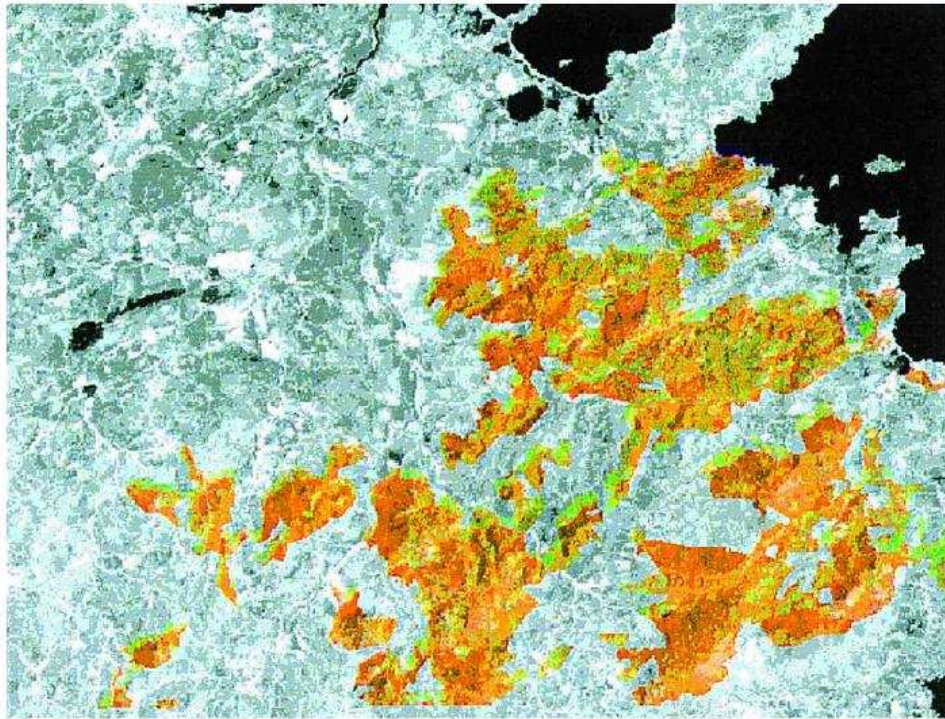
Ordre 2: erreur moyenne < 10% (appli. opérationnelles)



Sommaire

- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ **Fractalité des grands feux**
- ❖ Conclusions et perspectives

Fractalité des grands feux



*Dimensions fractales
(box counting)*

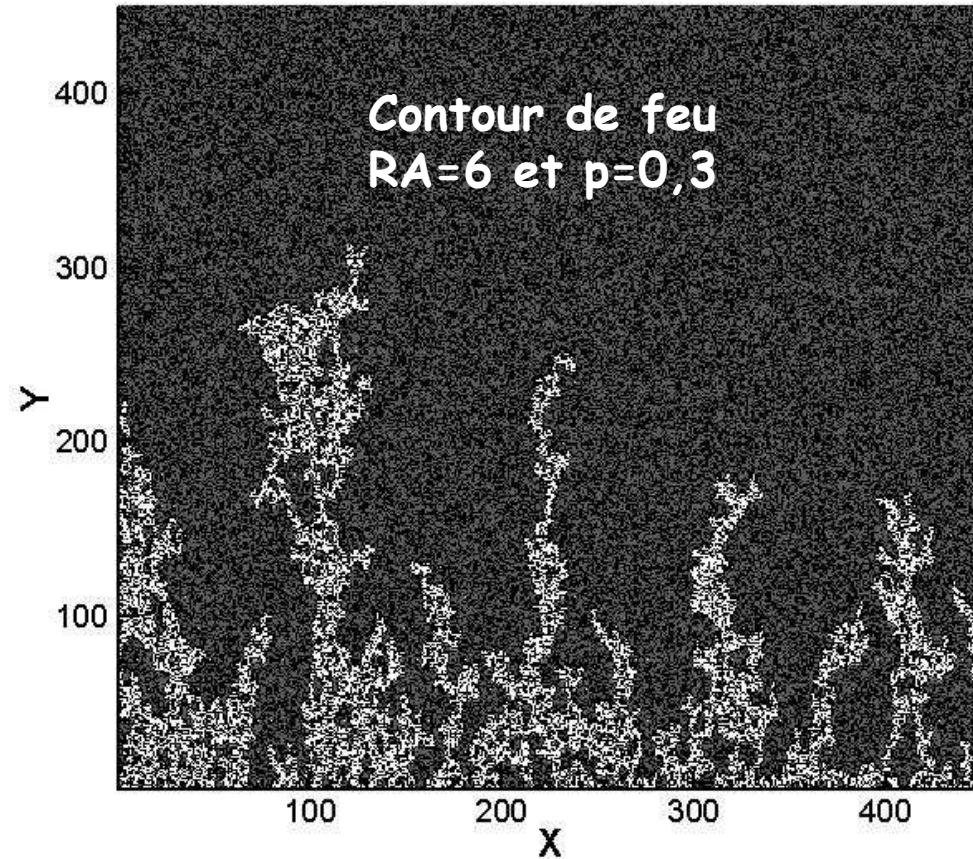
$D_p \approx 1.3$ et $D_s \approx 1.9$

(Caldarelli et al., Europhys. Lett., 2001)

Ces valeurs dépendent de la
résolution du satellite
(ici MODIS, à 500m)

Lorsque la structure est **auto-similaire ou invariante d'échelle**, il n'existe qu'une dimension fractale
(*i.e.* la dimension fractale ne dépend pas de l'échelle d'observation)

Fractalité des grands feux



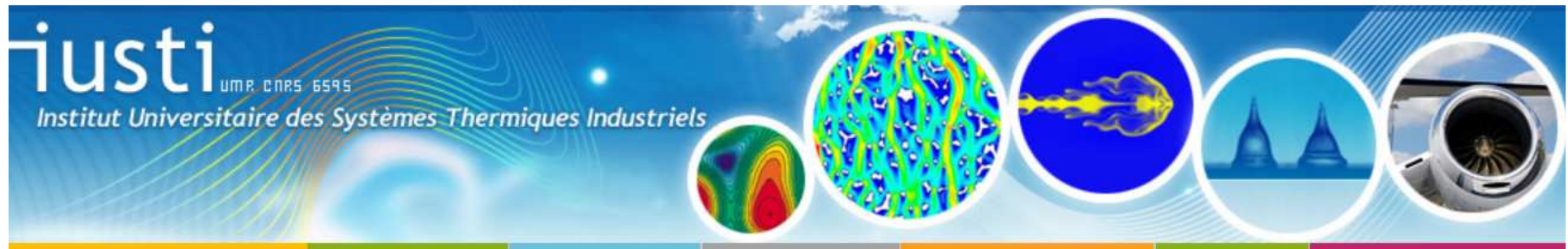
Calcul des dimensions fractales
(méthode de box counting)

<i>Rapport</i>	p_c	D_s	D_p
<i>D'anisotropie</i>			
1	0.59	1.80	1.03
3	0.39	1.88	1.21
6	0.26	1.78	1.47

→ Comportement multi-fractal du feu selon le mode de propagation

Relation de Mandelbrot généralisée

$$S \propto P^\beta \quad \text{avec } \beta = \frac{D_s}{D_p} \text{ fct du rapport d'anisotropie}$$



Sommaire

- ❖ Contexte des feux de forêts à grande échelle
- ❖ Présentation du modèle de propagation
- ❖ Paramètres du modèle
- ❖ Quelques cas d'étude
- ❖ Validation du modèle de propagation
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Fractalité des grands feux
- ❖ **Conclusions et perspectives**

Conclusions et perspectives

Déterministe vs. Stochastique → hybride !!

- capture bien la physique de la propagation (convection, rayonnement) à l'échelle macro.
- échelle gigascopique: hétérogénéités locales et réalité du paysage (amorphisme, polydispersité)
- « super-real-time simulations » (CPU=temps réel/10 à 100)

Le modèle a été validé sur des feux réels

Il permet d'étudier le comportement fractal
ou multi-fractal des grands feux

Analyse de sensibilité (liée à l'incertitude de certains paramètres)

- identifier et hiérarchiser les paramètres les plus influents du modèle
- établir des corrélations simples reliant la vitesse de propagation à ces paramètres influents

Conclusions et perspectives

Applications:



- Tester différentes stratégies de lutte
- Tester l'efficacité des ouvrages de défense
- Elaboration de nouvelles cartes de risque (PPRIF)
- Evaluation plus précise des surfaces (fractales) brûlées et donc des émissions de polluants dans l'atmosphère



- Incertitude et variabilité des paramètres liés au milieu végétal et à sa dégradation thermique
- MNT et COS de meilleure résolution (<50m)

Conclusions et perspectives

Qqs perspectives

- ✓ Amélioration du modèle de rayonnement (MFS avec volume de flamme émettant, MMC inverse, aspect spectral en intégrant les dernières avancées sur les spectres d'émission, en coll. LEMTA)
- ✓ cas d'une végétation polydisperse présentant une distribution verticale notable → transition feu de surface/ feu de cime
 - ✓ Validation du comportement multi-fractal



Merci de votre attention

Et encore merci au
LEMTA, SPE, USTO

Qqs publications en commun sur ce thème

- Billaud et al., *Combust. Sci. Technol.* 185, 2013.
- Parent et al., *J. Phys. Conf. Series* 395, 2012.
- Boulet et al., *J. of Combustion*, 2011.
- Consalvi et al., *Proc. Combust. Inst.* 33, 2011.
- Consalvi et al., *Fire Safety J.* 46, 2011.
- Nmira et al., *Fire Safety J.* 45, 2010.
- Boulet et al., *Int. J. Wildland Fire* 18, 2009.
- Zekri et al., *Physics Letters A* 376, 2012.
- Billaud et al., *J. Phys. Conf. Series* 395, 2012.
- Billaud et al., *IJTS*, 2011.
- Mindykowski et al., *Fire Safety J.* 46, 2011.
- Adou et al., *Ecological Modeling* 22, 2010.
- Kortas et al., *Fire Safety J.* 44, 2009.